

Forschungsbericht

**Auswirkungen von  
Basisinnovationen auf  
die Energiewirtschaft  
und die  
Energienachfrage in  
Deutschland - Am  
Beispiel der Nano-  
und Biotechnologie**

Jochen Lambauer



# **Auswirkungen von Basisinnovationen auf die Energiewirtschaft und die Energienachfrage in Deutschland - Am Beispiel der Nano- und Biotechnologie**

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart zur  
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Jochen Lambauer

geboren in Tübingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Voß  
Mitberichter: Prof. Dr. Hirth

Tag der Einreichung: 13. Juli 2012  
Tag der mündlichen Prüfung: 22. März 2013

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart  
Prof. Dr.-Ing. A. Voß  
Abteilung Energiewirtschaft und Systemtechnische Analyse (ESA)  
Dr. rer. pol. U. Fahl

**2013**

**ISSN 0938-1228**



**D 93 (Dissertation der Universität Stuttgart)**



## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß für die Betreuung der Arbeit sowie für die Möglichkeit, diese am IER durchführen zu können. Gleichmaßen danke ich Herrn Prof. Dr. Thomas Hirth für die Übernahme des Koreferats.

Danken möchte ich auch Herrn Dr. rer. pol. Ulrich Fahl für die fachliche Betreuung und kritische Durchsicht der Arbeit sowie für die zahlreichen wertvollen Anregungen.

Meinen Kollegen am IER danke ich für die freundschaftliche Zusammenarbeit und die anregenden Diskussionen.

Ganz besonders danke ich meiner Frau Sonja für Ihre Geduld und Rückendeckung während der Dauer meiner Promotion und meinen Eltern danke ich recht herzlich für Ihre Unterstützung.

Stuttgart im März 2013

Jochen Lambauer





## Inhaltsverzeichnis

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>III</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>V</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>XI</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>XVII</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>19</b>
1.1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG .....	19
1.2 AUFBAU DER ARBEIT .....	22
<b>2 METHODIK UND VORGEHENSWEISE.....</b>	<b>25</b>
2.1 IDENTIFIKATION DER EINSATZMÖGLICHKEITEN VON BASISINNOVATIONEN .....	27
2.2 SYSTEMATISCHE ANALYSE DER AUSWIRKUNGEN UND POTENZIALE.....	28
2.3 SZENARIENENTWICKLUNG .....	28
2.4 SENSITIVITÄTSANALYSE.....	30
2.5 ZUSAMMENFASSUNG UND EINORDNUNG .....	31
<b>3 GRUNDLAGEN UND STAND DER FORSCHUNG ÜBER BASISINNOVATIONEN .....</b>	<b>33</b>
3.1 EINORDNUNG DES BEGRIFFS BASISINNOVATION .....	33
3.2 NANO- UND BIOTECHNOLOGIE ALS BASISINNOVATION.....	37
3.3 STAND DER FORSCHUNG ÜBER DIE BETRACHTETEN BASISINNOVATIONEN.....	39
3.3.1 <i>Nanotechnologie</i> .....	39
3.3.2 <i>Biotechnologie</i> .....	43
3.4 ENERGIE- UND RESSOURCENVERBRAUCH VON BASISINNOVATIONEN .....	58
3.5 GEFÄHRDUNGSPOTENZIALE VON UND VORBEHALTE GEGEN NEUE BASISINNOVATIONEN .....	64
<b>4 BESCHREIBUNG NANOTECHNOLOGISCHER ANWENDUNGEN.....</b>	<b>81</b>
4.1 BEGRIFFSBESTIMMUNG UND EINORDNUNG VON NANOTECHNOLOGIE.....	81
4.1.1 <i>Definition und historische Entwicklung</i> .....	81
4.1.2 <i>Neue Eigenschaften durch Nanoskaligkeit</i> .....	83
4.2 WISSENSCHAFTLICHE UND TECHNISCHE GRUNDLAGEN VON NANOTECHNOLOGIE.....	85
4.2.1 <i>Top-down- und Bottom-up-Ansatz</i> .....	85
4.2.2 <i>Nanomaterialien</i> .....	86
4.2.3 <i>Herstellungsverfahren und Werkzeuge der Nanotechnologie</i> .....	91
4.3 NANOTECHNOLOGISCHE ANWENDUNGEN UND PRODUKTE MIT AUSWIRKUNGEN AUF DIE ENERGIEWIRTSCHAFT.....	95
4.3.1 <i>Energieerzeugung und -wandlung</i> .....	96
4.3.2 <i>Energieverteilung und -speicherung</i> .....	112
4.3.3 <i>Energienutzung</i> .....	117
4.4 THEORETISCHES POTENZIAL DER NANOTECHNOLOGIE .....	135

---

<b>5</b>	<b>BESCHREIBUNG BIOTECHNOLOGISCHER ANWENDUNGEN.....</b>	<b>139</b>
5.1	BEGRIFFSBESTIMMUNG UND EINORDNUNG VON BIOTECHNOLOGIE .....	139
5.1.1	<i>Rote Biotechnologie</i> .....	142
5.1.2	<i>Grüne Biotechnologie</i> .....	143
5.1.3	<i>Graue Biotechnologie</i> .....	144
5.1.4	<i>Weißer Biotechnologie</i> .....	144
5.1.5	<i>Blaue Biotechnologie</i> .....	145
5.2	WISSENSCHAFTLICHE UND TECHNISCHE GRUNDLAGEN VON BIOTECHNOLOGIE .....	146
5.3	BIOTECHNOLOGISCHE ANWENDUNGEN UND PRODUKTE MIT AUSWIRKUNGEN AUF DIE ENERGIEWIRTSCHAFT.....	151
5.3.1	<i>Nutzung biologischer (nachwachsender) Rohstoffe</i> .....	151
5.3.2	<i>Nutzung von Mikroorganismen und Enzymen zur gezielten Prozesssteuerung</i> .....	159
5.4	THEORETISCHES POTENZIAL DER BIOTECHNOLOGIE .....	183
<b>6</b>	<b>SZENARIEN- UND SENSITIVITÄTSANALYSEN.....</b>	<b>187</b>
6.1	NANOTECHNOLOGIE .....	187
6.1.1	<i>Energieerzeugung, -wandlung, -verteilung und -speicherung</i> .....	187
6.1.2	<i>Energienutzung</i> .....	200
6.2	BIOTECHNOLOGIE.....	213
6.2.1	<i>Nutzung biologischer Rohstoffe</i> .....	213
6.2.2	<i>Nutzung von Mikroorganismen und Enzymen zur gezielten Prozesssteuerung</i> .....	218
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSENDER BEWERTUNG UND ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE EINORDNUNG.....</b>	<b>229</b>
7.1	NANOTECHNOLOGIE .....	229
7.2	BIOTECHNOLOGIE.....	235
7.3	BASISINNOVATIONEN .....	241
<b>8</b>	<b>SCHLUBBETRACHTUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>245</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>249</b>
	<b>ANHANG.....</b>	<b>285</b>

---

**Abbildungsverzeichnis**

<b>Abbildung 2.1:</b> Direkte und indirekte Auswirkungen von Basisinnovationen auf die Energiewirtschaft .....	25
<b>Abbildung 2.2:</b> Direkte und indirekte Auswirkungen der Nanotechnologie auf die Energiewirtschaft .....	26
<b>Abbildung 2.3:</b> Methodik der Analyse .....	27
<b>Abbildung 2.4:</b> Vorgehensweise am Beispiel des Einsatzes von LED und OLED .....	29
<b>Abbildung 2.5:</b> Vorgehensweise am Beispiel der Dämmung von Gebäuden mit VIP .....	30
<b>Abbildung 3.1:</b> Struktur von Basisinnovationen .....	35
<b>Abbildung 3.2:</b> Grobschema einer Bioraffinerie für präkursorenhaltige Biomasse .....	51
<b>Abbildung 3.3:</b> Schematische Darstellung einer grünen Bioraffinerie .....	53
<b>Abbildung 3.4:</b> Schematische Darstellung einer LCF-Bioraffinerie .....	54
<b>Abbildung 3.5:</b> Schematische Darstellung einer Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie .....	55
<b>Abbildung 3.6:</b> Schematische Darstellung des Zwei-Plattformen-Konzeptes .....	56
<b>Abbildung 3.7:</b> Mögliche Freisetzungswegen von Nanopartikeln .....	66
<b>Abbildung 4.1:</b> Veränderungen von Eigenschaften in der Nanowelt .....	83
<b>Abbildung 4.2:</b> Generelle Entwicklungstendenzen in Bezug zur Nanotechnologie .....	86
<b>Abbildung 4.3:</b> Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie im Energiebereich .....	97
<b>Abbildung 5.1:</b> Einteilung der Biotechnologie .....	140
<b>Abbildung 5.2:</b> Schematische Darstellung eines biotechnologischen Prozesses zur Umwandlung von Biomasse .....	146
<b>Abbildung 5.3:</b> Prozessablauf der Umwandlung von Rohabwasser in Biogas .....	165
<b>Abbildung 5.4:</b> Energieverbrauch für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Adipinsäure .....	167
<b>Abbildung 5.5:</b> Treibhausgasemissionen für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Adipinsäure .....	167
<b>Abbildung 5.6:</b> Energieverbrauch für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Butanol .....	169
<b>Abbildung 5.7:</b> Treibhausgasemissionen für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Butanol .....	169
<b>Abbildung 5.8:</b> Energieverbrauch für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Malelinsäureanhydrid (petrochemisch) / Bernsteinsäure (biotechnologisch) .....	171
<b>Abbildung 5.9:</b> Treibhausgasemissionen für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Malelinsäureanhydrid (petrochemisch) / Bernsteinsäure (biotechnologisch) .....	171

---

<b>Abbildung 5.10:</b> Energieverbrauch für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Ethylacetat (petrochemisch) / Ethyllactat (biotechnologisch) .....	172
<b>Abbildung 5.11:</b> Treibhausgasemissionen für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Ethylacetat (petrochemisch) / Ethyllactat (biotechnologisch) .....	173
<b>Abbildung 6.1:</b> Mögliche Auswirkungen durch den Einsatz von thermoelektrischen Generatoren auf die Stromproduktion und die Primärenergieeinsparung .	198
<b>Abbildung 6.2:</b> Entwicklung des Stromverbrauchs je Waschgang (Szenario Bio) .....	219
<b>Abbildung 7.1:</b> Entwicklung der möglichen Endenergieeinsparungen von 2010 bis 2030 für die Nanotechnologie.....	230
<b>Abbildung 7.2:</b> Entwicklung der möglichen Primärenergieeinsparung durch den Einsatz von nanostrukturierten Membranen bei CCS von 2010 bis 2030.....	230
<b>Abbildung 7.3:</b> Entwicklung der möglichen zusätzlichen Energieerzeugung von 2010 bis 2030 für die Nanotechnologie .....	231
<b>Abbildung 7.4:</b> Reduktion der CO <sub>2</sub> -Emissionen durch Energieeinsparung und zusätzliche Energieerzeugung für die Nanotechnologie.....	234
<b>Abbildung 7.5:</b> Entwicklung der möglichen Endenergieeinsparungen von 2010 bis 2030 für die Biotechnologie .....	236
<b>Abbildung 7.6:</b> Entwicklung der möglichen zukünftigen zusätzlichen Energieerzeugung von 2010 bis 2030 für die Biotechnologie.....	237
<b>Abbildung 7.7:</b> Reduktion der CO <sub>2</sub> -Emissionen durch Energieeinsparungen und zusätzliche Energieerzeugung für die Biotechnologie.....	240
<b>Abbildung 7.8:</b> Entwicklung der möglichen Endenergieeinsparungen von 2010 bis 2030 für die beiden betrachteten Basisinnovationen .....	242
<b>Abbildung 7.9:</b> Entwicklung der möglichen zusätzlichen Energieerzeugung von 2010 bis 2030 durch die beiden betrachteten Basisinnovationen .....	242
<b>Abbildung 7.10:</b> Reduktion der CO <sub>2</sub> -Emissionen durch die beiden betrachteten Basisinnovationen.....	243

---

**Tabellenverzeichnis**

<b>Tabelle 3.1:</b>	Beispiele für quantifizierende Untersuchungen zu nanotechnologischen Innovationen .....	41
<b>Tabelle 3.2:</b>	Potenzial zur weltweiten Einsparung an Treibhausgasen durch den Einsatz der industriellen Biotechnologie - Zusammenfassung.....	45
<b>Tabelle 3.3:</b>	Vor- und Nachteile von Bioraffinerie-Konzepten .....	56
<b>Tabelle 3.4:</b>	Herstellungsverfahren für Nanobausteine und Bewertung der Kosten, der Anwendungsreife und des Energieverbrauchs.....	59
<b>Tabelle 3.5:</b>	Bewertung ausgewählter Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie in der Produktion .....	60
<b>Tabelle 3.6:</b>	Beispiele für Studien über den Energieverbrauch bei der Herstellung von Nanopartikeln.....	60
<b>Tabelle 3.7:</b>	Gefahrenpotenziale von nanotechnologischen Anwendungen.....	68
<b>Tabelle 3.8:</b>	Gefährdungspotenziale verschiedener Nanopartikel .....	70
<b>Tabelle 4.1:</b>	Anwendungsbeispiele für Eigenschaftsänderungen bei Nanomaterialien...	84
<b>Tabelle 4.2:</b>	Beispiele für Nanomaterialien und mögliche Anwendungen.....	86
<b>Tabelle 4.3:</b>	Energieleistungsaufnahmen von Displaytechnologien in der Gebrauchsphase .....	122
<b>Tabelle 4.4:</b>	Energieverbrauch unterschiedlicher Displaytechnologien in den einzelnen Lebenswegstufen .....	122
<b>Tabelle 4.5:</b>	Betoneigenschaften.....	124
<b>Tabelle 4.6:</b>	Kostenvergleich für einen Bauträger aus UHPC mit konventionellen Materialien .....	124
<b>Tabelle 4.7:</b>	Theoretisches Potenzial von nanobasierten Anwendungen entlang der energetischen Wertschöpfungskette (Basis 2030) .....	137
<b>Tabelle 4.8:</b>	Vergleich des theoretischen Potenzials der Nanotechnologie mit Vergleichswerten .....	138
<b>Tabelle 5.1:</b>	Ausgewählte Beispiele für biotechnologische Verfahren, Produkte und Prozesse .....	140
<b>Tabelle 5.2:</b>	Historie der Biotechnologie .....	141
<b>Tabelle 5.3:</b>	Produkte der weißen Biotechnologie.....	145
<b>Tabelle 5.4:</b>	Spezifische Vor- und Nachteile und Chancen der Biotechnologie.....	150
<b>Tabelle 5.5:</b>	Energieträger und Biomaterial aus nachwachsenden Rohstoffen.....	151
<b>Tabelle 5.6:</b>	Technisches Substitutionspotenzial ausgewählter Biokunststoffe .....	153
<b>Tabelle 5.7:</b>	Richtwerte zum Biomassertrag, Ölgehalt und möglicher CO <sub>2</sub> -Fixierung für ausgewählte Pflanzen im Vergleich zu Mikroalgen.....	154

---

<b>Tabelle 5.8:</b>	Ausgewählte petrochemische Produkte und ihre biotechnologischen Substitutionsprodukte .....	166
<b>Tabelle 5.9:</b>	Vergleich der chemischen und biotechnologischen Herstellung von Vitamin B <sub>2</sub> .....	174
<b>Tabelle 5.10:</b>	Vergleich der konventionellen und biokatalytischen Herstellung von Cephalexin .....	176
<b>Tabelle 5.11:</b>	Vergleich der Herstellungsverfahren zur Acrylamidproduktion .....	177
<b>Tabelle 5.12:</b>	Theoretisches Potenzial von biotechnologischen Anwendungen entlang der energetischen Wertschöpfungskette .....	185
<b>Tabelle 5.13:</b>	Vergleich des theoretischen Potenzials der Biotechnologie mit Vergleichswerten .....	186
<b>Tabelle 6.1:</b>	Zusätzliche Energieproduktion durch den Einsatz von Antireflexschichten und die entsprechenden Referenzwerte nach .....	189
<b>Tabelle 6.2:</b>	Entwicklung des prozentualen Anteils am Flächenpotenzial und der Wirkungsgrade für unterschiedliche Photovoltaiktechnologien (Nano-Szenario) .....	191
<b>Tabelle 6.3:</b>	Zusätzliche Energieproduktion durch den Einsatz neuartiger Photovoltaiktechnologien .....	192
<b>Tabelle 6.4:</b>	Spezifischer Heizwärme-, Warmwasser -und Strombedarf von Haushalten .....	193
<b>Tabelle 6.5:</b>	Technische Anlagenparameter von BZH.....	193
<b>Tabelle 6.6:</b>	Marktdurchdringung für BZH im Gebäudebestand und im Neubau .....	194
<b>Tabelle 6.7:</b>	Energieeinsparung durch den Einsatz von BZH im Haushaltsbereich .....	194
<b>Tabelle 6.8:</b>	Energieeinsparung durch den Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen ...	195
<b>Tabelle 6.9:</b>	Marktdurchdringung und Energieeinsparung für den Einsatz des Kraftstoffadditivs Ceroxid .....	196
<b>Tabelle 6.10:</b>	Reduktion des Primärenergieverbrauchs durch den Einsatz von nanostrukturierten Membranen für CCS.....	197
<b>Tabelle 6.11:</b>	Zusätzliche Stromproduktion durch thermoelektrische Generatoren .....	198
<b>Tabelle 6.12:</b>	Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz von thermoelektrischen Generatoren in Fahrzeugen .....	199
<b>Tabelle 6.13:</b>	Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz von Superkondensatoren in Hybridbussen .....	199
<b>Tabelle 6.14:</b>	Energieeinsparungen durch den Einsatz von LED und OLED in der Allgemeinbeleuchtung .....	201
<b>Tabelle 6.15:</b>	Technische Parameter von konventionellen Beleuchtungstechnologien und zukünftige Entwicklungen von LED und OLED.....	202

<b>Tabelle 6.16:</b>	Kraftstoffeinsparungen durch den Einsatz von LED in der Frontbeleuchtung .....	203
<b>Tabelle 6.17:</b>	Leistungsaufnahme und Energieverbrauch unterschiedlicher Displaytechnologien .....	204
<b>Tabelle 6.18:</b>	Energieeinsparung durch den Einsatz von OLED-Displays.....	204
<b>Tabelle 6.19:</b>	Energieverbrauch für 1 m <sup>3</sup> Beton und UHPC.....	205
<b>Tabelle 6.20:</b>	Energieverbrauch je Tragwerk für Beton und UHPC.....	205
<b>Tabelle 6.21:</b>	Energieeinsparung durch den Einsatz von UHPC .....	205
<b>Tabelle 6.22:</b>	Technische Parameter von Dämmmaterialien .....	207
<b>Tabelle 6.23:</b>	Heizenergieeinsparung je Wohneinheit durch den Einsatz von VIP im Vergleich zu Polystyrol-Hartschaum.....	207
<b>Tabelle 6.24:</b>	Energieeinsparung durch den Einsatz von VIP als Dämmmaterial.....	207
<b>Tabelle 6.25:</b>	Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz von Polycarbonat für die Automobilverschiebung.....	208
<b>Tabelle 6.26:</b>	Energiebedarf für die Herstellung und Applikation unterschiedlicher Lacksysteme.....	209
<b>Tabelle 6.27:</b>	Energieeinsparung durch Herstellung und Verarbeitung von Nanolacken .....	209
<b>Tabelle 6.28:</b>	Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz von Nanolack im Automobilbereich .....	210
<b>Tabelle 6.29:</b>	Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz von Nanofüllstoffen in Autoreifen .....	210
<b>Tabelle 6.30:</b>	Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz von reibungsreduzierenden Beschichtungen.....	211
<b>Tabelle 6.31:</b>	Energieeinsparung durch den Einsatz von Nanokatalysatoren in der Styrolproduktion .....	212
<b>Tabelle 6.32:</b>	Energieeinsparung durch den Einsatz von Nanopartikeln in der PBT-Verarbeitung .....	213
<b>Tabelle 6.33:</b>	Fossiler Energiebedarf und Produktionsmengen von ausgewählten Kunststoffen.....	213
<b>Tabelle 6.34:</b>	Substitutionspotenzial für konventionelle Kunststoffe durch Biokunststoffe in 2030.....	214
<b>Tabelle 6.35:</b>	Marktanteil von Biokunststoffen in Bezug zum Substitutionspotenzial im Jahr 2030.....	214
<b>Tabelle 6.36:</b>	Energieeinsparung durch den Einsatz ausgewählter Biokunststoffe .....	214
<b>Tabelle 6.37:</b>	Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz von thermoplastischen Reifenfüllern .....	215



---

<b>Tabelle 6.38:</b>	Annahmen zur Produktivitätsentwicklung von Mikroalgenreaktoren und Mais .....	216
<b>Tabelle 6.39:</b>	Entwicklung der Flächen für Energiepflanzen zur Biogasproduktion.....	216
<b>Tabelle 6.40:</b>	Flächenbedarf der Mikroalgenkultivierung zur Biogaserzeugung .....	216
<b>Tabelle 6.41:</b>	Resultierende zusätzliche Biogasproduktion durch Mikroalgen .....	216
<b>Tabelle 6.42:</b>	Annahmen zur Produktivitätsentwicklung von Mikrolagenreaktoren, Raps und Weizen .....	217
<b>Tabelle 6.43:</b>	Entwicklung der Flächen für Energiepflanzen, zur Biogas- und Biokraftstoffproduktion .....	217
<b>Tabelle 6.44:</b>	Flächenbedarf der Mikroalgenkultivierung zur Biokraftstofferzeugung...	218
<b>Tabelle 6.45:</b>	Resultierende zusätzliche Biokraftstoffproduktion durch Mikroalgen.....	218
<b>Tabelle 6.46:</b>	Entwicklung der Verteilung der Waschtemperaturen bis 2030 durch den Einsatz von neuartigen Enzymen.....	220
<b>Tabelle 6.47:</b>	Energieeinsparung durch den Einsatz neuartiger Enzyme in Waschmitteln .....	220
<b>Tabelle 6.48:</b>	Energieeinsparung durch das enzymatische Scouring von Baumwolle ...	220
<b>Tabelle 6.49:</b>	Stromeinsparung durch den Einsatz von anaeroben Bakterien in industriellen Abwasserkläranlagen .....	221
<b>Tabelle 6.50:</b>	Zusätzliche Energieproduktion durch den Einsatz von BHKWs bei industriellen Kläranlagen .....	221
<b>Tabelle 6.51:</b>	Marktdurchdringung des Einsatzes von Enzymen bei Metallreinigern.....	222
<b>Tabelle 6.52:</b>	Energieeinsparungen durch den Einsatz von Enzymen bei der Metallreinigung.....	223
<b>Tabelle 6.53:</b>	Entwicklung der Produktionsmenge von Adipinsäure .....	223
<b>Tabelle 6.54:</b>	Energieeinsparung durch die biotechnologische Produktion von Adipinsäure .....	223
<b>Tabelle 6.55:</b>	Entwicklung der jährlichen Butanolproduktion.....	224
<b>Tabelle 6.56:</b>	Energieeinsparung durch die biotechnologische Herstellung von Butanol.....	224
<b>Tabelle 6.57:</b>	Entwicklung der jährlichen Malelinsäureanhydridproduktionsmenge .....	225
<b>Tabelle 6.58:</b>	Energieeinsparung durch die Substitution von Malelinsäureanhydrid durch Bernsteinsäure.....	225
<b>Tabelle 6.59:</b>	Entwicklung der Produktionsmenge von Ethylacetat.....	226
<b>Tabelle 6.60:</b>	Substitutionspotenziale von Ethyllactat für Ethylacetat .....	226
<b>Tabelle 6.61:</b>	Energieeinsparung durch die Substitution von Ethylacetat durch Ethyllactat .....	226



<b>Tabelle 7.1:</b>	Änderungen entlang der energiewirtschaftlichen Wertschöpfungskette von 2010 zu 2030 (Nano-Szenario).....	232
<b>Tabelle 7.2:</b>	Vergleich des Nano-Szenarios mit dem theoretischen Potenzial der Nanotechnologie in 2030 für unterschiedliche Sektoren.....	233
<b>Tabelle 7.3:</b>	Vergleich zwischen dem Nano-Szenario und der Projektion.....	235
<b>Tabelle 7.4:</b>	Änderungen entlang der energiewirtschaftlichen Wertschöpfungskette von 2010 zu 2030 (Bio-Szenario).....	238
<b>Tabelle 7.5:</b>	Vergleich des Bio-Szenarios mit dem theoretischen Potenzial der Biotechnologie in 2030 für unterschiedliche Sektoren.....	239
<b>Tabelle 7.6:</b>	Vergleich zwischen dem Bio-Szenario und der Projektion nach .....	240
<b>Tabelle A.1:</b>	Energiebedarf und Treibhausgasemissionen von Kunststoffen und Biokunststoffen im Vergleich.....	285
<b>Tabelle A.2:</b>	Bewertung von biotechnologischen Herstellungsverfahren .....	286
<b>Tabelle A.3:</b>	Ausgewählte Beispiele für Einsparpotenziale von Treibhausgasen durch den Einsatz der industriellen Biotechnologie .....	287
<b>Tabelle A.4:</b>	Ausgewählte Beispiele für Treibhausgaseinsparungen durch biotechnologische Verfahren .....	288
<b>Tabelle A.5:</b>	Ergebniszusammenfassung der Wirkungsgradabschätzungen für Vitamin B <sub>2</sub> (nach dem DSM-Verfahren) .....	288
<b>Tabelle A.6:</b>	Ergebniszusammenfassung der Wirkungsgradabschätzungen für Vitamin B <sub>2</sub> (nach dem BASF-Verfahren).....	289
<b>Tabelle A.7:</b>	Ergebniszusammenfassung der Wirkungsgradabschätzungen für Weichen und Äschern.....	289
<b>Tabelle A.8:</b>	Ergebniszusammenfassung der Wirkungsgradabschätzungen für Zusatzstoffe bei der Tierproduktion .....	290
<b>Tabelle A.9:</b>	Ergebniszusammenfassung der Wirkungsgradabschätzungen für enzymhaltige Waschmittel.....	290
<b>Tabelle A.10:</b>	Einsparungen durch ein biotechnologisches Verfahren beim sog. Scouring von Baumwolle.....	291
<b>Tabelle A.11:</b>	LCA Ergebnisse für das Scouring von Baumwolle.....	291
<b>Tabelle A.12:</b>	Einsparungen durch ein biotechnologisches Verfahren beim Entfernen von Bleichmittelresten .....	291
<b>Tabelle A.13:</b>	LCA Ergebnisse für das Entfernen von Bleichmittelresten.....	291
<b>Tabelle A.14:</b>	Sensitive rohstoffabhängige Zukunftstechnologien mit Relevanz für die Energiewirtschaft.....	292
<b>Tabelle A.15:</b>	Intensive rohstoffabhängige Zukunftstechnologien mit Relevanz für die Energiewirtschaft.....	293

---

<b>Tabelle A.16:</b>	Unkritische rohstoffabhängige Zukunftstechnologien mit Relevanz für die Energiewirtschaft .....	294
<b>Tabelle A.17:</b>	Anwendungen, Branchen und Marktvolumen von Plattformchemikalien mit besonderem Substitutionspotenzial für erdölbasierte Stoffe .....	297
<b>Tabelle A.18:</b>	Herstellungsverfahren von Plattformchemikalien mit besonderem Substitutionspotenzial für erdölbasierte Stoffe .....	300

**Abkürzungsverzeichnis**

ABE	Aceton, Butanol und Ethanol
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AFC	Alkalische Brennstoffzellen
AFM	Rasterkraftmikroskopie
AllnGaP	Aluminium Indium Gallium Phosphid
AMBIO	Advanced Nanostructured Surfaces for the Control of Biofouling
a-Si	Amorphes Silizium
BAW	biologisch abbaubarer Werkstoff
BCG	Boston Consulting Group GmbH
BDZ	Bundesverband der deutschen Zementindustrie
BFE	Bundesamt für Energie, Schweiz
BfR	Bundesinstitut für Risikobewertung, Deutschland
BHKW	Blockheizkraftwerk
Bi	Bismut
Bio	Bio-Szenario mit erwarteter Entwicklung
Bio-	Bio-Szenario mit konservativer Entwicklung
Bio+	Bio-Szenario mit progressiver Entwicklung
BLM	Bezugslichtmenge
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung, Deutschland
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Deutschland
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Deutschland
BREW	Medium and Long-term Opportunities and Risks of the Biotechnological Production of Bulk Chemicals from Rewearable Resources - The Potential of White Biotechnologie, the BREW Project
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Deutschland
BTL	Biomass to Liquid
BZH	Brennstoffzellenheizgeräte
CCS	Carbon Capture and Storage
CCVD	Catalytic Chemical Vapour Deposition
CdTe	Cadmium-Tellurid
Cis oder CIGS	Kupfer-Indium-(Gallium)-Diselenid
CNT	Kohlenstoffnanoröhren, Carbon Nano Tubes
CNT-FED	Kohlenstoffnanoröhren-Feldemissionsbildschirm, Carbon Nanotube-Field Emission Display
CO	Kohlenmonoxid
COORETEC	CO <sub>2</sub> -Reduktions-Technologien
CRT	Cathode Ray Tube, Kathodenstrahlröhre
CSP	Solarkraftwerke mit Parabolrinnen-Technologie, Concentrated Solar Power

---

CVD	Chemische Gasphasenabscheidung, Chemical Vapour Deposition
CYP	Cytochrom P450
DBFZ	Deutsches Biomasse Forschungszentrum
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DNS	Desoxyribonukleinsäure; englisch DNA
ECAE	Equal-Channel-Angular-Extrusion-Methode
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure
EFH	Einfamilienhaus
EIO-LCA	Economic Input-Output Life Cycle Assessment
EPA	Environmental Protection Agency
EPS	Polystyrol, expandierbar
ETAP	Environmental Technologies Action Plan
EUV	Extreme Ultra Violet
FC	Brennstoffzelle, Fuel cell
FDA	Food and Drug Administration, US
FGL	Fördergemeinschaft Gutes Licht, Deutschland
FhG-ISE	Fraunhofer-Gesellschaft Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg
FPA-Reaktor	Flat-Panel-Airlift-Photobioreaktor
FR	Flachbettreaktor
FuE	Forschung und Entwicklung, engl. R&D
FZJ	Forschungszentrum Jülich
GBR	Grüne Bioraffinerie
Ge	Germanium
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GHG	Treibhausgas, Greenhouse gas
GMO	Genmodifizierte Organismen
GMR	Riesenmagnetowiderstand, Giant Magnetoresistance
GRE	Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung, Deutschland
GuD-Kraftwerk	Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerk
HA	Hessen Agentur GmbH, Deutschland
HDPE	High-Density-Polyethylen
HDTV	High definition TV, hochauflösendes Fernsehen
HL	Hessische Landesregierung
HMF	Hydroxymethylfurfural
HPT	Hochdruck-Torsion, High Pressure Torsion
IEA	International Energy Agency, Paris
IEF	Institut für Energieforschung, Jülich
INA	Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik – Fachgebiet Technische Elektronik, Universität Kassel
InGaN	Indium Gallium Nitrid

---

IPP	Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching
ITO	Indium-Zinn-Oxid
KCC	Komponenten Klarlack
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Lebenszyklusanalysen
LCD	Flüssigkristallbildschirm, liquid crystal display
LCF	Lignocellulose-Feedstock
LDPE	Low-Density-Polyethylen
LED	Leuchtdiode, Light Emitting Diode
Lkw	Lastkraftwagen
LMS	Lactase-Mediator-System
LNG	Flüssiggas, Liquefied Natural Gas
MCFC	Schmelzkarbonatbrennstoffzellen, Molten-carbonate fuel cell
MFH	Mehrfamilienhaus
MPG	Max-Planck Gesellschaft
MQW	Multi-Quantum-Well-Strukturen
MWNT	Multi walled nanotube, mehrwandige Nanoröhren
Nano	Nano-Szenario mit erwarteter Entwicklung
Nano-	Nano-Szenario mit konservativer Entwicklung
Nano+	Nano-Szenario mit progressiver Entwicklung
NaWaRo	nachwachsende Rohstoffe
NCT	Nanokapseln-Technologie, Nanocapsule Technology
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NNI	National Nanotechnology Initiative
NSTC	National Science and Technology Council
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris
OIDA	Optoelectronics Industry Development Association, US
OLED	Organische Leuchtdiode, organic light-emitting diode
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PA	Polyamid
PAFC	Phosphorsaure Brennstoffzellen, Phosphoric acid fuel cells
Pb	Blei
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PCL	Poly- $\epsilon$ -Caprolacton
PCM	Phasenwechselmaterial, phase change material
PDO	1,3-Propandiol
PDP	Plasmabildschirme, Plasma Display Panel
PECVD	Plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung, Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition

---

PEFC	Polymerelektrolytbrennstoffzelle, Polymer Electrolyte Fuel Cell
PEMFC	Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle, Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PER	Polyethylenphthalat
PET	Polyethylenterephthalat
PGM	Platingruppen-Metalle
PHA	Polyhydroxylalkanoate
PHB	Polyhydroxybutyrat
PHBV	Poly (3- Hydroxybutyrat-co-3-hydroxyvalerat)
PIT	Polytrimethylenterephthalat
Pkw	Personenkraftwagen
PLA	Polymilchsäure, Polyactic acid
POCP	Ozonbildungspotenzial, Photochemical Ozone Creation Potential
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PUR	Polyurethan-Hartschaum
PV	Photovoltaik
PVC	Polyvinylchlorid
PVD	Physical Vapour Verfahren, Physical Vapour Deposition
RR	Röhrenreaktor
RS	Royal Society, UK
RWI	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, Essen
Sb	Antimon
Si	Silizium
SNOM	Raster-Nahfeld-Optische-Mikroskopie, scanning nearfield optical microscope
SOFC	Festoxid-Brennstoffzellen, solid oxide fuel cell
SOP	Standardvorgehensweise, Standard Operation Procedures
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen, Berlin
STM	Rastertunnelmikroskopie, scanning tunneling microscopy
SWNT	Single walled nanotube, einwandige Nanoröhren
SPM	Rastersonden-Mikroskopieverfahren, Scanning Tunneling Microscopy
TBC	Wärmedämmschichten, Thermal Barrier Coating
TBT	Tributylzinnhydrid
TCF	chlorfrei gebleicht, Totally Chlorine Free
Te	Tellur
TEG	thermoelektrische Generatoren
TERM	Technologien zur Erschließung der Ressource Mikroalgen
THF	Tetrahydrofuran
TPS	Thermoplastische Stärke
TPV	Thermophotovoltaik
UBA_CH	Umweltbundesamt Schweiz

---

UHPC	Ultrahochfester Beton, Ultra High Performance Concrete
UV	Ultraviolet
VDI-TZ	Verein Deutscher Ingenieure - Technologiezentrum
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke
VIP	Vakuumisoliations-Paneele
VOC	Flüchtige organische Verbindungen
WDS	Wärmedämmschicht
WE	Wohneinheiten
WFU	Wake Forest University, US
WIPO	World Intellectual Property Organization, Genf
ZFH	Zweifamilienhaus





## Zusammenfassung

Die Bedeutung einer nachhaltigen Energieversorgung steigt aufgrund des globalen Klimawandels und vor dem Hintergrund endlicher Ressourcen stetig an. In diesem Zusammenhang gewinnen neue Innovationen und Technologien an Bedeutung, da grundlegende Forschungserfolge notwendig sind, um die mit einer nachhaltigen Energieversorgung verbundenen Herausforderungen anzugehen. Die Einführung von Basisinnovationen führt zu Änderungen in der Energienachfrage als auch in der Energieversorgung. Als Basisinnovationen der Vergangenheit werden z. B. die Dampfmaschine, das Auto oder das Flugzeug genannt. Aktuell bezeichnet man z. B. die Nano- und Biotechnologie als Basisinnovationen (bzw. Querschnittstechnologien). Als Basisinnovationen haben die Nano- und Biotechnologie das Potenzial für mögliche Verbesserungen entlang der gesamten energetischen Wertschöpfungskette.

Ziel der Arbeit ist es, die derzeitigen und zukünftigen Auswirkungen von Basisinnovationen auf die Energiewirtschaft und die Energienachfrage in Deutschland am Beispiel der Nano- und Biotechnologie zu analysieren und zu bewerten. Um dies zu erreichen, werden derzeitige und zukünftige Produkte, Produktionsprozesse und Dienstleistungen der beiden Basisinnovationen hinsichtlich der direkten und indirekten Auswirkungen analysiert und bewertet. In diesem Rahmen werden ihre Auswirkungen auf eine Änderung der Energienachfrage und die nachgefragten Energieträger untersucht. Dabei werden Änderungen der Energienachfrage sowie mögliche Reduktionspotenziale und Effizienzsteigerungen sowohl durch diese Technologien (direkt), als auch durch den Einsatz von neuen, durch diese Technologien erzeugten Produkte, Anwendungen und Dienstleistungen betrachtet. Die Analyse beinhaltet eine detaillierte Untersuchung des Energiesektors hinsichtlich Neuerungen durch die Nano- und Biotechnologie, um zukünftige Entwicklungen und Änderungen abschätzen zu können. Als Ergebnis werden die Auswirkungen ausgewählter nano- und biotechnologischer Anwendungen auf den Energieverbrauch, die nachgefragten Energieträger, die Energieversorgung, die Energiewirtschaft und die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland bis 2030 dargestellt. Darüber hinaus gehen die Themenpunkte Energie- und Ressourcenverbrauch sowie Gefährdungspotenziale und Akzeptanz neuer Innovationen neben den ermittelten Potenzialen in die zusammenfassende Bewertung ein.

Als Ergebnis der Szenarienbetrachtungen kann festgestellt werden, dass die untersuchten Anwendungen der Nano- und Biotechnologie in 2030 zwischen 319 und 626 PJ an Energie einsparen können. Im Vergleich zum Energieverbrauch in 2010 entspricht dies einer Energieeinsparung von 3,5 bis 6,9 % im Jahr 2030. Darüber hinaus könnten in 2030 zwischen 68 und 168 PJ zusätzlich erzeugt werden. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen würden sich in 2030 im Vergleich zu 2010 um ca. 13 % reduzieren. Es zeigt sich jedoch, dass eine Vielzahl der Anwendungen die Produktion bzw. Umstellung auf einen industriellen Maßstab noch unter Beweis stellen müssen und dass auch marktreife Anwendungen eine lange Zeit benötigen, bis sie zu signifikanten Auswirkungen auf die Energiewirtschaft führen.

Die Nano- und Biotechnologie können zukünftig einen bedeutenden Beitrag zur Rationellen Energienutzung und zur Verbesserung der Energie- und Ressourceneffizienz in Deutschland leisten.

## Summary

Given the depletion of finite resources and impact of climate change on the environment resulting from the use of fossil fuels to generate energy, innovation in energy production is essential to tackle the challenges in the energy sector and to safeguard sustainable energy supply. Optimising the current energy supply and energy demand patterns, or developing new conventional and renewable energy technologies to meet the ever increasing global energy demand require ground-breaking advances in research. Novel breakthroughs in the cutting edge fields of nano- and biotechnology, also known as cross-sectional technologies nowadays, show potential to be applied across the whole value chain of the energy sector. The introduction of cross-sectional technologies leads to changes in energy demand and energy supply. Cross-sectional technologies in the past are however referred to for example the steam engine, the car or the airplane. Nano- and biotechnology are actually named as cross-sectional technologies.

The aim of this work is to analyse and evaluate actual and future impacts of cross-sectional technologies on the energy sector and the energy demand in Germany using the example of nano- and biotechnology. In doing so actual and future processes, products and services which are based on these two cross-sectional technologies are analysed in regard to their direct and indirect impacts on the energy system. The work gives a comprehensive description of the impacts of selected nano- and biotechnological applications on energy consumption, energy sources, energy supply and the energy industry in Germany. It also documents the potential of these applications for energy savings, improvement in energy efficiency and the reduction of emissions until 2030. Furthermore the energy demand of manufacturing and production of nano- and biotechnological applications is taken into account. The total life cycle aspects of new innovations and general resource efficiency are as well considered in the analysis and they are essential for judging eco-friendliness of nano- and biotechnological applications.

The study demonstrates that the analyzed nano- and biotechnological applications have the potential to reduce energy consumption in Germany till 2030 by about 319 to 626 PJ. Based on the energy demand in 2010 this corresponds to a reduction of 3.5 to 6.9% in 2030. Furthermore additional 68 to 168 PJ of electricity could be generated. Next to enhancements in energy efficiency and energy savings, reduction of CO<sub>2</sub> emissions is another key challenge in the future. Compared to CO<sub>2</sub> emissions in Germany in 2010 a reduction of around 13% in 2030 seems conceivable. The feasibility of numerous applications in industrial-scale production has to be further examined and this analysis shows that it takes a long time before close to market applications result in significant impacts on the energy sector.

Nano- and biotechnology can offer undeniably great opportunities for an eco-efficient economy and a sustainable energy system, and coupled with the development of innovative products, processes and applications they are going to make an essential contribution to improvements of energy and resource efficiency in Germany.

# 1 Einleitung

Angesichts des globalen Klimawandels und dem Hintergrund endlicher Ressourcen steigt die Bedeutung einer sich nachhaltig entwickelnden Energieversorgung stetig an. Neben der Optimierung konventioneller Technologien, dem weitreichenden Einsatz erneuerbarer Energien und der Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz werden in diesem Zusammenhang auch neue Technologien und Innovationen an Bedeutung gewinnen. Um die damit verbundenen Herausforderungen angehen zu können, sind grundlegende Forschungserfolge notwendig. Fortschritte in der Nano- und Biotechnologie, als Querschnittstechnologien, zeigen das Potenzial für mögliche Verbesserungen entlang der gesamten energetischen Wertschöpfungskette (Energiegewinnung, -wandlung, -verteilung, -speicherung und -verbrauch). Die Forschung und die daraus resultierenden Anwendungen der Nano- und Biotechnologie befinden sich derzeit noch im Anfangsstadium und die Auswirkungen auf die Wirtschaft sind bisher noch nicht abgeschätzt worden.

## 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Einführung von Basisinnovationen führt zu Veränderungen in den Bereichen der Wirtschaft und der Gesellschaft. Als Basisinnovationen der Vergangenheit werden z. B. die Dampfmaschine, die Eisenbahn, das Auto oder das Flugzeug genannt. Aus der Einführung solcher technologischer Basisinnovationen resultieren Änderungen in der Energienachfrage als auch in der Energieversorgung. Bedeutende Basisinnovationen der Gegenwart stellen die Nanotechnologie und die Biotechnologie dar. Internationale und nationale Studien sehen gerade in diesen beiden Innovationen den Schwerpunkt der Entwicklungen in den kommenden 10 Jahren (siehe /BCG 2006, BSI 2007, VDZ 2007/). Es wird davon ausgegangen, dass diese Technologien nicht nur hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Bedeutung stark zunehmen werden, sondern die Nanotechnologie und die Biotechnologie bieten das Potenzial für Fortschritte im Bereich der Energieeffizienz, dem Umweltschutz und sie ermöglichen neue Wege in der Energiebereitstellung. Nach /BSI 2007/ wird prognostiziert, dass die Nano- und Biotechnologie neben der Mikro-, Medizin- und Informationstechnik ein Innovationsmotor für die ersten Jahrzehnte des neuen Jahrtausend ist. Sie werden vielfach als Basisinnovation bezeichnet, d. h., es wird erwartet, dass von ihr zahlreiche innovative Entwicklungen in den verschiedensten technologischen Bereichen, gesellschaftlichen Anwendungsfeldern und ökonomischen Branchen ausgehen.

/Seiler et al. 2004/ kommt nach dem Vergleich von sechs internationalen Studien (siehe /DTI\_OST 1999-2002, MEXT\_CST 2001, MINEZ 1998, NIC 2001, NSTC\_NSET 2002, OSTP 1998/) zu dem Ergebnis, dass vier große Technologiesegmente bedeutenden Einfluss auf zukunftsrelevante technologische Entwicklungen haben werden: Die Nanotechnologie, die Biotechnologie, die Informations- und Kommunikationstechnologie sowie die Materialtechnologie. Im Technologiefeld Nano- und Biotechnologie setzen jeweils fünf der sechs Studien ihre inhaltlichen Schwerpunkte (Biotechnologie siehe /MEXT\_CST 2001, MINEZ 1998, NIC 2001, NSTC\_NSET 2002, OSTP 1998/; Nanotechnologie siehe /DTI\_OST 1999-

2002, MEXT\_CST 2001, NIC 2001, NSTC\_NSET 2002, OSTP 1998/). Energieeinspartetechnologien, zum Beispiel durch neue biotechnologische Prozesse als Alternativen für energieaufwändige chemische Prozesse, Brennstoffzellen, Energiespeicherung und alternative Kraftstoffe werden studienübergreifend einen sehr hohen Stellenwert eingeräumt. Die Rolle der Nanotechnologie wird zum Beispiel darin gesehen, neue Kategorien von Materialien, Geräten und Systemen zur Anwendung in der Produktion, Konstruktion, Medizin und im Transport zu realisieren. Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich beispielsweise in der chemischen Industrie, in der Automobilindustrie sowie im Energie- und Gesundheitssektor. Eine weitere Übersichtsstudie (siehe /Holtmannspötter et al. 2006/) kommt zu einer sehr ähnlichen Einschätzung. Die darin betrachteten acht internationalen Studien befassen sich sehr intensiv mit dem Themenfeld der Biotechnologie und sechs der acht Studien beschäftigen sich ausführlich mit dem Themenfeld der Nanotechnologie. Im Vergleich zu der Studie von 2004 (siehe /Seiler et al. 2004/) wird dem Technologiefeld Nachhaltigkeit und Umwelt eine sehr bedeutende zukünftige Stellung eingeräumt. Gerade in diesem Themenfeld werden verschiedene Anwendungen aus den Bereichen der Nano- und Biotechnologie themenfeldübergreifend behandelt und dargestellt.

Basierend auf den Untersuchungen von /Holtmannspötter et al. 2006, Seiler et al. 2004/ untersucht /Holtmannspötter et al. 2010/ internationale Technologieprognosen aus sechs Ländern hinsichtlich der Bedeutung von 16 übergreifende Themenfeldern. Dabei spielten die Nano- und Biotechnologie erneut eine wichtige Rolle. Alle der sechs untersuchten Länder beschäftigen sich mit dem Themenfeld der Biotechnologie, vier Länder sehr intensiv. Die Bedeutung der Nanotechnologie verringert sich geringfügig im Vergleich zu den vorangegangenen Untersuchungen. Die Hälfte der untersuchten Länder beschäftigen sich jedoch noch immer intensiv mit nanotechnologischen Anwendungen. Des Weiteren lässt sich aufgrund der Untersuchungsergebnisse feststellen, dass das Thema Energie von sehr großer Bedeutung und das Interesse deutlich gestiegen ist. In der vorangegangenen Studie (siehe /Holtmannspötter et al. 2006/) wurde das Thema der Energie noch als Teilaspekt von Nachhaltigkeit und Umwelt behandelt. In der aktuellen Studie sehen alle sechs Länder eine sehr wichtige Bedeutung im Themenfeld Energie. Auch auf europäischer Ebene werden sowohl die Nanotechnologie als auch die Biotechnologie als sog. „key enabling technologies“ angesehen /Com 2009/.

Erste Berechnungen von /Cientifica 2007a/ und /Cientifica 2007b/ zu möglichen Auswirkungen der Nanotechnologie kommen zu dem Ergebnis, dass Anwendungen der Nanotechnologie, vor allem durch neue Isolationstechnologien im Bau sowie durch Verbesserungen der Verbrennungstechnik im Verkehrssektor, bereits im Jahr 2010 zu einer Reduktion der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen von ca. 0,2 Mio. Tonnen führen werden.

/Walsh 2007/ geht in einer Untersuchung für Großbritannien davon aus, dass kurzfristig und mit geringem Aufwand und Anpassungen bei der Infrastruktur ca. 2,1 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden könnten.

Nach /BioÖkonomieRat 2010/ und /BMBF 2010a/ ist die Biotechnologie „eine der Schlüsseltechnologien der Hightech-Strategie 2020 der Bundesregierung. Ihr wird besondere innovationspolitische Aufmerksamkeit geschenkt, da sie eine zukunftsweisende innovative

Spitzentechnologie ist, deren Beherrschung für die internationale Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands essenziell ist. Von ihr geht hohe politische Signalwirkung beim Umbau der Volkswirtschaften entsprechend dem Leitbild des nachhaltigen Wirtschaftens aus. Als interdisziplinäre Querschnitts- und Spitzentechnologie ermöglicht sie vielfältige Anwendungen, insbesondere in den Bereichen Medizin und Gesundheit, Landwirtschaft und Ernährung, Umweltschutz und Energie sowie Chemie. [...] Neben der Erforschung und Entwicklung biotechnologischer Basistechnologien ist deren erfolgreiche Integration in industrielle Anwendungsfelder und Branchen erforderlich, um Innovations- und Wachstumsprozesse zu fördern und maßgeblich zur Lösung drängender Zukunftsfragen beizutragen. [...] Deshalb trägt die industrielle Biotechnologie<sup>1</sup> wesentlich dazu bei, Biomasse als regenerative industrielle Rohstoffbasis zu erschließen, ökonomisch sinnvoll nutzen zu können und so in der Folge fossile Rohstoffe zunehmend zu ersetzen.“ /BioÖkonomieRat 2010/.

Nach einer Expertenprognose /ColognePaper 2007/ wird der Einfluss der Biotechnologie gerade auch im industriellen Sektor in den kommenden Jahren stetig wachsen. Sie wird als Schlüssel dafür gesehen, Probleme wie zum Beispiel schwindende Rohstoffressourcen und Energieknappheit anzugehen. Hochentwickelte Bioprozesstechniken können dabei umweltschonendere und effizientere Verfahren in den unterschiedlichsten industriellen Produktionsbereichen von Pharma, Chemie und Landwirtschaft ermöglichen und damit einen Beitrag zu einer nachhaltigeren Wirtschaft leisten. Biotechnische Prozesse konkurrieren stets mit anderen prozesstechnischen Lösungen. Auf Grund fehlender Informationen schätzen Entscheidungsträger daher häufig das Kosten/Nutzen-Verhältnis einer biotechnischen Lösung eher als negativ ein und bevorzugen deshalb eine bereits etablierte (technische) Lösung. Industrievertreter betonen, wie wichtig für die Betriebe Informationen sind, anhand derer sie für ihr Unternehmen bewerten können, ob sich die Substitution des konventionellen Verfahrens durch ein biotechnisches bei ganzheitlicher Betrachtung ökonomisch und ökologisch „rechnet“ oder nicht. Bisher fehlt eine belastbare Datengrundlage, die es ermöglicht, für einzelne Industriezweige das Potenzial und die Gesamtrelevanz biotechnischer Ansätze abschätzen und bewerten zu können /Nusser et al. 2007/.

Die Möglichkeiten der Biotechnologie zur ökologischen und ökonomischen Optimierung industrieller Prozesse (effizientere Energieausnutzung, verantwortungsvoller Einsatz von Ressourcen, Vermeidung bzw. Wiederverwertung von Abfällen) sind nicht ausgeschöpft. /Capgemini 2004/ kommt zu dem Ergebnis, dass in einigen Branchen (Automobil und Fahrzeugbau, Textil- und Lebensmittelbranche, Ernährungsgewerbe, Energie- und Wasserversorgung, Erneuerbare Energien) eine detaillierte Betrachtung der Auswirkungen der Biotechnologie notwendig ist. Beispiele für zukünftige Anwendungen der Biotechnologie sind laut dieser Studie Gewichtsreduzierung, alternative Kraftstoffe im Automobilbau, biofunktionelle Oberflächen und naturbelassene Dämmstoffe in der Textil- und Baubranche, gezielte Reaktionsführung, schnelle Umrüstung und Reinigung von Produktionslinien in der Lebensmittel- und Chemieindustrie sowie verbesserte Verfahren zur Energiebereitstellung.

---

<sup>1</sup> weiße Biotechnologie (vgl. Kapitel 5.1)



Studien von /Bang et al. 2009, Buttazzoni 2009/ kommen zu dem Ergebnis, dass die weiße Biotechnologie das Potenzial besitzt, erhebliche Mengen an CO<sub>2</sub> einzusparen. Die Autoren gehen davon aus, dass im Jahr 2030 durch biotechnologische Verfahren 1,0 bis 2,5 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> weltweit eingespart werden könnten.

Neben den einordnenden Untersuchungen von /Holtmannspötter et al. 2006, Holtmannspötter et al. 2010, Seiler et al. 2004/ und ersten Abschätzungen zu den Auswirkungen der Nano- und Biotechnologie auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen (siehe /Bang et al. 2009, Buttazzoni 2009, Cientifica 2007a, 2007b, Walsh 2007/) liegen für einzelne ausgewählte Anwendungen und Technologien der Nano- und Biotechnologie Untersuchungen zum Energieverbrauch oder den Umweltauswirkungen vor (siehe z. B. /Hoppenheidt et al. 2005, OECD 2001, Steinfeldt et al. 2009, Steinfeldt et al. 2010/). In Kapitel 3.3 werden die Ergebnisse dieser Studien zusammengefasst beschrieben.

Eine umfassende und integrierte Untersuchung und Abschätzung der zukünftigen Auswirkungen nano- und biotechnologischer Anwendung auf die Energiewirtschaft und die Quantifizierung resultierender Änderungen im Energieverbrauch sowie mögliche Einsparungen an CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden bisher nicht durchgeführt.

Ziel dieser Arbeit ist daher die Analyse und Bewertung derzeitiger und zukünftiger Auswirkungen von Basisinnovationen am Beispiel der Nano- und Biotechnologie auf die Energiewirtschaft und die Energienachfrage in Deutschland. Es muss dabei zwischen direkten und indirekten Effekten unterschieden werden, welche zusammengenommen sogar konträre Wirkungen haben können. So arbeitete James Watts Dampfmaschine wesentlich effizienter als ihre Vorgänger und senkte so den Energieverbrauch der einzelnen Maschine. Die durch diese technologische Entwicklung ausgelösten indirekten Effekte bestanden jedoch in einer explosiven Zunahme des Energieverbrauchs auf makroökonomischer Ebene, aufgrund der dadurch möglichen großen Ausweitung der Güterproduktion. In der ökonomischen Literatur wird dieser indirekte Effekt auch als makroökonomischer Reboundeffekt bezeichnet /Frondele 2004/. Im Rahmen dieser Arbeit werden die möglichen Auswirkungen der Nano- und Biotechnologie auf die Änderung der Energienachfrage als auch der nachgefragten Energieträger untersucht. Die direkten Auswirkungen auf die Energiewirtschaft in Deutschland umfassen z. B. Änderungen in der Energiewandlungskette und der Energieerzeugung, neue Potenziale für Energieressourcen und zur Energiebereitstellung sowie Entwicklungen in der Kraftwerks- und Speichertechnik.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Vor dem Hintergrund der geschilderten Problemstellung beschreibt das 2. Kapitel zur Erreichung der Zielsetzung die Methodik und Vorgehensweise bei der Untersuchung möglicher Auswirkungen der Nano- und Biotechnologie auf die Energiewirtschaft und die Energienachfrage in Deutschland. Die weiteren Arbeitsschritte orientieren sich an dieser Vorgehensweise. Vorab werden im 3. Kapitel die Grundlagen und der Stand der Forschung über Basisinnovationen beschrieben und es wird dargelegt, warum es sich bei den beiden betrachteten Beispielen um Basisinnovationen handelt. Im 4. Kapitel folgt die detaillierte Beschreibung nano-

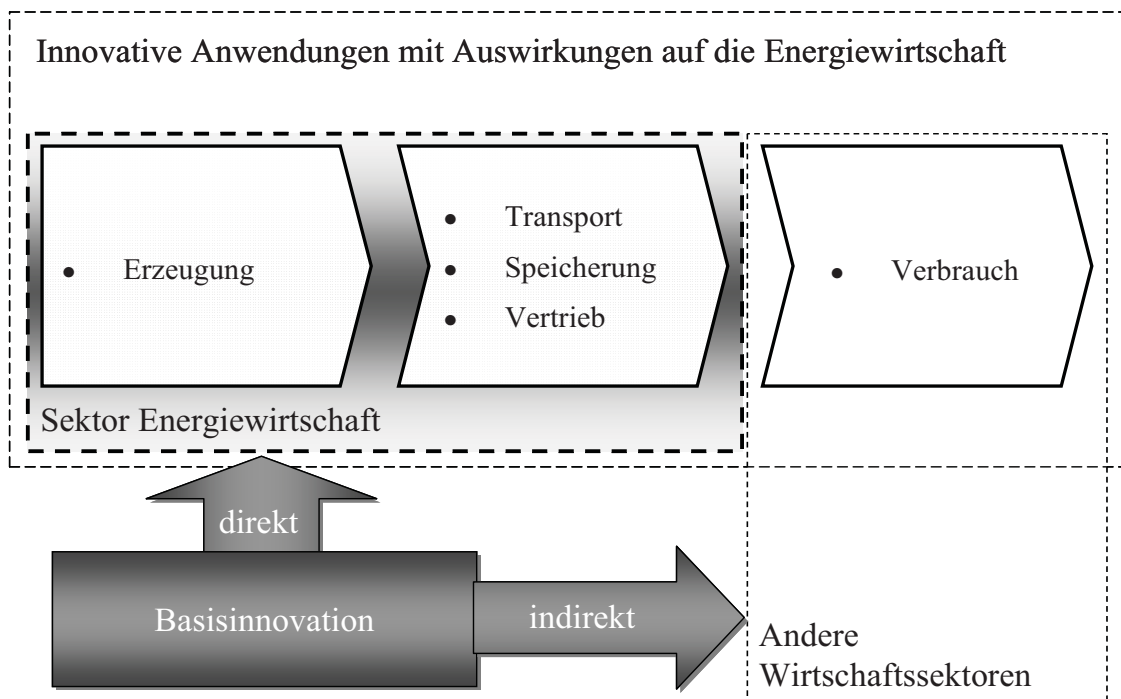
technologischer Anwendungen mit Relevanz für die Energiewirtschaft. Dem entsprechend werden im 5. Kapitel für die Energiewirtschaft relevante Technologien und Anwendungen der Biotechnologie beschrieben. Darauf aufbauend werden im 6. Kapitel für ausgewählte Anwendungen, Prozesse und Prozesssubstitutionen Szenarien- und Sensitivitätsanalysen durchgeführt, welche die Auswirkungen des Einsatzes und der Nutzung der beiden Basisinnovationen auf die Energiewirtschaft und die Energienachfrage in Deutschland bis zum Jahr 2030 untersuchen und abbilden. Im 7. Kapitel werden die vorangegangenen Kapitel zusammengefasst und eine energiewirtschaftliche Einordnung der Ergebnisse vorgenommen. Im abschließenden 8. Kapitel folgen die Schlußbetrachtung und ein Ausblick.





## 2 Methodik und Vorgehensweise

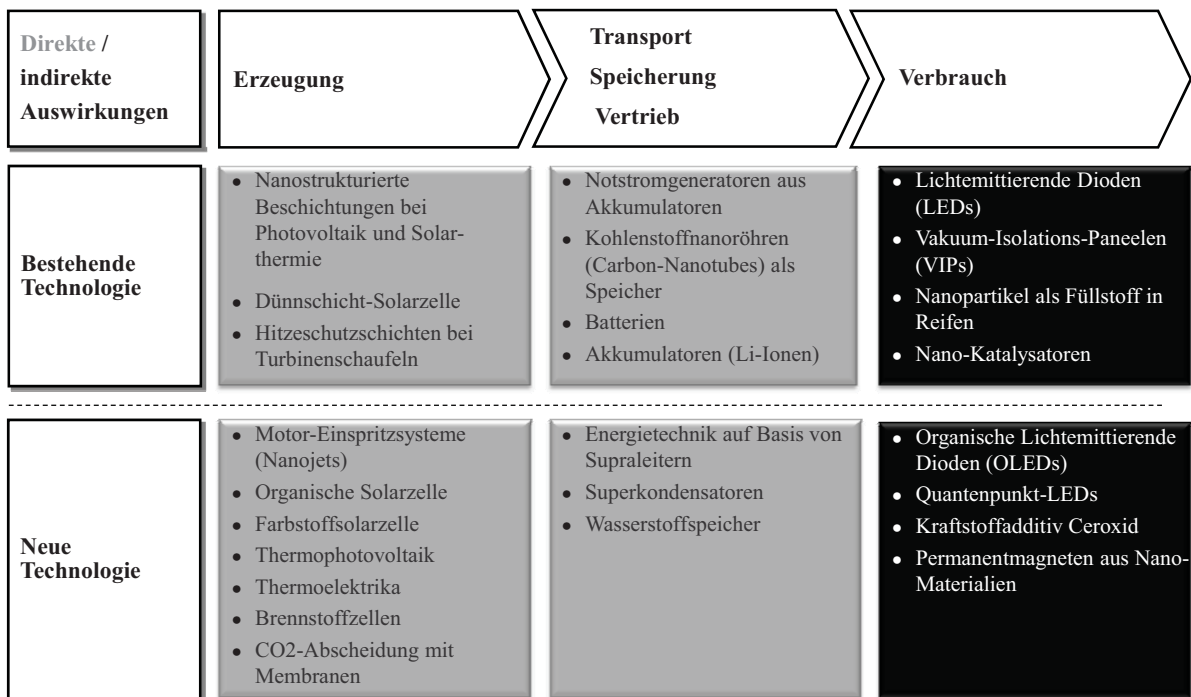
Im Rahmen der Arbeit werden derzeitige und zukünftige Produkte, Produktionsprozesse und Dienstleistungen der Nanotechnologie sowie der Biotechnologie hinsichtlich der direkten und indirekten Auswirkungen analysiert und bewertet. In diesem Rahmen werden die möglichen Auswirkungen auf eine Änderung der Energienachfrage als auch den nachgefragten Energieträgern untersucht. Hierzu wird der aktuelle Status Quo und die möglichen direkten und indirekten Auswirkungen dieser Basisinnovationen branchenübergreifend ermittelt. Dabei werden Änderungen der Energienachfrage sowie mögliche Reduktionspotenziale und Effizienzsteigerungen sowohl durch diese Technologien direkt, als auch indirekt durch den Einsatz von neuen, durch diese Technologien erzeugten Produkte, Anwendungen und Dienstleistungen betrachtet (vgl. **Abbildung 2.1**). Die Analyse beinhaltet eine detaillierte Betrachtung des Energiesektors in Bezug auf Neuerungen durch die Nanotechnologie und die Biotechnologie, um zukünftige Entwicklungen und Änderungen abschätzen zu können. Dadurch wird die Darstellung der Auswirkungen ausgewählter nano- und biotechnologischer Anwendungen auf den Energieverbrauch, die nachgefragten Energieträger, die Energieversorgung, die Energiewirtschaft und die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland möglich und im Rahmen dieser Arbeit bis ins Jahr 2030 untersucht.



**Abbildung 2.1:** Direkte und indirekte Auswirkungen von Basisinnovationen auf die Energiewirtschaft

Direkte Auswirkungen wirken auf den Sektor der Energiewirtschaft und setzen auf den Stufen der Erzeugung oder Transport, Speicherung und Vertrieb an. Hierzu zählen vor allem nano- und biotechnologische Produkt- und Prozessinnovationen von Energietechniken. Indirekte Auswirkungen wirken auf andere Wirtschaftssektoren. Energiesparende Produkt- und Produktionsinnovationen in diesen Sektoren wirken über den Verbrauch auf die Ener-

giewirtschaft. In **Abbildung 2.2** sind am Beispiel der Nanotechnologie Technologien und Anwendungen mit direkten und indirekten Auswirkungen auf die Energiewirtschaft dargestellt. Anwendungen mit direkten Auswirkungen auf die Energiewirtschaft sind z. B. Farbstoffsolarzellen oder Wasserstoffspeicher und als Beispiel für Anwendungen mit indirekten Auswirkungen auf die Energiewirtschaft können Nano-Katalysatoren oder Kraftstoffadditive genannt werden.



**Abbildung 2.2:** Direkte und indirekte Auswirkungen der Nanotechnologie auf die Energiewirtschaft

Die Vorgehensweise bei der Analyse der Auswirkungen nano- und biotechnologischer Anwendungen auf die Energiewirtschaft wird in fünf Schritte eingeteilt (vgl. **Abbildung 2.3**) welche im Folgenden näher beschrieben werden. Der erste Schritt dient der Identifikation der Einsatzmöglichkeiten von Produkten und Anwendungen entlang der energetischen Wertschöpfungskette, welche dann im zweiten Schritt systematisch hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Energiewirtschaft untersucht werden. Auf Basis dieser systematischen Analyse erfolgt die Entwicklung von Szenarien zur quantitativen Abschätzung der zukünftigen Energienachfrage. Aufgrund der Unsicherheiten bei zukünftigen Entwicklungen erfolgt als vierter Schritt eine Sensitivitätsanalyse. Als Ergebnis dieser Analyse wird ein Erwartungsbereich des zukünftigen Energieverbrauchs dargestellt. Im abschließenden fünften Schritt erfolgt die Zusammenfassung, Einordnung und Bewertung der Ergebnisse.

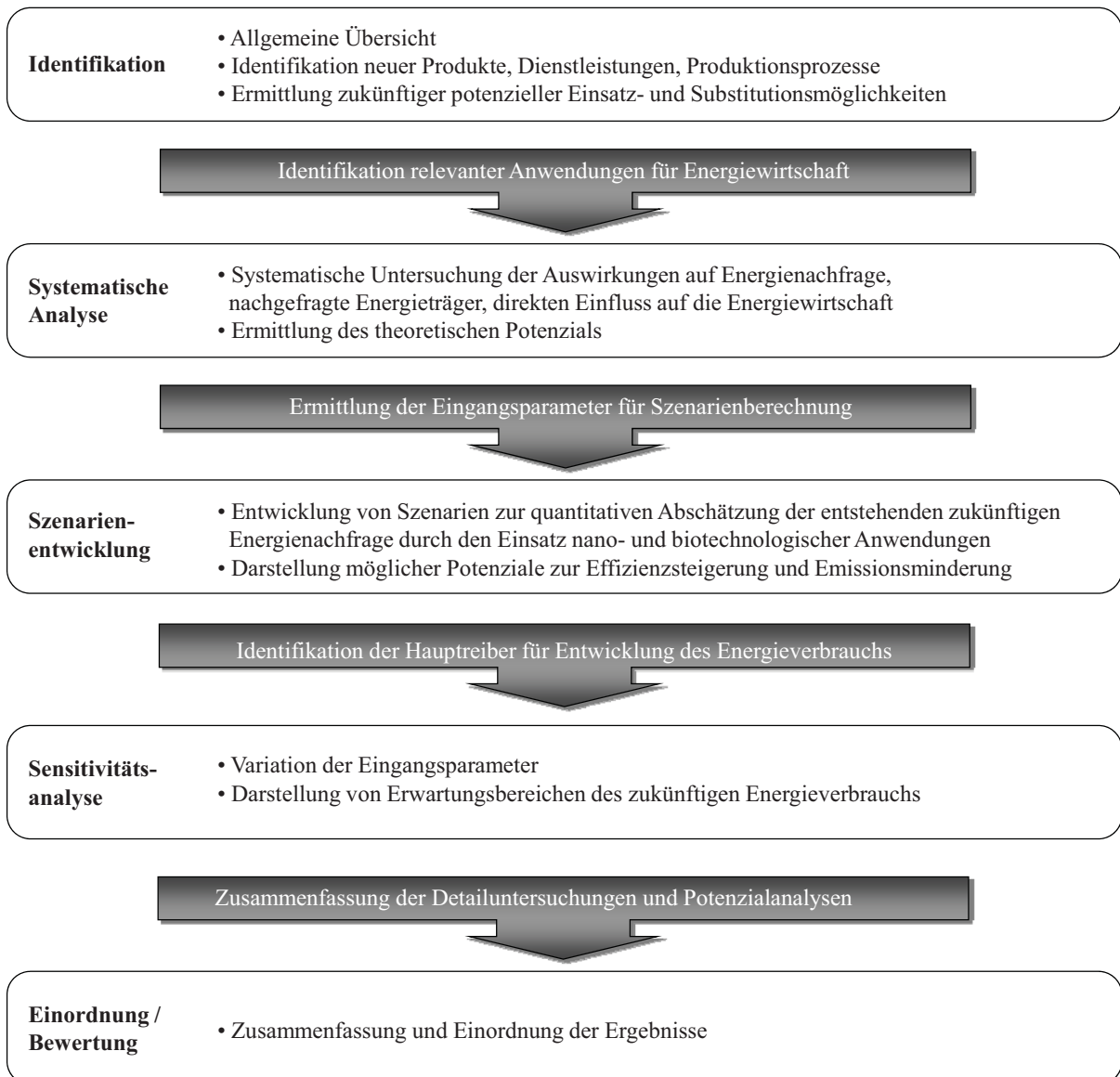


Abbildung 2.3: Methodik der Analyse

## 2.1 Identifikation der Einsatzmöglichkeiten von Basisinnovationen

Im ersten Arbeitsschritt werden branchenübergreifend Produkte, Anwendungen, Dienstleistungen und Prozessinnovationen basierend auf den Basisinnovationen Nanotechnologie bzw. Biotechnologie identifiziert sowie zukünftige potenzielle Einsatz- und Substitutionsmöglichkeiten ermittelt. Hierzu werden neben einer ausführlichen Literaturrecherche auch Markt- und Trendanalysen gezielt hinsichtlich möglicher Veränderungen und technischen Neuerungen, welche aufgrund von Fortschritten in den zwei betrachteten Basisinnovationen ermöglicht werden, untersucht. Dabei werden einerseits speziell auf die Energiewirtschaft einwirkende Anwendungen identifiziert, als auch im Allgemeinen die möglichen Auswirkungen dieser Basisinnovationen analysiert. Neben Branchen- und Trendanalysen für Deutschland werden auch internationale Technologieprognosen untersucht und ausgewertet.

Im Rahmen des ersten Arbeitsschritts werden potenzielle Anwendungen und Prozessinnovationen in den Bereichen der Nano- und Biotechnologie und die daraus resultierenden

Neuerungen und zukünftige Anwendungen identifiziert. Diese werden im folgenden Analyseschritt hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Energiewirtschaft, der daraus resultierenden Energienachfrage und den nachgefragten Energieträgern sowie ihres Potenzials zur Effizienzsteigerung und Emissionsminderung untersucht.

## **2.2 Systematische Analyse der Auswirkungen und Potenziale**

Neben der im ersten Analyseschritt durchgeführten Identifikation von Einsatzmöglichkeiten werden im zweiten Untersuchungsschritt die identifizierten Produkte, Anwendungen, Dienstleistungen und Produktionsprozesse hinsichtlich der Auswirkungen auf Energienachfrage und nachgefragte Energieträger sowie hinsichtlich des direkten Einflusses auf die Energiewirtschaft (z. B. auf die Energieerzeugung und -bereitstellung, Änderungen in der Energiewandlungskette, neuer Potenziale für Energieressourcen) systematisch untersucht. Basierend auf diesen Ergebnissen werden ausgewählte Anwendungsfälle, welche für den jeweiligen Sektor eine herausragende Stellung einnehmen, detailliert analysiert. Die Auswahl dieser Untersuchungen beinhaltet besonders einflussreiche Anwendungen und Neuerungen in den Bereichen der Nano- und Biotechnologie. Dadurch werden aussagekräftige Informationen und Daten für eine Abschätzung der Auswirkungen dieser Basisinnovationen auf die gesamte Energiewirtschaft und deren Potenzial zum effizienten Einsatz von Energie sowie zur Emissionsminderung bereitgestellt.

Mit diesen systematischen Analysen, ergänzt um Beispiele bereits angewandeter Techniken, stehen aussagekräftige Informationen zu den Auswirkungen innovativer Anwendungen basierend auf der Nano- bzw. Biotechnologie zur Verfügung. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Kapitel 4.3 und 5.3 dargestellt.

Neben der detaillierten Beschreibung nano- und biotechnologischer Innovationen wird aufbauend auf den Ergebnissen der systematischen Analysen das theoretische Potenzial der untersuchten Basisinnovationen für ausgewählte Anwendungen und Prozesse untersucht und ermittelt (vgl. Kapitel 4.4 und 5.4). Dieses dient neben den Ergebnissen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen als Grundlage für eine abschließende zusammenfassende Bewertung der möglichen Auswirkungen der beiden Basisinnovationen auf die Energiewirtschaft in Deutschland.

## **2.3 Szenarientwicklung**

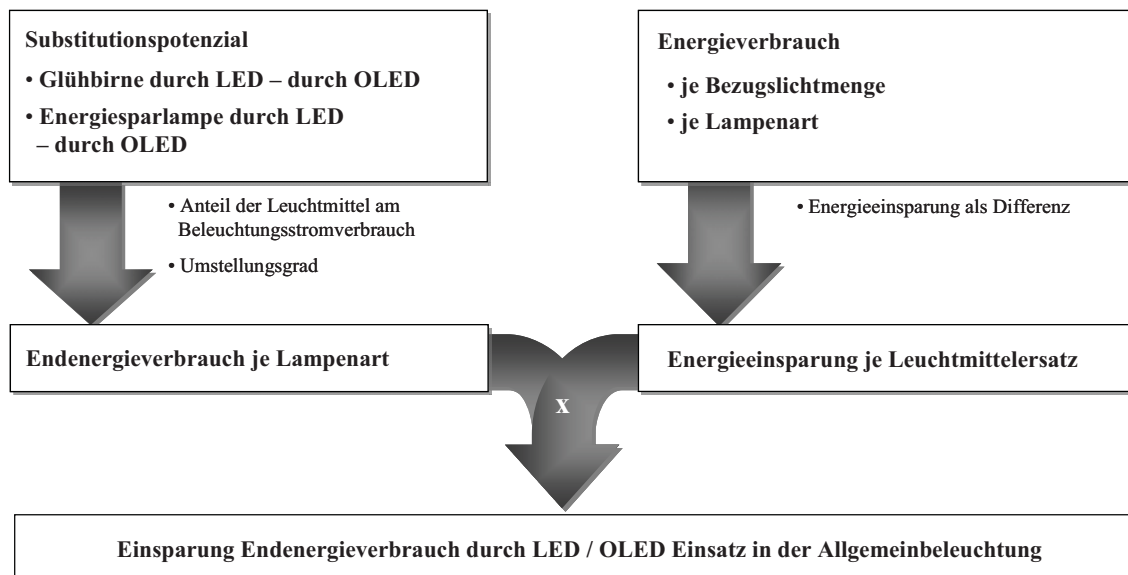
Um die zukünftige Energienachfrage und die nachgefragten Energieträger sowie die Potenziale zur Effizienzsteigerung und CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung der Nano- und Biotechnologie in Deutschland abschätzen zu können, werden Szenarien auf Basis der in Kapitel 4.3 und 5.3 ermittelten Informationen entwickelt. Ein Szenario ist eine allgemeinverständliche Beschreibung einer möglichen Situation in der Zukunft, die auf einem komplexen Netz von Einflussfaktoren beruht. Ein Szenario kann darüber hinaus die Darstellung einer Entwicklung beinhalten, die aus der Gegenwart zu dieser Situation führt /Gausemeier et al. 1996/. Die Projektion wird in Form von unterschiedlichen Annahmen durchgeführt, welche auf dem Ansatz

einer multiplen Zukunft basieren und den Unsicherheiten der zukünftigen Entwicklungen der Nano- und Biotechnologie Rechnung tragen. Sie stellen die Entwicklung der Energienachfrage und der Energieversorgung mit Einfluss dieser Basisinnovationen dem heutigen Status Quo gegenüber.

Die Entwicklung dieser Szenarien erfolgt differenziert nach Sektoren und Energieträgern in fünfjährigen Zeitintervallen von 2010 bis 2030 (vgl. Kapitel 6). Zur Erläuterung dieses Ansatzes wird im Folgenden die Vorgehensweise exemplarisch an zwei Beispielen aufgezeigt:

- der Einsatz von LED<sup>2</sup> und OLED<sup>3</sup> in der Allgemeinbeleuchtung
- die Dämmung von Gebäuden mit innovativen Dämmmaterialien (VIP<sup>4</sup>)

**Abbildung 2.4** zeigt die Vorgehensweise beim Einsatz von LED und OLED in der Allgemeinbeleuchtung. Zu Beginn wird das Substitutionspotenzial von konventionellen Glühlampen und Energiesparlampen durch LED und OLED bestimmt. Darauf aufbauend wird der Energieverbrauch je Lampenart unter Berücksichtigung des Anteils des jeweiligen Leuchtmittels am Beleuchtungsstromverbrauch und dem Umstellungsgrad für die Substitution ermittelt. Die mögliche Energieeinsparung durch den Einsatz von LED und OLED zur Erzeugung einer definierten Bezugslichtmenge wird anhand von technischen Informationen der einzelnen Beleuchtungstechnologien berechnet. Dadurch ergibt sich je Leuchtmittlersatz eine entsprechende Energieeinsparung. Durch Multiplikation dieser Einsparung mit dem Energieverbrauch je Lampenart lässt sich die resultierende Energieeinsparung durch den Einsatz von LED und OLED in der Allgemeinbeleuchtung bestimmen.



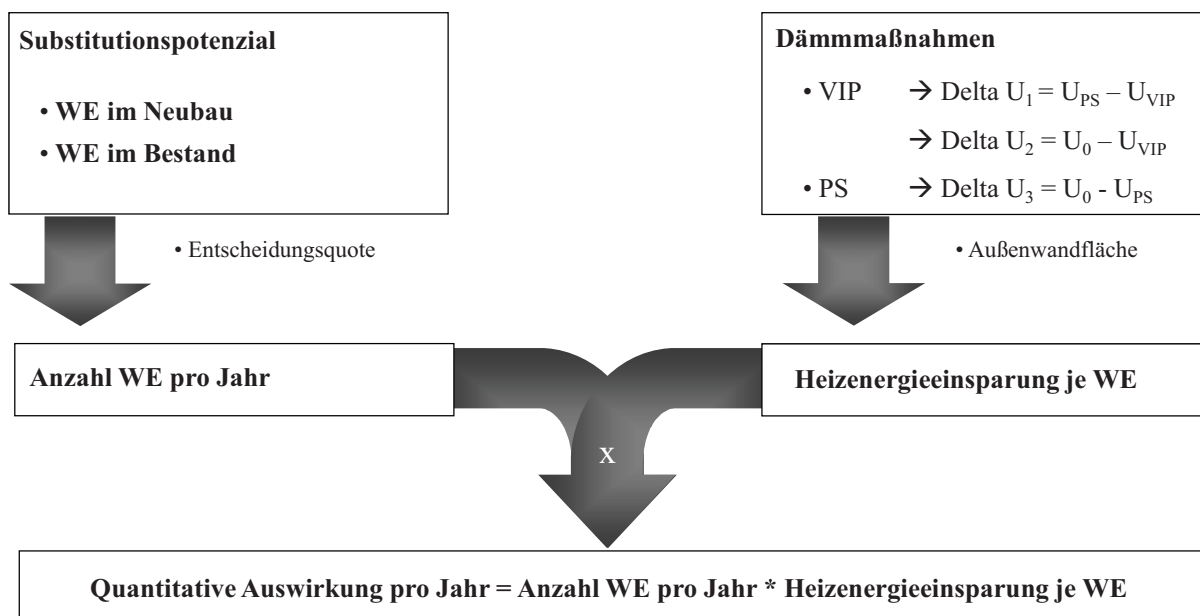
**Abbildung 2.4:** Vorgehensweise am Beispiel des Einsatzes von LED und OLED

<sup>2</sup> LED Leuchtdiode, engl. Light Emitting Diode

<sup>3</sup> OLED Organische Leuchtdiode, engl. organic light emitting diode

<sup>4</sup> VIP Vakuumisulations-Paneele

Neben der Erneuerung der Heizungsanlage besteht ein großes Energieeinsparpotenzial bei Gebäuden in der energetischen Sanierung sprich der Dämmung der Außenwände. In **Abbildung 2.5** ist die Vorgehensweise bei der Berechnung der möglichen Energieeinsparung durch den Einsatz von innovativen Dämmmaterialien (VIP) dargestellt. Anhand der Anzahl an möglichen Wohneinheiten im Neubau und im Bestand sowie der Entscheidungsquote für den Einsatz von VIP bei einer energetischen Sanierung ergeben sich die mit VIP gedämmten Wohneinheiten pro Jahr. Um die resultierende Heizenergieeinsparung je Wohneinheit zu berechnen, wird der resultierende U-Wert einer Referenzwand basierend auf den technischen Informationen unterschiedlicher Dämmstoffe, z. B. Polystyrol als konventionelles Dämmmaterial, berechnet. Anhand der Differenz der U-Werte kann die Einsparung an Heizenergie in Bezug auf einen Quadratmeter Außenwandfläche ermittelt werden. Darauf aufbauend und anhand von typischen Außenwandflächen von Referenzgebäuden wird die Einsparung an Heizenergie je Wohneinheit berechnet. Die quantitative Auswirkung des Einsatzes von VIP bei der energetischen Sanierung von Gebäuden ergibt sich aus der Multiplikation der mit VIP gedämmten Wohneinheiten und der dadurch möglichen Einsparung an Heizenergie pro Wohneinheit.



**Abbildung 2.5:** Vorgehensweise am Beispiel der Dämmung von Gebäuden mit VIP

Diese Vorgehensweisen werden auf alle betrachteten Anwendungen der Nanotechnologie als auch der Biotechnologie in entsprechend angepasster Weise gleichermaßen angewendet. Die Szenarien zur Nano- und Biotechnologie werden sowohl für die betrachteten Basisinnovationen als auch für sinnvolle Teilbereiche separat simuliert und anschließend konsolidiert und für die Jahre 2010 bis 2030 dargestellt.

## 2.4 Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Potenzialanalysen stellen die Entwicklung des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen mit Einfluss dieser Basisinnovationen dem heutigen

Status gegenüber. Neben den Szenarien (Nano- und Bio-Szenario) wird eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der in den Szenarien dargestellten technischen Anwendungen durchgeführt, um im Rahmen der Bewertung umfassende Aussagen zu den direkten Auswirkungen der betrachteten Basisinnovationen auf die Energiewirtschaft und auf Änderungen in der Energienachfrage und den nachgefragten Energieträgern in Deutschland zu ermöglichen (Nano + / Bio + und Nano - / Bio -). Dabei werden wichtige Eingangsparameter wie z. B. Wirkungsgradsteigerung bzw. resultierende Energieeinsparung und Marktdurchdringung einer neuen Technologie um  $\pm 25\%$  variiert. Dadurch kann die Bedeutung dieser beiden Innovationen für die energiewirtschaftliche Entwicklung und deren Potenziale zum effizienten Einsatz von Energie und zur Emissionsminderung in Deutschland abgeschätzt werden.

## **2.5 Zusammenfassung und Einordnung**

Im Rahmen der zusammenfassenden Bewertung werden die Ergebnisse der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen den Betrachtungen und Berechnungen zum theoretischen Potenzial vergleichend gegenübergestellt. Dadurch kann der Umsetzungsstand bzw. die Geschwindigkeit der zukünftigen Auswirkungen der beiden Innovationen bewertet und eingeordnet werden. Des Weiteren erfolgt ein Vergleich der Szenarienergebnisse mit Projektionen zum zukünftigen Energieverbrauch in Deutschland, die im Rahmen der Studie „Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030: Energieprognose 2009“ /Fahl et al. 2010/ im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) erstellt wurden.

Auch die Themenpunkte Energie- und Ressourcenverbrauch sowie die Gefährdungspotenziale und Akzeptanz der Nano- und Biotechnologie gehen neben den ermittelten Potenzialen in die zusammenfassende Bewertung ein. Dadurch kann die Bedeutung dieser beiden Innovationen für die energiewirtschaftliche Entwicklung und deren Potenziale zum effizienten Einsatz von Energie und zur Emissionsminderung in Deutschland abgeschätzt werden und es können im Rahmen der Bewertung umfassende Aussagen zu den direkten und indirekten Auswirkungen der betrachteten Basisinnovationen auf die Energiewirtschaft, auf Änderungen in der Energienachfrage und den nachgefragten Energieträgern in Deutschland erzielt werden.





### 3 Grundlagen und Stand der Forschung über Basisinnovationen

Zu Beginn des Kapitels erfolgt die Einordnung des Begriffs der Basisinnovation. Im Anschluss wird aufgezeigt, warum es sich bei der Nano- und Biotechnologie um eine Basisinnovation handelt und es erfolgt eine Darstellung zum Stand der Forschung über die möglichen Auswirkungen dieser beiden Innovationen auf die Energiewirtschaft, den Energieverbrauch, die CO<sub>2</sub>-Emissionen. In Kapitel 3.4 wird darüber hinaus der Energie- und Ressourcenverbrauch bei der Herstellung und Erzeugung nano- und biotechnologischer Produkte untersucht und bewertet. Im abschließenden Kapitel 3.5 wird auf die Gefährdungspotenziale und Akzeptanz neuer Basisinnovationen eingegangen.

#### 3.1 Einordnung des Begriffs Basisinnovation

1926 wurde von Nikolai Kondratieff in einem Fachartikel darüber berichtet, dass die wirtschaftliche Entwicklung z. B. in Westeuropa aber auch in den USA nicht nur durch das Auftreten von kurzen und mittleren Konjunkturschwankungen gekennzeichnet sei. Es würden in diesen Ländern auch lange Phasen von Prosperität und Rezession periodisch auftreten, die zwischen 45 bis 60 Jahre andauern würden. Dieser Artikel war der Anstoß für eine Forschungsrichtung, die unter der Bezeichnung „Theorie der Langen Wellen“ bekannt ist und zur Ehre von Kondratieff werden die langen Wellen als Kondratieffzyklen bezeichnet /Nefiodow 1996/. Die sogenannten Kondratieffzyklen wurden erst im Rahmen der Entstehung der Marktwirtschaft im 18. Jahrhundert zuverlässig beobachtet und Auslöser für diese Zyklen sind bestimmte technisch-wirtschaftliche Innovationen. Diese werden nach /Nefiodow 1996/ als Basisinnovationen bezeichnet, um sie gegenüber anderen Neuerungen abzugrenzen. In der Literatur gibt es keine weithin akzeptierte, einheitliche Definition des Begriffs der Basisinnovation. Nach /Nefiodow 1996/ sind es die Basisinnovationen, „die umfassend technisches Neuland erschließen und einen breiten Strom von Nachfolgeinvestitionen mit weitreichenden wirtschaftlichen Konsequenzen auslösen“. So gilt die Erfindung der Dampfmaschine als Grundvoraussetzung für die daraufhin einsetzende Industrialisierung.

Nur ein Bruchteil aller neuen Ideen bzw. Innovationen, welche nach der Begriffstrilogie von /Schumpeter 1947/ die erste Phase auf dem Weg zu einer erfolgreichen technologischen Neuerung darstellen, werden schließlich zu Produkten führen, die auf den Weltmärkten Verwendung finden und einen substantiellen Einfluss auf den Wohlstand der Gesellschaft haben. Auch wenn eine Idee in der zweiten und eigentlichen Innovationsphase in ein konkretes, jedoch nicht zwangsläufig marktfähiges, Produkt umgesetzt wird, zum Beispiel in Form eines Prototyps, ist dessen Marktfähigkeit und breite Verwendung noch keineswegs garantiert. Ohne eine erfolgreiche dritte Phase der Diffusion wird sich die Produkt- oder Prozessinnovation nicht bis zur Marktreife entwickeln und einen nachweisbaren Wachstumsimpuls auslösen /Curlee et al. 1989, Stoneman 1995/. Der Elektromotor ist ein prominentes Beispiel für eine Innovation auf der Schwelle zur Diffusion. Mitte des 19. Jahrhunderts patentiert, wird er bisher im Transportsektor nur vereinzelt eingesetzt, trotz eines relativ hohen technischen Entwicklungsstandes. So gibt es noch immer zahlreiche Hemmnisse auf dem Weg zur

flächendeckenden Nutzung des Elektroantriebs in Pkws, etwa die eingeschränkte Reichweite der Energiespeicher in Form von Batterien. Auch die Brennstoffzelle ist bis heute in den meisten Anwendungsfeldern nicht über die Innovationsphase hinausgekommen.

Der Innovationsbegriff stammt aus dem lateinischen *innovare*, übersetzt verändern oder erneuern. In Abgrenzung zur *Invention* („Prozess des Hervorbringens von etwas Neuem“) und zur *Diffusion* („Prozess der weiteren Verbreitung und Übertragung einer Neuerung“) „beschreibt Innovation den Moment, an dem eine Neuerung praktisch und in einer für den jeweiligen Zusammenhang relevanten Weise eingeführt wird. [...] Nach dem zweiten Weltkrieg wurde der Begriff Innovation jedoch immer häufiger für Neuerungen wissenschaftlich-technischer Natur verwendet und löste [...] den Begriff der Neuerung ab, der als empirisch erfassbares Prinzip der wirtschaftlichen Entwicklung besonders in den Wirtschaftswissenschaften von J. A. Schumpeter eingeführt worden war“ /Brockhaus 2011/. Die Szenarien im Rahmen dieser Arbeit sind folglich Diffusionsszenarien. Bei Innovationen lässt sich zwischen inkrementaler und radikaler Neuerung unterscheiden. Basisinnovationen werden als radikal bezeichnet, da sie den Kondratieffzyklen zugrunde liegen und grundlegende wirtschaftliche und gesellschaftliche Veränderungen hervorrufen. Inkrementale Neuerungen sind im Gegensatz dazu „auf Basisinnovationen aufgesetzt, sie verbessern und verändern bestehende Technologien und Produkte“ /Röpke 2004/.

Die wichtigsten bisherigen Basisinnovationen und die von Ihnen ausgelösten Kondratieffzyklen sind:

Dampfmaschine, Baumwolle	→ 1. Kondratieffzyklus
Stahl, Eisenbahn	→ 2. Kondratieffzyklus
Elektrotechnik, Chemie	→ 3. Kondratieffzyklus
Petrochemie, Automobil	→ 4. Kondratieffzyklus
Informationstechnik	→ 5. Kondratieffzyklus

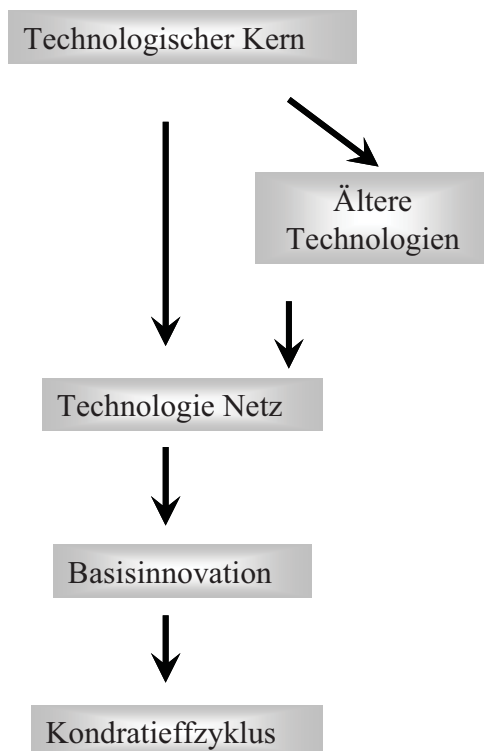
Für eine ausführliche Beschreibung über die Inhalte der einzelnen Kondratieffzyklen wird auf /Nefiodow 1996/ verwiesen. Die übergreifende Bedeutung von Basisinnovationen beschreibt /Nefiodow 1996/ folgendermaßen. „Ihre Rolle als Träger auch langer Phasen der Prosperität wird weithin unterschätzt. [...] Der technische, organisatorische und soziale Fortschritt gilt bis heute als Schlüssel für Wirtschaftswachstum und Wohlstandsmehrung. Nicht Menschenmassen und Rohstoffvorkommen entscheiden über den Wohlstand einer Nation, sondern Fachkompetenz, Kapital, Organisation, Kreativität, Motivation und Kooperation. [...] Seit dem dritten Kondratieff ist der technische, organisatorische und soziale Fortschritt immer stärker von wissenschaftlichen Erkenntnissen und ihrer Umsetzung in Innovationen abhängig geworden. Innovationen und die ihnen zugrunde liegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse und Technologien haben jedoch nicht alle die gleiche Bedeutung. Die meisten Innovationen bringen nur geringe Umsätze, schaffen nur wenige Arbeitsplätze und lösen nur begrenzte oder gar keine sozialen Veränderungen aus. Einige wenige Innovationen hingegen führen zu großen Umsätzen, lassen Millionen neuer Arbeitsplätze entstehen, lösen beträchtliche Produktivitätsverbesserungen und Modernisierungsimpulse in der gesamten Wirtschaft aus und prägen den Strukturwandel über mehrere Jahrzehnte. Innovationen, die diese umfassenden

Wirkungen auslösen, werden [...] Basisinnovationen genannt“. Darüber hinaus definiert er drei Kriterien, die eine Neuerung erfüllen muss, damit sie als Basisinnovation eingestuft werden kann:

1. „Sie muss aus einem Bündel eng vernetzter Technologien bestehen, das in der Lage ist, das Tempo und die Richtung des Innovationsgeschehens für mehrere Jahrzehnte zu bestimmen.“
2. „Damit eine Neuerung als Basisinnovation eingestuft werden kann, muss sie ein Volumen erreichen, das in der Lage ist, das Wachstum der Weltwirtschaft über mehrere Jahrzehnte entscheidend zu beeinflussen.“
3. „Schließlich ist eine Basisinnovation dadurch gekennzeichnet, dass sie zu einer weitreichenden Reorganisation der Gesellschaft führt“ /Nefiodow 1996/.

Seiner Meinung nach können auch mehrere unabhängige Basisinnovationen innerhalb eines Kondratieffzykluses auftreten, sie können sich gegenseitig ergänzen oder in ihrer Wirkung verstärken. Dabei bestehen Basisinnovationen im Wesentlichen aus drei Komponenten (vgl. auch **Abbildung 3.1**):

- Kern (Maschine, Werkstoff, Technologie, physikalisches Prinzip)
- Bündel neuer Technologien
- Technologienetz



**Abbildung 3.1:** Struktur von Basisinnovationen (eigene Darstellung nach /Nefiodow 1996/)

„Die Glieder des Technologienetzes stehen in enger Wechselwirkung miteinander. Sie stützen und befruchten sich gegenseitig, was zur Entwicklung zahlreicher neuer Produkte, neuer Dienstleistungen, neuer oder verbesserter Produktionsverfahren führt. Das Technolo-

gienetz kann mit einer Familie verglichen werden: Im Kern die Eltern, die mit ihren Kindern ein enges Familiennetz bilden. Die neuen Technologien, die aus dem Kern hervorgehen, haben eine doppelte Wirkung: Sie führen einerseits zur Entstehung eines großen neuen Marktes, andererseits werden sie auch in älteren Märkten angewandt und induzieren dort eine Reihe von Innovationen. [...] Die wirtschaftliche Bedeutung einer Basisinnovation erschöpft sich aber nicht darin, einen großen neuen Markt zu schaffen. Ihrer Anwendung in älteren Branchen des produzierenden und dienstleistenden Sektors kommt etwa die gleiche Bedeutung zu“ /Nefiodow 1996/.

Eine weitere Einteilung und Bestimmung des Begriffs der Basisinnovation erfolgt durch /Hauschildt 2004/. Er erläutert jedoch vorab den Begriff Innovation. „Es geht um neue Produkte, neue Verfahren, neue Vertragsformen, neue Vertriebswege, neue Werbeausgaben, neue Corporate Identity. Innovation ist jedenfalls mehr als ein technisches Problem“ (/Hauschildt 2004/ in /Granig 2005/). „Innovationen sagen nichts über die Qualität von Produkten, Dienstleistungen oder Verfahren aus, sondern zeigt eine Abgrenzung gegenüber dem Älteren an und weisen prozesshaften Charakter auf“ /Granig 2005/. Weiter definiert bzw. unterteilt /Granig 2005/ in unterschiedliche Innovationsformen. Er differenziert z. B. nach dem Gegenstandsbereich in Produktinnovationen, Prozessinnovationen, Sozialinnovationen und organisatorische Innovationen. „Die Trennung dieser vier grundlegenden Innovationsarten hat nur analytisch-wissenschaftlichen Charakter, da zwischen den Innovationsarten vielfältige Zusammenhänge und Interdependenzen bestehen. Beispielsweise kann der Einsatz einer neuartigen Lackieranlage (Produktinnovation), die vollautomatisch und weitgehend emissionsfrei arbeitet, zu einer wesentlichen Verbesserung der Arbeitsbedingungen in der Fertigung führen (Sozialinnovation). Durch Integration des Lackier- und Trocknungsvorgangs kann es darüber hinaus zu einer Verkürzung der Durchlaufzeiten kommen (Prozessinnovation)“ /Granig 2005/. Eine weitere Differenzierung erfolgt nach dem Neuheitsgrad, wobei folgende Grundformen unterschieden werden:

- „Basisinnovation: Die Entdeckung bisher nicht bekannter Zusammenhänge kann Ausgangspunkt für viele Erfindungen sein, sozusagen eine Kettenreaktion von Innovationen auslösen. Dabei können völlig neue Märkte erschlossen und/oder neuartige Wirtschaftszweige angelegt werden. Gelingen Basisinnovationen, so gehen von den angelegten Wirtschaftszweigen starke Wachstumsimpulse aus, weil die neueren Produkte und Dienstleistungen noch weiterführende Möglichkeiten für Wachstum aufweisen. Ein typisches Beispiel einer Basisinnovation unserer Zeit ist das Internet mit seinen noch nicht gänzlich voraussehbaren Einsatzbereichen, Anwendungsmöglichkeiten und Auswirkungen auf das Wirtschafts- und Gesellschaftsleben.
- Folgeinnovation: Darunter wird die Verbesserung von Produkten und Dienstleistungen verstanden. Bei genauerer Betrachtung wird ersichtlich, dass die meisten Innovationen Weiterentwicklungen schon vorhandener Erkenntnisse, Produkte und Prozesse sind. Der Prozess einer Folgeinnovation, von den Japanern als Kaizen bezeichnet, hat zum Ziel, Produkte und Dienstleistungen so stark zu verbessern, bis sie sich zu einem völlig anderen Produkt oder Prozess weiterentwickelt haben. Folgeinnovationen bauen auf Bekanntem auf und bewirken schrittweise Verbesserungen. Eine gute Planung

und ein effektives Projektmanagement seitens der Unternehmensleitung sind für den Innovationserfolg entscheidend“ /Granig 2005/.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass als Basisinnovationen daher Innovationen bezeichnet werden können, die umfassende Auswirkungen, wie z. B. Nachfolgeinvestitionen, Produktverbesserungen, Modernisierungsimpulse, etc., zur Folge haben und sich in technisch neuen Bereichen bewegen. Darüber hinaus sind Basisinnovationen in der Lage, das Wirtschaftswachstum über mehrere Jahrzehnte zu beeinflussen und eine Gesellschaft zu verändern.

### 3.2 Nano- und Biotechnologie als Basisinnovation

Doch handelt es sich bei der Nano- und Biotechnologie wirklich um neue Basisinnovationen? Zumindest beschreibt bereits /Nefiodow 1996/ die Biotechnologie als potenziellen Kandidaten für eine Basisinnovation, deren wirtschaftlicher Einfluss jedoch damals als noch zu gering eingeschätzt wurde. Auch /Röpke 2004/ bezeichnet die Nanotechnologie zusammen mit der Biotechnologie und anderen Schlüsseltechnologien „als eine der gegenwärtig noch in den Kinderschuhen steckende Basisinnovation. [...] Der Einsatz nanotechnologisch erzeugter Produkte in alten Industrien gleicht daher einer Verjüngungskur. Der Absatzmarkt für Nano-Innovationen sind die bestehenden Branchen. Nanotechnologie ist eine „general purpose technology“, wie vorher Elektrizität und heute der Computer. Verweigert sich eine Industrie der Einführung von Nanoinnovationen stirbt sie aus oder stagniert - da sie international nicht mehr konkurrenzfähig ist“ /Röpke 2004/.

Auch /Stiller 2005/ beschäftigt sich im Rahmen seiner Dissertation mit dem Titel „Innovationsdynamik in der zweiten industriellen Revolution - Die Basisinnovation Nanotechnologie“ ausführlich mit der Fragestellung, ob die Nanotechnologie als Basisinnovation bezeichnet werden kann. „Aufbauend auf der sogenannten wissenschaftlichen Ökonomie steht im Zeichen des 6. Kondratieff möglicherweise die Erschließung von psychosozialen und seelischen Potentialen, also der ganzheitlichen Gesundheit. Die betriebswirtschaftliche Kostengrenze, die im 6. Kondratieff überwunden werden muss, ist zum jetzigen Zeitpunkt überall dort zu finden, wo Körper, Geist und Seele des Menschen geschwächt und aus dem Gleichgewicht gebracht werden. Standen in den ersten vier-fünf Kondratieffs Spezialisierung und Arbeitsteilung im Vordergrund, könnte im kommenden Kondratieff die Ganzheitlichkeit, die Vernetzung sowie die Interdisziplinarität deutlich an Gewicht gewinnen. Neue große Knappheitsfelder stellen unserer Ansicht nach die Biotechnologie und vor allem die Nanotechnologie dar. [...] Das besondere Kennzeichen der Nanotechnologie ist, dass es sich um eine Querschnittstechnologie handelt. Dadurch unterscheidet sie sich von vielen anderen Technologien. Sie fördert die Entwicklungen in so unterschiedlichen Bereichen wie Medizin und Pharmazie, Materialwissenschaften, Biologie, Umweltschutz und Sensorik, Elektronik und Optoelektronik, der chemischen Industrie und Automobilindustrie und wird die künftigen Märkte umfassend beeinflussen. Es handelt sich um eine Basisinnovation, die den kommenden Wirtschaftszyklus determiniert. [...] Bei der Durchsetzung dieser Basisinnovation im 6. Kondra-



tieff können wir auch davon ausgehen, daß sie zu weitreichenden Reorganisationsprozessen in Wirtschaft und Gesellschaft führt. [...] Die Leading sectors des kommenden Kondratiefzykluses sind nicht nur wissensintensiv wie die Informations- und Kommunikationstechnologie, sondern zunehmend auch wissenschaftsintensiv. Sowohl die Bio- und Gentechnologie als auch die Nanotechnologie sind und werden zunehmend von dem im Wissenschaftssystem erzeugten Wissen abhängig, weil sie einen hohen Grad an Fachwissen sowie Kompetenz in unserem Sinne voraussetzen“ /Stiller 2005/.

Internationale und nationale Studien sehen in der Nano- und Biotechnologie den Schwerpunkt der Entwicklungen in den kommenden 10 Jahren (siehe auch /BCG 2006, BSI 2007, Holtmannspötter et al. 2006, Holtmannspötter et al. 2010, Seiler et al. 2004, VDI 2007/). Es wird davon ausgegangen, dass diese Technologien nicht nur hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Bedeutung stark zunehmen werden, sondern nach der Meinung von Experten bieten gerade die Nanotechnologie und die Biotechnologie das Potenzial für Fortschritte im Bereich der Energieeffizienz, dem Umweltschutz und ermöglichen neue Wege in der Energiebereitstellung. Auch eine vom VDI im Jahr 2007 durchgeführte Umfrage unter technischen Fach- und Führungskräften kommt zu dem Ergebnis, dass die Hauptinnovationstreiber die Nano-, Bio- und Informations- und Kommunikationstechnologien sein werden. Auf den nachfolgenden Plätzen werden Energie- und Umwelttechnik genannt /VDI 2007/. Auf europäischer Ebene werden sowohl die Nanotechnologie als auch die Biotechnologie als sog. „key enabling technologies“ angesehen, die eine große zukünftige Bedeutung für die Entwicklung und Wettbewerbsfähigkeit eines Landes haben werden /Com 2009/.

Weltweit findet die Nanotechnologie zunehmend Beachtung und wird als die Zukunftstechnologie bezeichnet /Schulenburg 2006/. Tiefgreifende Innovationen werden von der Nanotechnologie nach /Paschen et al. 2004/ in nahezu allen technischen Bereichen erwartet. Wegen ihres ausgeprägten Querschnittscharakters und ihres Potenzials zu grundlegenden Veränderungen ganzer Technologiefelder wird die Nanotechnologie als Schlüsseltechnologie angesehen. Sie wird in naher Zukunft nicht nur die technologische Entwicklung beeinflussen, sondern auch maßgebliche ökonomische, ökologische und soziale Implikationen mit sich bringen. Richard E. Smalley, der Mitentdecker der Fullerene und Chemie-Nobelpreisträger, hat die Auswirkungen der Nanotechnologie auf Gesundheit, Wohlstand und Lebensstandard folgendermaßen charakterisiert:

„The impact of nanotechnology on health, wealth, and the standard of living for people will be at least the equivalent of the combined influences of microelectronics, medical imaging, computer-aided engineering, and man-made polymers in this century.“ (in /Paschen et al. 2004/)

Auch wenn viele Anwendungen der Nanotechnologie noch in den Anfängen stecken, lässt sich feststellen, dass sie kein Hype, sondern die Technik des 21. Jahrhunderts ist /Boeing 2005/. Diese Aussage lässt sich am besten durch Beispiele von bereits erfolgreichen Produkten am Markt belegen. Beispielsweise haben lichtemittierende Dioden (LED), die auf nanometerdicken Halbleiterschichten basieren, schon einen Einsatz im hochvolumigen Massenmärkten gefunden /Luther et al. 2004/. In der Energietechnik sind Platin-Nanopartikel als Katalysatormaterial bei Brennstoffzellen etabliert /Steele et al. 2001/. Neben den aussichts-

reichen Möglichkeiten und Potenzialen der Nanotechnologie sind jedoch mögliche toxische Auswirkungen von Nanopartikeln auf Organismen bisher noch nicht hinreichend untersucht. Sie pauschal als gefährlich zu brandmarken und zu stoppen, ist weder machbar noch wünschenswert. Denn das Potenzial für ein nachhaltiges Energiesystem, für einen schonenden Umgang mit den Ressourcen oder für die Heilung tödlicher Krankheiten ist nach /Boeing 2005/ gewaltig.

Zusammenfassend kann auf Basis der dargestellten Untersuchungen und Studien festgestellt werden, dass sowohl die Nanotechnologie als auch die Biotechnologie als Basisinnovation bzw. Schlüsseltechnologie („key enabling technologies“) im zuvor dargestellten Sinne angesehen werden kann.

### 3.3 Stand der Forschung über die betrachteten Basisinnovationen

In Anlehnung an Kapitel 1.1 werden im Folgenden für die betrachteten Basisinnovationen Studien und Forschungsprojekte zusammenfassend dargestellt, die sich mit möglichen Auswirkungen einzelner nanotechnologischer (siehe Kapitel 3.3.1) und biotechnologischer (siehe Kapitel 3.3.2) Anwendungen befassen. Darüber hinaus befasst sich Kapitel 3.3.2 mit dem Thema der Bioraffineriekonzepte, da diese, z. B. nach /Grimm et al. 2011/, zukünftig bedeutende Auswirkungen auf die Energiewirtschaft und die Energieerzeugung in Deutschland haben werden.

#### 3.3.1 Nanotechnologie

Untersuchungen, welche die Umweltauswirkungen von einzelnen nanotechnologischen Produkten und Prozessen quantifizieren, sind nach /Steinfeldt et al. 2010/ bisher die Ausnahme. Darüber hinaus stellt /Steinfeldt 2013/ eine Übersicht zu durchgeführten Lebenszyklusanalysen von nanotechnologiebasierten Produkten und Anwendungen mit dem Ergebnis zusammen, dass große Informations- und Datenlücken die Erstellung von umfassenden Lebenszyklusanalysen erschweren, da Informationen zum Material- und Energieverbrauch der entsprechenden Anwendungen in vielen Fällen nicht verfügbar sind. Eine Übersicht zu Untersuchungen von einzelnen nanotechnologischen Anwendungen hinsichtlich Ihrer Umweltauswirkungen sind in **Tabelle 3.1** dargestellt.

So untersuchten z. B. /Lloyd et al. 2003/ die Einsatzmöglichkeiten von Polypropylen-Nanokompositen in Automobilanwendungen mit dem Ergebnis, dass alle Umweltwirkungen reduziert werden können und große Ressourcen- und Energieeinsparungen möglich sind. Durch die Verwendung von nanoskaligen Platingruppen-Metallen in Autoabgaskatalysatoren können die resultierenden Umweltauswirkungen um 10 bis 40 % reduziert werden /Lloyd et al. 2005, Steinfeldt et al. 2003/.

Der Einsatz der Nanotechnologie im Bereich Beschichtungen ermöglicht hinsichtlich den Emissionen und Umweltauswirkungen nach /Steinfeldt et al. 2004/ sehr hohe Ökoeffizienzpotenziale. Durch die Verringerung der notwendigen Schichtdicken der Nanolacke wird eine um den Faktor fünf höhere Ressourceneffizienz erreicht.

Eine Lebenszyklusanalyse zu einem alternativen Verfahren der Styrolsynthese auf Basis eines nanostrukturierten Katalysators ermöglicht auf der Prozessstufe ein Energieeinsparpotenzial von knapp 50 %. Bezogen auf den gesamten Produktionsweg bis zum Styrol bedeutet dies eine Effizienzsteigerung beim Energiebedarf von 8 bis 9 % /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/.

Nach /BASF 2005/ und /Steinfeldt et al. 2010/ führt der Einsatz von Nanopartikeln in der Kunststoffverarbeitung zur reduzierten Umweltauswirkungen. Die erreichbaren Einsparungen variieren zwischen 1,5 % und 9 %.

Durch die Herstellung von lötfähigen Endoberflächen auf Leiterplatten unter Einsatz der Nanotechnologie können je nach Kategorie die Umweltauswirkungen um ein Vielfaches verbessert werden und der Einsatz von mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhren in der Halbleiterindustrie reduziert die Umweltauswirkungen in einem Bereich von 12,5 bis 20 % /Steinfeldt et al. 2010/.

Eine erste Abschätzung zum Potenzial von OLED<sup>5</sup>-Displays geht bei der Überwindung von Problemen der Langzeitstabilität von einer 20 %igen Energieeinsparung gegenüber LCD<sup>6</sup>-Displays über den gesamten Lebensweg aus.

/Möller et al. 2009/ untersuchten die Auswirkungen von nanotechnologisch verbesserten PET<sup>7</sup>-Flaschen. Im Vergleich zu Aluminiumflaschen können die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 1/3 und im Vergleich zu Glasflaschen um 60 % reduziert werden.

---

<sup>5</sup> OLED Organische Leuchtdiode, engl. organic light emitting diode

<sup>6</sup> LCD Flüssigkristallbildschirm, engl. liquid crystal display

<sup>7</sup> PET Polyethylenterephthalat



**Tabelle 3.1:** Beispiele für quantifizierende Untersuchungen zu nanotechnologischen Innovationen /Steinfeldt 2013/

Untersuchungsgegenstand	Methode	Technischer Nutzen	Umweltnutzen	Referenz
Antireflexglas für Solarzellen im Vergleich zu traditionellem Glas	Messung der er-wartbaren Effizienzsteigerung	Erhöhte solare Transmission	Bis zu 6 % höhere Energieeffizienz	/BINE 2002/
Polypropylen-Nanokomposit in Automobilanwendungen im Vergleich zu Stahl und Aluminium	Ökologisch-ökonomische Lebenszyklusbeurteilung (EIO-LCA <sup>8</sup> )	Gewichtsreduktion abhängig vom Anteil an Nanokomposit	Überall reduzierte Umweltauswirkungen; große Energie- und Ressourceneinsparung	/Lloyd et al. 2003/
Nanoskalige Platingruppen-Metalle (PGM) in Autoabgaskatalysatoren		Reduzierung der PGM-Einsatzmenge um 95 %	Überall reduzierte Umweltauswirkungen	/Lloyd et al. 2005/
Nanotechnologiebasierte Photovoltaik im Vergleich zu Modulen auf Basis von multikristallinem Silizium		Reduzierung der PGM-Einsatzmenge um 50 %	Überall reduzierte Umweltauswirkungen (10 % - 40 %)	/Steinfeldt et al. 2003/
Styrolsynthese auf Basis eines Kohlenstoffnanoröhren-Katalysators im Vergleich zum Katalysator auf Eisenoxidbasis	Ökopprofil in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik	Veränderung des Reaktionstyps; Reduzierung der Reaktionstemperatur; Veränderung des Reaktionsmediums	Verkürzte energetische Amortisationszeiten; Farbstoffsolarzelle aber mit geringerem Wirkungsgrad	
Nanolack im Vergleich zu konventionellen Lacken		Notwendige Schichtdicke geringer bei gleicher Funktionalität	Knapp 50 % geringerer Energiebedarf für die Styrolsynthese	/Steinfeldt et al. 2004/ und /Steinfeldt et al. 2007/
Vergleich von konventionellen und nanotechnologiebasierten Displays		Erhöhte Energieeffizienz; höhere Bildschirmauflösung; geringere Displaydicke	5 - 8 erhöhte Ressourceneffizienz; 65 % geringere VOC <sup>9</sup> -Emissionen	
Weißer LED im Vergleich zu Glühlampe und Kompaktleuchtstofflampe	Ökopprofil in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik	Höhere Lebensdauer	Erhöhte Energie- und Materialeffizienz; geringerer Materialinput für OLED; doppelt so hohe Energieeffizienz in der Nutzungsphase	/Steinfeldt et al. 2004/ und /Steinfeldt et al. 2007/

<sup>8</sup> EIO-LCA Economic Input-Output Life Cycle Assessment<sup>9</sup> VOC Flüchtige organische Verbindungen, engl. Volatile Organic Compound

Fortsetzung von **Tabelle 3.1**: Beispiele für quantifizierende Untersuchungen zu nanotechnologischen Innovationen /Steinfeldt 2013/

Untersuchungsgegenstand	Methode	Technischer Nutzen	Umweltnutzen	Referenz
Vergleich von nanooptimierten Kunststoffen in der Spritzgußverarbeitung	BASF Ökoeffizienzanalyse	Signifikant höhere Fließfähigkeit; Reduktion der Bearbeitungszeit und des Energieverbrauchs bei der Spritzgußverarbeitung	Geringere Umweltauswirkungen (1,5 % - 9 %), nur erhöhtes Ozonabbau-potenzial	/BASF 2005, Steinfeldt et al. 2010/
Vergleich der Herstellung lötfähiger Endoberflächen auf Leiterplatten durch Nanotechnik und durch konventionelle Verfahren		Notwendige Schichtdicke geringer bei gleicher Funktionalität	In Relation zu qualitativ vergleichbaren Prozessen je nach Umweltauswirkungskategorie um den Faktor 4 bis 390 besser	
Anwendung von mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhren für leitfähige Folien in der Halbleiterindustrie	Ökoprofil in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik, Software Umberto	Notwendige Foliendicke geringer bei gleicher Funktionalität	12,5 % - 20 % reduzierte Umweltauswirkungen	/Steinfeldt et al. 2010/
Entlastungseffekte für die Umwelt durch Anwendung von Lithium-Ionen-Batterien als Energiespeicher im Bereich von Hybridantriebssystemen im Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV)		Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch das Hybridsystem	Um ca. 20 % reduzierte Umweltauswirkungen im zukünftigen Szenario	
Nanotechnologiebasierte Einwegverpackungen (Nano-PET <sup>10</sup> Flasche) im Vergleich zu konventionellen Verpackungen	Ökobilanz, speziell CO <sub>2</sub> -Emissionen	Verbesserte Barriereigenschaften speziell gegenüber Sauerstoff	Nano-PET Flasche 1/3 weniger CO <sub>2</sub> -Emissionen im Vergleich zu Aluminium und 60 % weniger CO <sub>2</sub> -Emissionen im Vergleich zu Glas	/Möller et al. 2009/

<sup>10</sup> PET Polyethylenterephthalat

/Walsh 2007/ untersucht fünf nanotechnologische Anwendungen detailliert auf ihre positiven Auswirkungen auf die Umwelt. Der Einsatz von Kraftstoffadditiven könnte in weniger als fünf Jahren zu Einsparungen von 2 bis 3 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> führen. In einem Zeitraum von 3 bis 8 Jahren geht /Walsh 2007/ davon aus, dass durch Isolationsanwendungen maximal 3 Mio. Tonnen eingespart werden können. Durch nanotechnologische Fortschritte in der Photovoltaik sollen in naher Zukunft (> 5 Jahre) weitere Einsparungen von ca. 6 Mio. Tonnen möglich werden. Die beiden ebenfalls von /Walsh 2007/ untersuchten Anwendungen, Elektrische Speicher (Batterien und Superkondensatoren) sowie die Idee einer Wasserstoffwirtschaft, sollen im Vergleich zu den bereits dargestellten Anwendungen ein deutlich größeres Einsparpotenzial aufweisen. Diese Einsparungen (10 bis 42 Mio. Tonnen durch elektrische Speicher und 29 bis 120 Mio. Tonnen durch die Wasserstoffwirtschaft) sind nach Einschätzung von /Walsh 2007/ jedoch erst in einem Zeitrahmen von 10 bis 40 Jahren bzw. 20 bis 40 Jahren realisierbar. Zusammenfassend geht /Walsh 2007/ davon aus, dass zeitnah CO<sub>2</sub>-Einsparungen von 2 % und bis zum Jahr 2050 Einsparungen von bis zu 20 % durch den Einsatz der Nanotechnologie in Großbritannien möglich sind.

Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass einzelne, übergreifende Untersuchungen zu den möglichen Auswirkungen der Nanotechnologie auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie Analysen zu den Auswirkungen einzelner Anwendungen auf den Energieverbrauch und die damit verbundenen Emissionen verfügbar sind, eine integrierte und umfassende Betrachtung und Analyse der Auswirkungen der Nanotechnologie auf die Energiewirtschaft bisher jedoch nicht vorliegt.

### 3.3.2 Biotechnologie

Bei der Darstellung der Forschungsergebnisse zu den Auswirkungen biotechnologischer Anwendungen wird zwischen der Nutzung biologischer Rohstoffe und dem Einsatz von Enzymen zur gezielten Prozesssteuerung unterschieden. Darüber hinaus erfolgt eine Darstellung zum Stand der Forschung bei Bioraffineriekonzepten.

#### Nutzung biologischer Rohstoffe

Hinsichtlich der Umweltauswirkungen durch den Einsatz von Biokunststoffen ist die Anzahl der verfügbaren Produktökobilanzen gering. /Oertel 2007/ führt eine Literaturlauswertung von Ökobilanzen verschiedener Biokunststoffe aus den Jahren 1998 bis 2003 durch und kommt zu dem Resultat, dass die Ergebnisse inhomogen sind und es große Bandbreiten bei den Ergebnissen gibt. Für die einzelnen Umweltwirkungen lässt sich keine allgemeine Tendenz hinsichtlich der Vor- oder Nachteile beim Vergleich von auf nachwachsenden Rohstoffen basierten Kunststoffen im Vergleich zu den petrochemischen Vergleichskunststoffen feststellen. Es zeigt sich, dass tendenziell neuere Studien eher Vorteile durch den Einsatz von Biokunststoffen sehen.

In einer umfassenden Studie untersuchen /Wolf et al. 2005/ die Auswirkungen von Biokunststoffen auf den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen. **Tabelle A.1** im An-

hang stellt den Vergleich von ausgewählten Kunststoffen zusammen. Bei petrochemischen Kunststoffen werden High-Density-Polyethylen (HDPE), Polyethylenphthalat (PER) und Polystyrol betrachtet. Folgende biobasierten Kunststoffe sind Teil der Untersuchung:

- Thermoplastische Stärke (TPS)
- Thermoplastische Stärke mit einem 60-%-Anteil von Poly- $\epsilon$ -Caprolacton (PCL)
- Zellophan
- Zelluloseacetat
- Polymilchsäure (PLA) aus Getreide
- Polymilchsäure (PLA) aus einer Bioraffinerie
- Polyhydroxylalkanoate (PHA) durch Fermentation
- Polyhydroxylalkanoate (PHA) durch Photosynthese

Die Angaben zu PET beziehen sich auf Flaschenqualität, die Angaben zur Prozessenergie für PLA aus Getreide entsprechen dem Energiebedarf einer optimierten Milchsäureherstellung und dem Prozessenergiebedarf für PLA auf Basis einer Bioraffinerie liegt eine Energiegewinnung aus der ligninhaltigen Rohstofffraktion zugrunde. Die Angaben beziehen sich jeweils auf eine Tonne hergestellten Kunststoff. Es kann festgestellt werden, dass bei einer reinen Betrachtung des spezifischen Energiebedarfs zur Herstellung einer Tonne Kunststoff bei einigen Biokunststoffen deutlich weniger Energie aufgewendet werden muss als bei petrochemischen Kunststoffen. Unterschiede bei Biokunststoffen ergeben sich jedoch durch den jeweiligen Herstellungsprozess. So liegt der Energiebedarf zur Herstellung einer Tonne PLA aus Getreide bei 48 GJ/t, wird PLA hingegen in einer Bioraffinerie auf Basis einer ligninhaltigen Rohstofffraktion hergestellt, so verringert sich der Energiebedarf auf 29 GJ/t /Wolf et al. 2005/.

### **Nutzung von Enzymen zur gezielten Prozesssteuerung**

Bereits 2001 untersucht die OECD mögliche Potenziale der industriellen Biotechnologie und fasst 21 Fallstudien in einer vereinheitlichten Form zusammen. Eine Übersicht ist in **Tabelle A.2** dargestellt. Eine Erhöhung der Auswirkungen ist dabei mit einem „+“, eine Verringerung mit einem „-“ und bei keiner Veränderung ist dies durch ein „=“ gekennzeichnet. Es wird deutlich, dass gerade in den Bereichen Energie und Rohstoffeinsatz bei der Mehrzahl der Fallstudien Einsparungen, teilweise in beträchtlichem Umfang, möglich sind /OECD 2001/.

Nach /Perlitz 2007/ führt das Potenzial der weißen Biotechnologie (industrielle Biotechnologie, siehe auch Kapitel 5.1) sowohl zur Substitution traditioneller chemischer Produktionsverfahren als auch zur Herstellung von neuen chemischen Produkten. Eine wichtige Rolle spielen dabei Enzyme, die als Katalysatoren chemische Reaktionen beschleunigen. Ihre Bedeutung liegt in einzelnen Produkten z. B. Waschmittelenzyme als auch in Prozessen als Biokatalysatoren. Für ausgewählte Anwendungen liegen Abschätzungen zur Einsparung an Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen vor. Ein Beispiel hierfür ist die Herstellung des Vitamins B<sub>2</sub> als Lebensmittelzusatz. Durch die Umstellung fast der gesamten Fertigung auf ein biotechnolo-

gisches Verfahren innerhalb weniger Jahre konnten die Produktionskosten des Vitamins B<sub>2</sub> um zwei Fünftel und die CO<sub>2</sub>-Emissionen um ca. 33 % gesenkt werden /Perlitz 2007/.

Auch nach /Buttazzoni 2009/ besteht in einem intelligenten Einsatz der weißen Biotechnologie ein signifikantes weltweites Potenzial um Treibhausgase einzusparen. Eine Zusammenfassung der Abschätzungen ist in **Tabelle 3.2** dargestellt. Ausgewählte Beispiele fasst **Tabelle A.3** zusammen.

**Tabelle 3.2:** Potenzial zur weltweiten Einsparung an Treibhausgasen durch den Einsatz der industriellen Biotechnologie - Zusammenfassung /Buttazzoni 2009/

Biotechnologische Anwendung	Geschätzte Reduktion an Treibhausgasen
Effizienzsteigerungen in der Lebensmittel- und in traditionellen Industrien	Lebensmittelindustrie: bis zu 139 Mio. t CO <sub>2</sub> -Emissionen Andere traditionelle Industrien: bis zu 65 Mio. t CO <sub>2</sub> -Emissionen
Biokraftstoffe	207 bis 1.024 Mio. t CO <sub>2</sub> -Emissionen
Biobasierte Materialproduktion	282 bis 668 Mio. t CO <sub>2</sub> -Emissionen
Kreislaufwirtschaft	376 bis 633 Mio. t CO <sub>2</sub> -Emissionen oder erneuerbarer Kohlenstoff gespeichert in Materialien
Gesamt	1.066 bis 2.528 Mio. t CO <sub>2</sub> -Emissionen

Im Rahmen eines EU-Forschungsprojektes werden die mittel und langfristigen Möglichkeiten der biotechnologischen Produktion von Chemikalien untersucht (siehe /BREW 2006/). Die Forscher kommen zu dem Ergebnis, dass die weiße Biotechnologie zahlreiche Möglichkeiten bietet, um bestehende und neue organische Bulkchemikalien<sup>11</sup> auf der Basis einer Vielzahl von Rohstoffen herzustellen. Gemäß der Studie ist die großtechnische biotechnologische Herstellung von Chemikalien eine technische Herausforderung, sie bietet jedoch eine Bandbreite an interessanten zukünftigen Optionen und scheint in längerer Sicht umsetzbar. Dabei sehen die Autoren eine mögliche Umsetzung primär als wirtschaftliche Herausforderung an, während die beträchtlichen Möglichkeiten der weißen Biotechnologie für die chemische Industrie die Reduzierung des nicht-erneuerbaren Energieverbrauchs, der Treibhausgasemissionen und den damit verbundenen Umwelteinflüssen darstellen. Im Rahmen von Szenarienanalysen berechnen die Autoren, dass der absolute nicht-erneuerbare Energieverbrauch für die Herstellung von ausgewählten Chemikalien in Europa (EU-25) bis zum Jahr 2050 in einem „Low“ Szenario um 7 bis 10 % reduziert werden kann. Für ein „Medium“ bzw. „High“ Szenario liegen die möglichen Einsparungen bei 20 bis 30 % bzw. 39 bis 67 %. Diese Energieeinsparungen sind mit substantziellen makroökonomischen Einsparungen in der Größenordnung von 6,7 bis 74,8 Milliarden € („Medium“ bzw. „High“) bei geringen zusätzlichen Kosten verbunden /BREW 2006/.

/Hermann et al. 2007/ untersuchen bestehende und zukünftige biotechnologische Verfahren, um 15 Bulkchemikalien herzustellen. Dabei lässt sich feststellen, dass die Produktion von Bulkchemikalien aus Biomasse einen signifikanten Beitrag zur Verringerung der Aus-

<sup>11</sup> Bulkchemikalien oder Bulkprodukte sind Grundchemikalien, die in Mengen von mehr als 10.000 Tonnen pro Jahr hergestellt werden.



wirkungen des Klimawandels als auch der Abhängigkeit von fossilen Energien leisten kann. Nach /Hermann et al. 2007/ stellt der Einsatz von Biomasse eine Schlüsselstrategie für eine nachhaltige Entwicklung der chemischen Industrie dar. Das Ziel der Untersuchungen ist die Analyse der Umweltwirkungen bei der Herstellung von Bulkchemikalien aus Biomasse durch Verfahren der industriellen Biotechnologie nach bestehendem und zukünftigem (2030) technischem Stand im Vergleich zu petrochemisch hergestellten Bulkchemikalien. Es handelt sich dabei um eine sogenannte Cradle-to grave<sup>12</sup> Betrachtung, bei der die Gebrauchsphase nicht betrachtet wird. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass die Umweltauswirkungen der untersuchten Prozesse in großem Umfang von der Produktivität, dem Ertrag und den Konzentrationen im Fermentationsprozess abhängen. Die größten relativen Einsparungen können bei der biotechnologischen Herstellung von Ethanol, Butanol und Ethylen erreicht werden. Die geringsten Einsparungen weisen die Herstellung von Essigsäure und Polytrimethylenterephthalat (PTT) auf Basis nachwachsender Rohstoffe auf. Insgesamt betrachtet, beträgt die mögliche Differenz an Treibhausgasemissionen zwischen dem Mittelwert und dem besten Fall 7 bis 20 %. Durchschnittlich sind die möglichen Einsparungen unter der Annahme von zukünftigen biotechnologischen Verfahren im Vergleich zum bestehenden Stand um 25 bis 35 % größer.

Dies zeigt, dass biotechnologische Verfahren zur Nutzung von Biomasse bei der Herstellung von Bulkchemikalien zukünftig eine noch viel bedeutendere Rolle zur Einsparung von Treibhausgasemissionen einnehmen und ihre Vorteile gegenüber petrochemischen Herstellungsverfahren noch deutlich ausbauen können. Mögliche bestehende und zukünftige Einsparungen an weltweiten Treibhausgasemissionen für ausgewählte Beispiele sind **Tabelle A.4** zusammengefasst. Insgesamt kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass bei der Herstellung der betrachteten 15 Bulkchemikalien Einsparungen an weltweiten Treibhausgasemissionen von 397.960 kt CO<sub>2</sub>/Jahr und zukünftig 511.780 kt CO<sub>2</sub>/Jahr möglich sind. Es wird deutlich, dass es bereits mit bestehenden biotechnologischen Verfahren klare Vorteile bei der Herstellung von Bulkchemikalien im Vergleich zu petrochemischen Prozessen gibt und durch verbesserte Fermentationsprozesse und Optimierungen im sogenannten „downstream processing“ sind zusätzliche substanzielle Einsparungen möglich. Als Ausgangsmaterial ist Zuckerrohr der Nutzung von Getreide oder ligninhaltiger Biomasse vorzuziehen. Die Produkte mit den höchsten Einsparungen sind Acrylsäure, Butanol (aus dem ABE-Prozess), Ethanol, Ethylen, PDO<sup>13</sup> und PHA<sup>14</sup> /Hermann et al. 2007/.

Ähnlich wie /OECD 2001/ untersuchen /Hoppenheidt et al. 2005/ die unterschiedlichen Umweltauswirkungen durch den Einsatz von biotechnologischen Anwendungen und Produkten im Vergleich zu konventionell hergestellten Produkten bzw. Anwendungen. Es wurden zwei Herstellungsverfahren ausgewählt, die einen ökobilanziellen Vergleich einer biotechnischen und einer chemisch-technischen Herstellungsvariante für das gleiche Produkt ermöglichen. Des Weiteren werden drei Prozesse untersucht, mit denen funktionsanaloge

---

<sup>12</sup> von der Wiege bis zur Bahre

<sup>13</sup> Ersatz für 1,3-Propandiol

<sup>14</sup> PHA Polyhydroxyalkanoate

Produkte einerseits auf biotechnischem und andererseits auf chemisch-technischem Weg hergestellt werden können. Anschließend werden die aus der Nutzung der Produktvarianten resultierenden Umweltbelastungen mit Hilfe von ökobilanziellen Vergleichen ausgewertet.

Für die Betrachtung der Herstellungsverfahren wird die Produktion von Vitamin B<sub>2</sub> sowie die beiden Verfahrensschritte Weichen und Äschern bei der Lederherstellung ausgewählt. Bei der Vitamin B<sub>2</sub> Herstellung werden zwei unterschiedliche biotechnologische Verfahren betrachtet. Einerseits das seit 2000 eingesetzte Verfahren der Firma DSM Nutritional Products (DSM) und ein seit 1990 eingesetztes Verfahren des Unternehmens BASF (BASF). Beim DSM Verfahren dient als funktionelle Einheit die Produktion von 1000 kg Vitamin B<sub>2</sub> (Reinheit 96 %) sowie der nachfolgenden Weiterverarbeitung von 19 Gew.% zu 167 kg Vitamin B<sub>2</sub> (Reinheit 98 %). Der Chemisch-technische Prozess nutzt einen mehrstufigen Syntheseprozess, wohingegen der biotechnologische Prozess eine einstufige Fermentation einsetzt. Für den chemischen Prozess werden sowohl nachwachsende Rohstoffe als auch verschiedene umweltrelevante Chemikalien verwendet. Der biotechnologische Prozess nutzt neben nachwachsenden Rohstoffen nur geringe Mengen an chemischen Hilfsmitteln mit geringer Umweltrelevanz. Die dabei jedoch im Vergleich großen anfallenden Abfallbiomassen können biologisch verwertet werden und dadurch entsteht kein negativer Einfluss auf die Gesamtbilanz.

Die Ergebnisse der Wirkungsgradabschätzung sind in **Tabelle A.5** im Anhang dargestellt. Der biotechnologische Prozess weist bei den aggregierten Wirkungsgradkategorien kumulierter Energieaufwand (KEA Ressourcenbeanspruchung), Treibhaus-, Versauerungs-, terrestrisches Eutrophierungs- und Ozonbildungspotenzial deutliche umweltentlastende Wirkungen auf. Allerdings ist das aquatische Eutrophierungspotenzial beim biotechnologischen Prozess höher. Hinsichtlich des Energiebedarfs lässt sich feststellen, dass dieser beim biotechnologischen Prozess um ca. 34 % niedriger ist, als beim vergleichbaren chemisch-technischen Prozess. Hinsichtlich den Emissionen an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten ermöglicht der biotechnische Prozess eine Einsparung um 25 % /Hoppenheidt et al. 2005/. Für den BASF Herstellungsprozess kommt als funktionelle Einheit die Produktion von 1000 kg Vitamin B<sub>2</sub> zum Einsatz. Auch hier zeigt sich (vgl. **Tabelle A.6**), dass der biotechnologische Prozess bei den Wirkungsgradkategorien KEA, Treibhaus- Versauerungs-, terrestrisches Eutrophierungs- und Ozonbildungspotenzial Umweltentlastungspotenziale aufweist. Das aquatische Eutrophierungspotenzial fällt jedoch auch hier höher aus /Hoppenheidt et al. 2005/.

Auch nach /BMBF 2007/ können im biotechnologischen Verfahren der Vitamin B<sub>2</sub>-Produktion gegenüber dem chemischen Verfahren Verringerungen der Umweltbelastungen um 40 % erreicht werden. So können die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 30 %, der Stoffverbrauch um 60 % und die entstehenden Abfälle um 95 % reduziert werden.

Als zweiter Herstellungsprozess wird von /Hoppenheidt et al. 2005/ aus dem Bereich der Lederbearbeitung die beiden Teilschritte Weichen<sup>15</sup> und Äschern<sup>16</sup> untersucht. Als funk-

---

<sup>15</sup> Die Weiche hat die Aufgabe, die Rohhaut von anhaftenden Verunreinigungen zu befreien, Konservierungsmittel zu entfernen und den Quellzustand wie am Körper eines lebenden Tieres herzustellen

<sup>16</sup> Beim Äschern werden die Häute enthaart und die Faserstruktur der Haut aufgeschlossen

tionelle Einheit wird 1.000 kg Leder als Produkt des gesamten Gerbprozesses gewählt, was dem Einsatz von 4.167 kg gesalzener Rohhaut (Salzgewicht) entspricht. Die Ergebnisse sind in **Tabelle A.7** dargestellt. Der Prozess des enzymatischen Weichen/Äschern weist gegenüber dem chemischen Prozess in allen aggregierten Wirkungskategorien Vorteile bei den Umweltauswirkungen auf. Beim Ozonbildungspotenzial sind die Unterschiede vernachlässigbar /Hoppenheidt et al. 2005/. Der Vergleich der biotechnischen und chemischen Lederherstellung zeigt, dass der Energiebedarf für das Weichen und Äschern zur Herstellung von 1.000 kg Leder bei der biotechnischen Verfahrensweise um ca. 15 % niedriger ist als beim chemisch-technischen Herstellungsverfahren. Die Emissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten liegen bei der biotechnischen Lederherstellung um ca. 20 % unter den Emissionen der chemisch-technischen Bearbeitungsweise /Hoppenheidt et al. 2005/.

Bei den von /Hoppenheidt et al. 2005/ ausgewählten Produkten, die im Rahmen der Studie untersucht werden, handelt es sich um die Tierproduktion unter Einsatz von Probiotika und Seltenen Erden, um den Einsatz von Enzymen in Vollwaschmitteln und um den Vergleich von Loos-fill-Packmittel aus EPS<sup>17</sup> und Stärke. Als Basis für die Auswertung der Umweltbelastungen bei der Tierproduktion verwenden /Hoppenheidt et al. 2005/ die frühe Mastphase von Schweinen und als funktionelle Einheit wurde die Lebensmassezunahme der Tiere sowie die weiteren Mastleistungsparameter Futtermittelverbrauch bzw. Futtermittelverwertung verwendet. Verglichen werden der Einsatz eines Futtermittels ohne Zugabe von Leistungsförderern (Nullvariante), eines Futtermittels mit Zugabe eines biotechnisch (fermentativ) hergestellten Probiotikums und ein Futtermittel mit der Zugabe eines chemisch-technisch hergestellten Seltenen-Erden-Produktes (vgl. **Tabelle A.8**). Die Ergebnisse der unterschiedlichen Szenarien weisen bei allen betrachteten Wirkungskategorien sehr geringe Unterschiede auf. Im Vergleich zur Nullvariante weist der Einsatz des biotechnologisch hergestellten Zusatzes in allen Wirkungskategorien umweltentlastende Potenziale auf. Gegenüber dem chemisch-technischen Futterzusatz weist der biotechnologisch hergestellte Zusatz beim KEA relevante Entlastungspotenziale auf. Bei der Betrachtung des Treibhaus-, Versauerungs-, Eutrophierungs- und Ozonbildungspotenzials ist jedoch die Nutzung des Seltenen-Erden-Produktes günstiger zu bewerten /Hoppenheidt et al. 2005/.

Beim Einsatz von Enzymen in Vollwaschmitteln werden bei /Hoppenheidt et al. 2005/ zwei Szenarien definiert. Beim sog. traditionellen Waschmittel wird ein enzymfreies und beim modernen Waschmittel ein enzymhaltiges Waschmittel verwendet. Für die Waschmittel kommen Referenzwaschmittel nach DIN 60456 zum Einsatz. Als Resultat der unterschiedlichen Inhaltsstoffe und der speziellen Wirkung der Enzyme werden unterschiedliche Dosierungen und Waschttemperaturen angesetzt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle A.9** zusammengefasst. Es zeigt sich, dass durch den Ersatz von konventionellen Waschmitteln zum Teil deutliche Umweltentlastungspotenziale für alle betrachteten Wirkungskategorien ermöglicht werden. Zu den Umweltentlastungen tragen auch ein geringeres notwendiges Temperaturniveau als auch die Substitution der Waschmittelposphate bei. Des Weiteren werden der Energiebedarf und die Emissionen an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten im Rahmen einer Ökobilanz zu „traditionel-

---

<sup>17</sup> EPS Polystyrol, expandierbar



len“ Waschmitteln und zu „modernen“ Waschmitteln mit Enzymeinsatz ermittelt. Für einen Waschgang mit 5 kg Schmutzwäsche ist der Energiebedarf beim Einsatz des „traditionellen“ Waschmittels um ca. 91 % höher als beim „modernen“ Waschmittel. Bei den Emissionen an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten führt der Einsatz des „traditionellen“ Waschmittels zu einer Erhöhung um ca. 107 % im Vergleich zum „modernen“ Waschmittel auf Basis von Enzymen /Hoppenheidt et al. 2005/.

Für den Vergleich des Ersatzes von Kunststoffen aus fossilen Rohstoffen durch Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen werden vier EPS- und Stärke Szenarien anhand der Bilanzierungsergebnisse miteinander verglichen. Als funktionelle Einheit der Ökobilanz wurde ein (Füll-)Volumen von 100 m<sup>3</sup> Loose-Fill-Packmittel gewählt. Es lässt sich als Ergebnis feststellen, dass, obwohl die Szenarien deutliche Unterschiede hinsichtlich der Umweltauswirkungen aufweisen, sich weder für die Stärke- noch für die Polystyrol-Verwendung grundsätzliche Vorteile ergeben, wenn die vollständigen Ergebnisse der Ökobilanz in die Bewertung mit einbezogen werden. Für die Ergebnisse entscheidend ist vor allem die konkrete Ausgestaltung der Materialbereitstellung, die Entsorgung und der damit verbundene Zusatznutzen bzw. die davon abgeleitenden Gutschriften. Spezifische Anwendungsmerkmale, wie die Tatsache, dass Stärke-Loose-Fill-Packmittel bei gleichem Volumen dreimal so viel wiegen wie EPS-Loose-Fill-Packmittel, haben großen Einfluss auf die Ergebnisse. Es kann festgestellt werden, dass die Stärke-Szenarien nur dann gleich gute Ergebnisse ergeben wie die optimierten EPS-Szenarien, wenn die Packmittel nach Gebrauch energetisch, d. h. Vergärung mit Biogasnutzung oder Verbrennung mit hohem Wirkungsgrad, verwertet werden. Zusätzliche Verbesserungen können durch einen extensiven Anbau, die Wahl einer Stärkepflanze mit hoher flächenbezogener Stärkeausbeute und einer optimierten Stärkeproduktion erreicht werden. Die Bereitstellung der Stärke-Masse benötigt zwar erheblich weniger fossile Energieträger als die Polystyrol-Bereitstellung, aufgrund der dreifach höheren Schüttdichte der Stärke-loose-fill-Packmittel sowie dem Zusatz eines aus fossilen Rohstoffen hergestellten Additivs werden diese Vorteile deutlich relativiert. Sehr positive Auswirkungen auf die Ergebnisse der Stärkeszenarien lassen sich jedoch durch eine Reduzierung der Schüttdichte erreichen. Darüber hinaus könnten erhebliche Verbesserungen erzielt werden, wenn eine weitreichende Nutzung der Biomassen, aus denen die Stärke gewonnen wird, realisiert werden könnte /Hoppenheidt et al. 2005/.

Im Bereich der Textilindustrie ermöglicht der Einsatz von Enzymen (Biostoning durch Cellulasen) bei der Bearbeitung von Jeans mit dem Stonewashed-Effekt im Vergleich zum herkömmlichen Verfahren eine Entlastung der Umwelt. Bezogen auf Wasser, Luft und Abfall können die umweltrelevanten Kosten um 54 % gesenkt werden /BMBF 2007/.

Für zwei Behandlungsverfahren in der Textilindustrie, das sog. „Scouring“ (Abkochen der Baumwolle um Faserbegleitstoffe zu entfernen) und die Entfernung von Bleichmittelresten werden von /Nielsen et al. 2009/ Lebenszyklusanalysen (LCA) durchgeführt, welche sich explizit auf zwei Produktionsstandorte beziehen. Aufgrund einer von den Autoren durchgeführten Sensitivitätsanalyse lassen sich die Ergebnisse im Prinzip jedoch auch auf andere Produktionsstandorte anwenden. Für den Vergleich des konventionellen Scourings und dem sog. Bioscouring wird als Bezugsgröße die Herstellung von 1 t Garn verwendet. Die

möglichen Einsparungen sind in **Tabelle A.10** zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen, dass der Dampfverbrauch um über 80 %, der Stromverbrauch um 50 % und der Wasserverbrauch um 2/3 gesenkt werden können. Darüber hinaus ist das biotechnologische Verfahren weniger aggressiv, wodurch 25 kg Garn eingespart werden kann, welches beim konventionellen Verfahren zerstört wird. Die Ergebnisse der LCA sind in **Tabelle A.11** dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass der Ressourcenverbrauch und die Umweltwirkungen durch die zusätzliche Herstellung des Enzyms für alle betrachteten Wirkungskategorien sehr gering ausfallen und die damit verbundenen Einsparungen deutlich größer sind. Um allgemein gültige Aussagen treffen zu können, führt /Nielsen et al. 2009/ basierend auf den LCA Untersuchungen, die auf zwei definierten Produktionsstandorten beruhen, eine Sensitivitätsuntersuchung durch. Die Haupteinflussfaktoren zur CO<sub>2</sub>-Einsparung sind die Dampf- und Strombereitstellung am Produktionsstandort. Die Ergebnisse der Analyse, welche auch eine zusätzlich eingesetzte Wärmerückgewinnung umfasst, zeigt jedoch, dass sich die möglichen Einsparungen durch das biotechnologische Verfahren teilweise sehr stark reduzieren, die Vorteile jedoch in jeden betrachteten Fall vorhanden bleiben.

Im Rahmen der Studie wird auch eine LCA von zwei Verfahren zur Bleichmittelresteentfernung durchgeführt. Als Bezugsgröße dient auch hier die Reinigung von 1 t Garn. Die resultierenden Einsparungen durch den Einsatz eines Enzyms sind in **Tabelle A.12** zusammengefasst. Neben dem notwendigen Enzym ist beim biotechnologischen Verfahren ein erhöhter Einsatz von Essigsäure zur pH-Wert Anpassung notwendig. Durch die mögliche Reduzierung der Prozesstemperatur, der Prozessdauer und der Anzahl der notwendigen Waschvorgänge kommt es zu deutlichen Einsparungen bei Dampf, Strom und Wasser. Die LCA-Ergebnisse der beiden Verfahren sind in **Tabelle A.13** dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass es durch die zusätzliche Produktion des Enzyms insgesamt, mit Ausnahme des Landbedarfs, zu deutlichen Einsparung durch das biotechnologische Verfahren kommen kann. Auch in diesem Fall wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um allgemeingültige Aussagen ableiten zu können, da die LCA Ergebnisse die standortspezifischen Gegebenheiten der Produktion beinhalten. Es zeigt sich auch hier, dass die Bereitstellung von Dampf, Wasser und mögliche Wärmerückgewinnungsmaßnahmen deutliche Einflüsse auf die Ergebnisse aufweisen. Es kann jedoch insgesamt festgestellt werden, dass in allen betrachteten Fällen das biotechnologische Verfahren zur Entfernung von Bleichmittelresten aus Umweltgesichtspunkten Vorteile aufweist /Nielsen et al. 2009/.

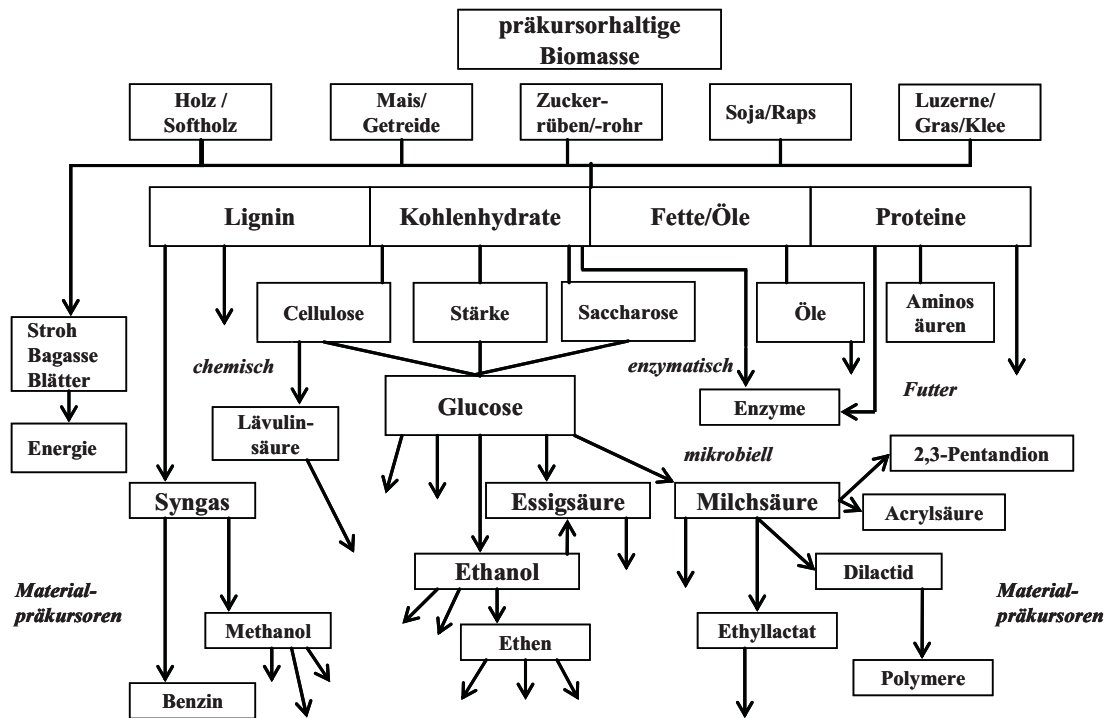
Auch im Bereich der Zellstoff- und Papierindustrie können durch neue Produktionsverfahren auf Basis der Biotechnologie die Energiekosten um bis zu 33 % gesenkt werden. Im Bereich der Textil- und Lederindustrie kann bei der Reinigung der Fasern eine Kostenreduktion von 20 % erreicht werden und bei der Reinigung von Tierhäuten ist eine Reduktion des Wasser- und Energieverbrauchs um 20 % möglich /Perlitz 2007/.

Auch bei den vorhandenen Analysen und Studien zu den möglichen Auswirkungen der Biotechnologie kann festgestellt werden, dass allgemeine Abschätzungen sowie detaillierte Analysen einzelner biotechnologischer Prozesse und Anwendungen vorliegen, eine integrierte und umfassende Betrachtung und Analyse der Auswirkungen der Biotechnologie auf die Energiewirtschaft bisher jedoch nicht durchgeführt wurde.

**Bioraffinerien**

„Eine Bioraffinerie ist ein komplexes, integriertes System von Prozessen und Anlagen, in welchem Biomasse in eine Vielzahl von Produkten umgewandelt wird oder bestimmte Verbindungen aus dieser isoliert werden. Eine Bioraffinerie ist an das Konzept einer petrochemischen Raffinerie angelehnt. Bioraffineriekonzepte werden auf das Ziel hin ausgelegt, die Effizienz und Logik der chemischen und stoffwandelnden Folgeindustrie sowie die bewährte Verknüpfung dieser mit Zwischen- und Endproduzenten auf nachwachsende Rohstoffe zu übertragen.“ (nach /Kamm et al. 2006/ in /Oertel 2007/).

Als wesentlicher Unterschied zu der Verarbeitung von Erdöl, welches extraktiv aus der Natur gewonnen wird, gilt, dass Biomasse ein Produkt eines zumeist landwirtschaftlichen Stoffwandlungsprozesses darstellt und die Syntheseverleistung der Natur darin bereits enthalten ist. Im Verlauf der Herstellung kann Biomasse modifiziert werden, so dass sie der nachfolgenden Verarbeitung angepasst ist und vorab bestimmte Hauptprodukte gebildet werden können. Dafür wird der Begriff „precursors, Präkursoren“ verwendet und „Bioraffinerien stehen für die Gesamtheit der Technologien zur Verarbeitung der nachwachsenden Rohstoffe bis hin zu industriellen Zwischen- und Endprodukten“ /Oertel 2007/. **Abbildung 3.2** stellt ein Grobschema für eine Bioraffinerie dar.



**Abbildung 3.2:** Grobschema einer Bioraffinerie für präkursorenhaltige Biomasse/Oertel 2007/

Als erster Schritt erfolgt eine physikalische Stofftrennung der präkursorhaltigen Biomasse. Anschließend werden die Haupt- und Nebenprodukte mit mikrobiologischen und/oder chemischen Stoffwandlungsreaktionen bearbeitet. Durch eine weitere Konversion oder durch die Bearbeitung in einer konventionellen Raffinerie können die Folgeprodukte weiter bearbeitet werden.

In der Literatur werden drei unterschiedliche Arten von Bioraffinerien beschrieben:

- Phase I Bioraffinerie
- Phase II Bioraffinerie
- Phase III Bioraffinerie

Nach /Clark et al. 2008/ unterscheiden sich diese drei Phasen der Einteilung von Bioraffinerien wie folgt. Unter Phase I Bioraffinerien werden Konzepte verstanden, die einen Rohstoff verwenden, der in einem festen Prozessverfahren zu einem spezifischen (Haupt-)Produkt umgewandelt wird. Diese Art von Bioraffinerien ist bereits im Einsatz und hat gezeigt, dass sie wirtschaftlich betrieben werden können. In Europa fallen in diese Kategorie viele Bioraffinerien, die Biodiesel oder Bioethanol erzeugen. Ein weiteres Beispiel sind Zellstofffabriken.

Phase II Bioraffinerien können, ähnlich wie Phase I Bioraffinerien, nur einen Rohstoff verarbeiten. Sie sind jedoch in der Lage, unterschiedliche Endprodukte, z. B. Chemikalien und Energie, herzustellen. Beispiele hierfür sind Stärkefabriken oder Cellulosefabriken. Es bestehen auch Anlagen, die aus Getreidestärke eine Vielzahl an chemischen Produkten wie z. B. biologisch abbaubares Polyester und Thermoplaste herstellen. Bioraffinerien der Phasen I und II entsprechen dem Stand der Technik und produzieren im industriellen Maßstab. Eine Bioraffinerie aus der ersten Phase kann zu einer Phase II Bioraffinerie umgewandelt werden, wenn es gelingt, die Vielzahl der Nebenprodukte und -prozesspfade aufzuwerten. So kann z. B. eine Anlage zur Herstellung von Biodiesel in eine Phase II Bioraffinerie umgewandelt werden, wenn Technologien zur Verfügung stehen, die Biodiesel und Glycerin (Rohglycerin) in wertvolle Energie oder andere chemische Produkte umwandeln können.

Unter Phase III Bioraffinerien versteht man fortschrittliche und hochentwickelte Typen von Bioraffinerien. Diese sind nicht nur in der Lage eine Vielzahl von chemischen Produkten und Energie herzustellen (wie Phase II Bioraffinerien), sondern sie können auch unterschiedliche Rohstoffe und Herstellungsverfahren an- und verwenden. Durch die Tatsache, dass sie eine Vielzahl von Rohstoffen verarbeiten können, sind sie gegenüber Preis und Angebotsschwankungen eines Rohstoffes unabhängiger und dadurch auch flexibler /Clark et al. 2008, Gent et al. 2010/. Nach /Clark et al. 2008/ und /Oertel 2007/ können Phase III Bioraffinerien in vier unterschiedliche Konzepte unterschieden:

- Grüne Bioraffinerie (GBR)
- Lignocellulose-Feedstock (LCF) Bioraffinerie
- Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie (Getreidebioraffinerie)
- Zwei-Plattformen-Konzept

/Grimm et al. 2011/ definieren zusätzlich zwei weitere Konzepte für Phase III Bioraffinerien:

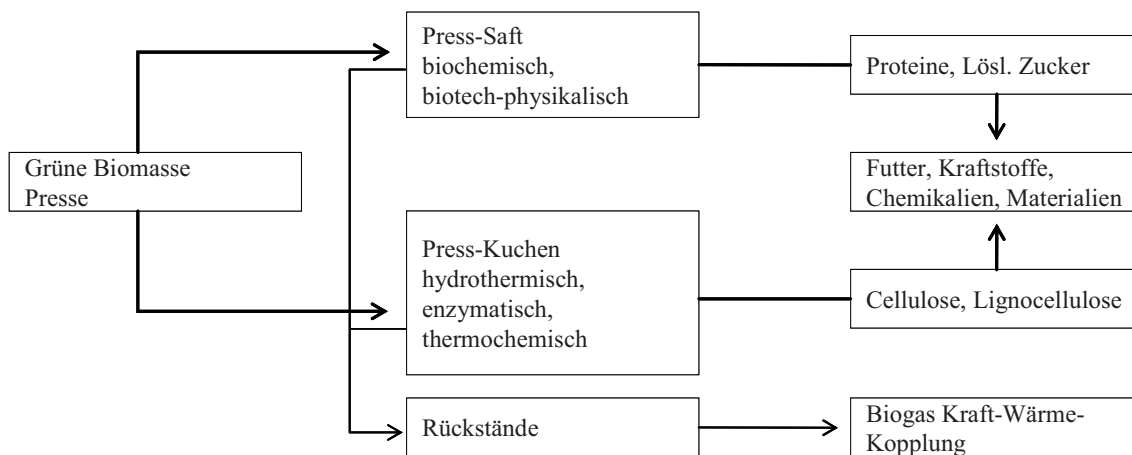
- Thermochemische Bioraffinerie
- Marine Bioraffinerie

In der Roadmap Bioraffinerien (siehe /BMELV et al. 2012/) werden folgende Konzepte beschrieben:

- Zucker-Bioraffinerie bzw. Stärke-Bioraffinerie
- Pflanzenöl-Bioraffinerie bzw. Algenlipid-Bioraffinerie
- Lignocellulose (Cellulose, Hemicellulose und Lignin)-Bioraffinerie bzw. Grüne Bioraffinerie
- Synthesegas-Bioraffinerie
- Biogas-Bioraffinerie

### Grüne Bioraffinerie

In einer grünen Bioraffinerie werden aus grünen (naturfeuchten) Rohstoffen (z. B. Gras, Luzerne, Klee, unreifes Getreide) eine Vielzahl von Produkten wie z. B. Futtermittel, Proteine, Brennstoffe, Chemikalien und über Fermentation auch mikrobiologische Produkte wie z. B. organische Säuren, Aminosäuren, Ethanol oder Biogas hergestellt (vgl. **Abbildung 3.3**).



**Abbildung 3.3:** Schematische Darstellung einer grünen Bioraffinerie (eigene Darstellung nach /Kamm 2008/)

In der ersten Stufe, der Nassfraktionierung, wird die grüne Biomasse in einen faserreichen Presskuchen (enthält Cellulose, Stärke, Farbstoffe sowie andere Organika) und in den nährstoffreichen Presssaft (enthält Kohlenhydrate, Proteine, Aminosäuren, organische Säuren, Farbstoffe, Enzyme sowie weitere organische Substanzen und Mineralien) getrennt. Die im Grüngut enthaltenen und leicht fermentierbaren Kohlenhydrate können durch biotechnisch-chemische Basistechnologien (wie z. B. zur Erzeugung von Milchsäure oder Lysin) verarbeitet werden. Als Schwachpunkt wird beim grünen Bioraffinerie-Konzept die Notwendigkeit einer schnellen Primärverarbeitung des Grüngutes angesehen. Der grüne Presssaft kann vorzugsweise zur Produktion von Milchsäure, Aminosäuren, Ethanol oder Proteinen eingesetzt werden. Zu den Verwendungsmöglichkeiten des Presskuchens zählen die Futtermittelherstellung oder er kann als Ausgangsmaterial zur Herstellung von Chemikalien (z. B. Lävulinsäure) Verwendung finden. Auch die Konversion zu Synthesegas und Kohlenwasserstoffe stellt eine Verwertungsmöglichkeit des Presskuchens dar.

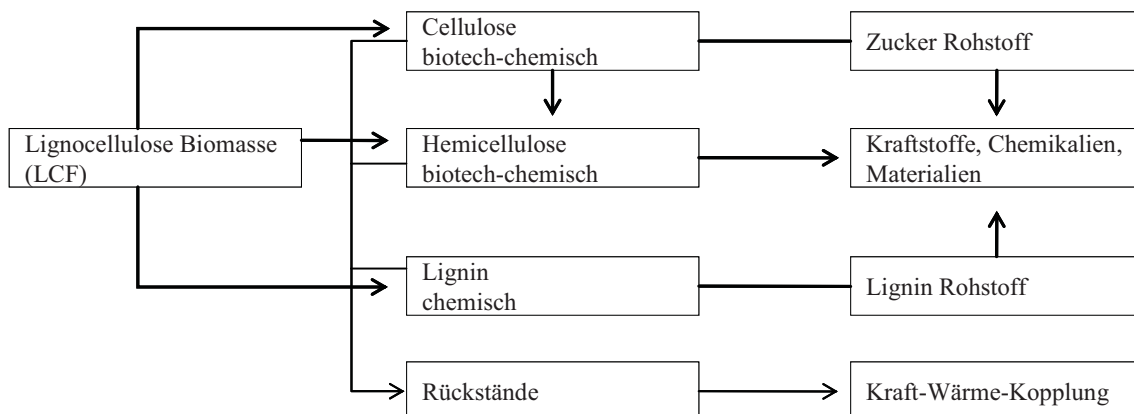
### Lignocellulose-Feedstock (LCF) Bioraffinerie

Beim LCF-Bioraffinerie-Konzept werden aus Stroh, Gräsern, Waldrestholz oder cellulosehaltigen Abfällen (z. B. Papier) Produkte auf drei unterschiedlichen Prozesslinien erzeugt (vgl. **Abbildung 3.4**):

**Abbildung 3.4):**

- Lignin-Produktionslinie zur Herstellung von Klebstoffen, Bindemittel, Brennstoffen oder Chemieprodukten
- Hemicellulose-Produktionslinie zur Herstellung von Verdickungsmittel, Folgeprodukte der Xylose wie z. B. Furfural oder Nylon
- Cellulose-Produktionslinie zur Herstellung von Ethanol, Milchsäure oder Lävulinsäure durch Fermentation der Cellulose

Nach /Kamm et al. 2006/ in /Oertel 2007/ wird dem LCF-Bioraffineriekonzept das größte Potenzial zur Durchsetzung zugeordnet. Diese Einschätzung basiert auf der Tatsache, dass eine breit verfügbare Rohstoffbasis zum Einsatz kommen kann, da mit günstigen Rohstoffpreisen und einer guten Marktposition potenzieller Konversionsprodukte gerechnet wird. Als Schwachpunkt wird vor allem die Lignin-Verwertung angesehen. Diese erfolgt entweder als Brenn-, Kleb- oder Füllstoff. Zusätzlich enthält das Ligningerüst jedoch erhebliche Mengen an Monoaromen, die zusätzlich genutzt werden könnten, wenn dafür kostengünstige Abtrennverfahren vorhanden wären. Möglichkeiten zur zukünftigen verbesserten Nutzung von Lignin werden in /Bozell et al. 2007/ detailliert untersucht.



**Abbildung 3.4:** Schematische Darstellung einer LCF-Bioraffinerie (eigene Darstellung nach /Kamm 2008/)

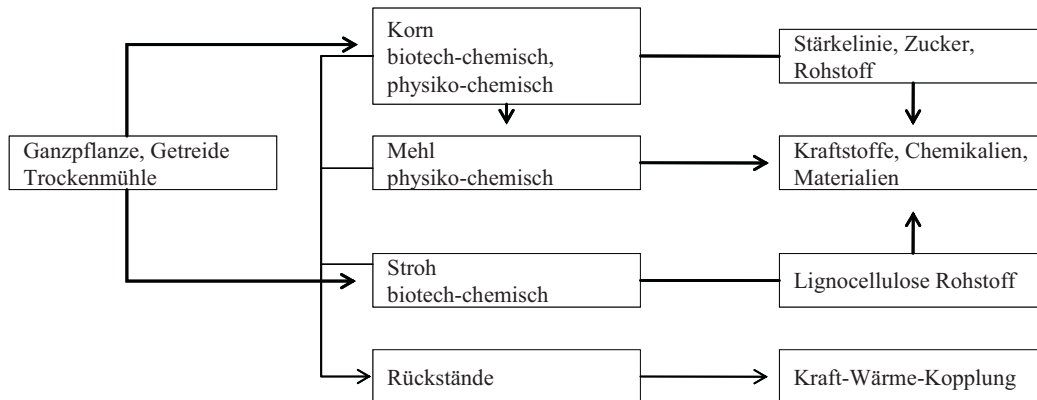
### Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie (Getreidebioraffinerie)

Bei der Getreidebioraffinerie werden als Rohmaterialien Roggen, Weizen, Triticale und Mais eingesetzt. Als erster Schritt erfolgt die mechanische Trennung des Stroh und des Getreidekorns (vgl. **Abbildung 3.5**). Nach dieser Trennung in der Trockenmühle kann die Strohfraktion analog zum LCF-Bioraffineriekonzept zu Lignin, Hemicellulose und Cellulose aufgeschlossen und weiterverarbeitet werden. Nach einer Vergasung des Stroh können jedoch auch Produkte wie Methanol oder Polyhydroxybutyrat (PHB) gewonnen und das Korn kann nach Vermahlung und anschließendem Aufschluss auch zu Klebstoff, Füllstoff bzw. Bindemittel verarbeitet werden. Darüber hinaus ist durch Extraktion der Stärke des Korns die Her-



stellung von Glucose oder Biokunststoffen möglich /Oertel 2007/. Die Rückstände der Getreide-Bioraffinerie können auch zur Kraft-Wärme-Kopplung genutzt werden /Kamm 2008/.

Als Alternative zur Trockenmühle können auch Nassmahlverfahren angewendet werden. Dadurch kann das Konzept um eine zusätzliche Produktlinie, die Herstellung von Ölen und Fettsäuren, erweitert werden. Als Vorteil der Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie wird der Erhalt der natürlich vorgeprägten Strukturen sowie Heteroatome angesehen und es können herkömmliche Basis- und Verarbeitungstechnologien eingesetzt werden /Oertel 2007/.



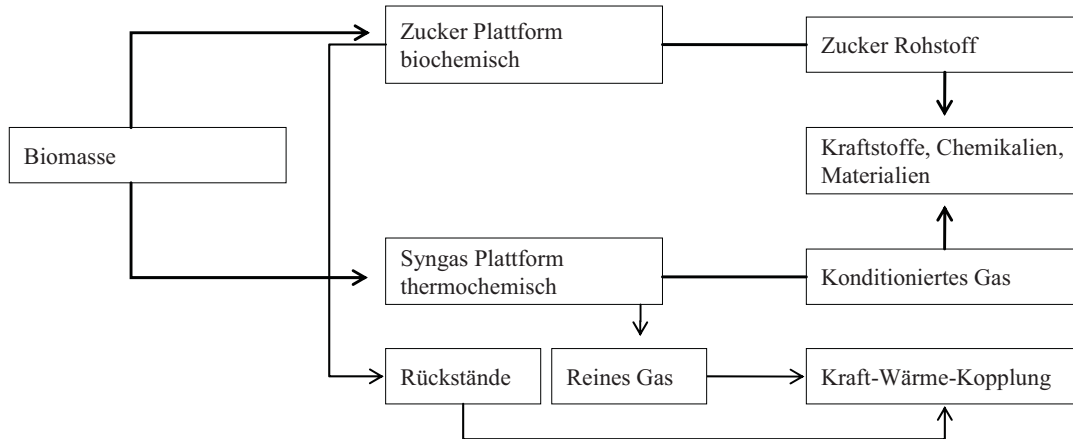
**Abbildung 3.5:** Schematische Darstellung einer Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie (eigene Darstellung nach /Kamm 2008/)

### Zwei-Plattformen-Konzept

Die Kombination von zwei Konzepten ist der Ansatz des Zwei-Plattformen-Konzepts (vgl. **Abbildung 3.6**). Hier wird die Erzeugung und Verarbeitung von Zucker und die Erzeugung von Synthesegas (Syngas) kombiniert. Die genutzten nachwachsenden Rohstoffe werden dabei auf zwei technische Stränge (Plattformen) aufgeteilt:

- Die Zucker-Plattform basiert auf biochemischen Konversionen. Durch Fraktionierung bzw. in Kombination mit Hydrolyseverfahren wird der benötigte Zucker aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen. Mit der Zucker-Plattform können eine Vielzahl von biobasierten Plattformchemikalien hergestellt werden.
- Die Syngas-Plattform besteht aus thermochemischen Konversionen. Im Fokus steht die Vergasung von Biomasse und Nebenprodukten aus den Konversionsprozessen. Zusätzlich laufen Prozesse der Hydrothermolyse, der Pyrolyse, der Thermolyse und der Verbrennung ab, die miteinander vernetzt werden können.

Nach /Oertel 2007/ scheint das Zwei-Plattformen-Konzept eine Vielzahl von Möglichkeiten zu bieten, um an bestehende Verfahren anzuknüpfen. Darüber hinaus ergibt sich bei diesem Konzept eine hohe Variabilität im Blick auf die Anpassung an verfügbare nachwachsende Rohstoffzusammensetzungen.



**Abbildung 3.6:** Schematische Darstellung des Zwei-Plattformen-Konzeptes (eigene Darstellung nach /Kamm 2008/)

/Kamm 2008/ stellt für die vier bisher beschriebenen Konzepte Vor- und Nachteile zusammen (vgl. **Tabelle 3.3**).

**Tabelle 3.3:** Vor- und Nachteile von Bioraffinerie-Konzepten /Kamm 2008/

Konzept	Vorteile	Nachteile
Grüne Bioraffinerie (GBR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– großer Biomasse-Ertrag/ha</li> <li>– gute Kopplung mit Agroproduktion</li> <li>– gutes biotech-chemisches Potential</li> <li>– „simple“ Basistechnologien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– schnelle Primärverarbeitung bzw. zu kontrollierende, da rohstoffverändernde Lagerung (Silage)</li> </ul>
Lignocellulose-Feedstock (LCF) Bioraffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>– berücksichtigt den Erhalt von der Natur vorgeprägten Strukturen und Strukturelementen</li> <li>– Erhalt der Heteroatome</li> <li>– billiger Rohstoff</li> <li>– große Produktvielfalt</li> <li>– ausgeprägt stammbaumfähige Raffinerie</li> </ul>	Entwicklungsbedarf: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Ligninverwertung</li> <li>– „saubere“ Primär-Raffination zu Cellulose, Hemicellulose und Lignin</li> </ul>
Getreide-Ganzpflanzen-Bioraffinerie (Getreidebioraffinerie)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– berücksichtigt den Erhalt von der Natur vorgeprägten Strukturen und Strukturelementen (Stärke, Cellulose)</li> <li>– Erhalt der Heteroatome</li> <li>– eingefahrene Basistechnologie und Verarbeitungslinien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– basiert im Wesentlichen auf „Ackerfrüchten“ → hohe Rohstoffkosten</li> </ul>
Zwei-Plattformen-Konzept	<ul style="list-style-type: none"> <li>– berücksichtigt Energie, Kraftstoffe und biobasierte Produkte</li> <li>– wenige großtechnische Basistechnologien nötig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Verwendet die Präkursoren Lignin (z. T. 30 %), Proteine (z. T. 20 %) und Öle nur als thermische / thermochemische Ressource</li> <li>– Hochtemperaturtechnologie</li> </ul>



### **Thermochemische Bioraffinerie**

In einer thermochemischen Bioraffinerie werden aus Biomasse Öle und Kokse hergestellt. Die dabei zum Einsatz kommenden Verfahren und Technologien wie z. B. die Flash-Pyrolyse zur Thermolyse sind noch unausgereift und befinden sich im Pilotstadium. Noch im Forschungsstadium befinden sich weitere Möglichkeiten der stofflichen Verwertung von Bio-koks und Bioölen /Grimm et al. 2011/.

### **Marine Bioraffinerie**

Eine marine Bioraffinerie verarbeitet mit den Verfahrensschritten des Aufschlusses, der Extraktion und der Aufreinigung von Wertstoffen Algenbiomasse. Je nach verwendeter Algenbiomasse unterscheidet sich die Umsetzung dieses Konzeptes. Für die nachhaltige Gewinnung der Algenbiomasse sind verschiedene Becken- und Reaktorkonzepte in der Testphase /Grimm et al. 2011/.

/Grimm et al. 2011/ stellen fest, dass sich die aktuellen Phase III Bioraffineriekonzepte fast ausschließlich im Forschungs- und Entwicklungsstadium befinden und nur teilweise erste Pilotanlagen existieren bzw. einzelne Prozesse wie z. B. die Herstellung von Palatinose durch immobilisierte Mikroorganismen, schon großtechnisch eingesetzt werden. Auch nach /Gent et al. 2010/ stehen Bioraffinerien, die aus verschiedenen Rohstoffen vielfältige Produkte erzeugen können, noch am Anfang der Entwicklung und benötigen für eine Weiterentwicklung Forschungsförderung entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Grundlagenforschung über die Prozess-, Technologie- und Produktentwicklung.

Eine Auswahl an bereits realisierten bzw. geplanten Demonstrations- und Pilotanlagen ist in Anlehnung an /Bundesregierung 2010, Grimm et al. 2012, Sternberg 2011/ nachfolgend dargestellt:

- Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis von Holz, Sachsen-Anhalt (im Aufbau)
- Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis von Stroh, Bayern (laufende Pilotanlage, geplante Demonstrationsanlage)
- Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis von Getreide, Sachsen-Anhalt (Weiterentwicklung einer bestehenden Bioethanolanlage zu einer integrierten Bioraffinerie)
- Synthesegas Bioraffinerie auf Basis von Holz, Sachsen (Demonstrationsanlage)
- Synthesegas Bioraffinerie auf Basis von Stroh, Baden-Württemberg (Pilotanlage)
- Grassaft/Grasfaser Bioraffinerie auf Basis von Gras, Hessen (Produktions- und Demonstrationsanlage)
- Grassaft/Grasfaser Bioraffinerie auf Basis von Gras, Brandenburg (in Planung)

In Europa werden, ähnlich wie in Deutschland, nur wenige Bioraffinerien kommerziell betrieben. Schwerpunkte liegen bei der Bioethanol- und Biodiesel-Herstellung in den Niederlanden, in Schweden, Belgien und in Frankreich. Weltweit nehmen die USA eine führende Rolle bei der Umsetzung und dem Bau von Bioraffinerie-Anlagen ein. Im Rahmen eines Programms des US Energieministeriums („Biomass-Programm“) sind 29 integrierte Bioraffine-

rien in Betrieb bzw. in der Planung. Der Schwerpunkt liegt dabei jedoch auf der Herstellung von biobasierten Kraftstoffen (28 von 29 Anlagen) /Grimm et al. 2011/.

Die zukünftige Nutzung von Bioraffinerien kann zusammengefasst als bedeutende umfassende Möglichkeit angesehen werden, die Auswirkungen bei der Herstellung von Produkten und die Erzeugung von Energie zukünftig effizienter und umweltfreundlicher zu gestalten. Auch /Grimm et al. 2011/ sehen gute Chancen für Deutschland im Bereich der Bioraffinerien, da es über große Entwicklungspotenziale im Bereich der Ganzpflanzen- und Grünen Bioraffinerien sowie bei den Lignocellulose-Bioraffinerien verfüge. Die Einführung von Phase III Bioraffinerien könne einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung der umweltbezogenen Ziele der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie durch CO<sub>2</sub>-Neutralität und nachhaltiger Ressourcennutzung leisten.

### 3.4 Energie- und Ressourcenverbrauch von Basisinnovationen

Neben den möglichen Potenzialen zur Energieeinsparung und CO<sub>2</sub>-Reduktion durch den Einsatz von neuen Innovationen wie der Nano- und Biotechnologie wird in diesem Kapitel auf den Energie- und Ressourcenverbrauch von Innovationen eingegangen. Zum Energie- und Ressourcenverbrauch nanotechnologischer Produkte bzw. Herstellungsverfahren liegen nur sehr wenige umfassende Studien und Untersuchungen vor. In /Haas et al. 2007/ erfolgt eine Bewertung von nanotechnologischen Herstellungsverfahren hinsichtlich der Kosten, Anwendungsreife und des benötigten Energieaufwands (vgl. **Tabelle 3.4**). Es zeigt sich, dass neben den Kosten auch der Energieaufwand bei einer Vielzahl von Herstellungsverfahren sehr hoch ist.

Darüber hinaus erfolgt in /Haas et al. 2007/ eine Bewertung von nanotechnologischen Anwendungsmöglichkeiten am Beispiel der Produktion (vgl. **Tabelle 3.5**). Dabei wird deutlich, dass trotz eines teilweise sehr hohen Energiebedarfs bei der Herstellung von Nanomaterialien nanotechnologische Anwendungen in vielen Fällen zur Steigerung der Energieeffizienz und der Nachhaltigkeit führen können (z. B. Lotuseffekt).

Bisherige Untersuchungen mit dem Ziel, die Umweltrelevanz z. B. von nanotechnologischen Anwendungen darzustellen, erfassen diese nach /Steinfeldt et al. 2010/ meist qualitativ. Im Fokus stehen dabei oft umwelttechnische Innovationen im engeren Sinne, sogenannte End-of-pipe Ansätze (siehe /Heubach et al. 2005, Luther et al. 2004, Paschen et al. 2004/). Nach /Steinfeldt et al. 2010/ sind quantifizierende Untersuchungen zu erwartbaren Umweltauswirkungen einzelner nanotechnologischer Produkte und Prozesse bisher die Ausnahme.

Da solche Untersuchungen den gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder einer Anwendung umfassen, sind dadurch auch konkrete Aussagen zum Energie- und Ressourcenverbrauch für ein entsprechendes Produkt möglich. Im Bereich der Nanotechnologie wird oft angemerkt, dass die Herstellung von Nanopartikeln bzw. nanotechnologische Herstellungsverfahren allgemein einen sehr hohen Energie- und Ressourcenverbrauch aufweisen. Ausgewählte Ökobilanzen zu Nanopartikeln bzw. nanotechnologischer Produktionsverfahren sind in **Tabelle 3.6** dargestellt.

**Tabelle 3.4:** Herstellungsverfahren für Nanobausteine und Bewertung der Kosten, der Anwendungsreife und des Energieverbrauchs /Haas et al. 2007/ (+: gering, ++: mittel, +++: hoch)

Verfahren	Nanopartikel	Nanofasern	Formkörper	Nanokomposit	Nanoschichten	Kosten	Anwendungsreife	Energieaufwand
<b>Top-Down-Herstellungsverfahren</b>								
Lithographieprozesse					■	++	+++	++
Hochenergiemahlen	■					+++	+++	+++
Extreme plastische Verformung	■		■			+++	++	+++
Elektrospinningprozesse		■				++	+	+
Elektrische Bogenentladung		■			■	++	++	++
Delaminieren von Tonen / Schichtsilikaten	■			■	■	++	+++	++
<b>Bottom-up-Herstellungsverfahren</b>								
Chemische Fällung	■					+	+++	+
Sol-Gel	■	■	■	■	■	++	++	+
Flammenreaktoren	■					++	+++	++
Elektrochemische Abscheidung / Galvanik	■			■	■	+	+++	++
Mikroemulsionsverfahren	■					+	+++	++
Sprühtrocknung	■					+	++	+++
Hydrothermalverfahren	■					++	+++	++
Gasphasensynthese (z. B. Chemical Vapour Deposition, CVD)	■				■	+++	++	+++

So kommen /Kushnir et al. 2008, Sandén et al. 2007/ zum Beispiel zu dem Ergebnis, dass die Herstellung von Kohlenstoffnanopartikeln für unterschiedliche Herstellungsverfahren mit sehr hohem Energiebedarf und einhergehend mit hohen Energiekosten verbunden ist. Durch den Einsatz von Kohlenstoffnanopartikeln in Produkten erhöht sich somit auch der Gesamtenergieverbrauch zur Herstellung dieses Folgeprodukts. Gerade in möglichen Anwendungen im Energiebereich kann der Einsatz von Nanopartikeln in Folgeproduktion bei der gesamtheitlichen Betrachtung jedoch durchaus auch zu Energieeinsparungen und der Steigerung der Energieeffizienz führen.

Bei den Untersuchungen lässt sich auch feststellen, dass der Energiebedarf für die Herstellung von Nanopartikeln zum Teil, je nach Verfahren, sehr großen Schwankungen unterworfen ist. E-Faktor-Analysen nach /Eckelman et al. 2008/ weisen zum Beispiel im Energieverbrauch beträchtliche Unterschiede auf. Auch Untersuchungen von /Osterwalder et al. 2006/ kommen zu ähnlichen Ergebnissen. Die Betrachtung von /Lekas 2005/ zum Energie- und Ressourcenverbrauch zur Herstellung von Kohlenstoffnanoröhren bezieht sich auf nur ein Herstellungsverfahren.

**Tabelle 3.5:** Bewertung ausgewählter Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie in der Produktion /Haas et al. 2007/

Verfahren	Effizienz	Langlebigkeit	Sicherheit	Kosten	Zeit	Nachhaltigkeit	Qualität
Passive Schichten mit niedriger Oberflächenenergie	■			■		■	
Aktive Schichten zur Oberflächenreinhaltung	■			■		■	
Lotuseffekt	■			■		■	
Antibakteriell		■	■	■		■	
Photokatalyse			■	■		■	
Korrosionsschutz		■		■	■		■
Verschleißverringern		■		■	■		
Thermische Schutzschichten		■	■	■			
Materialeinsparung (Lösungsmittel)	■			■		■	
Verbesserte Abwasserreinigung	■			■	■	■	■
Antistatik- und transparente leitfähige Schichten	■		■				
Elektromagnetische Abschirmung			■				
Antireflexbeschichtungen	■		■				
Antibeslagbeschichtungen			■				■
Geruchsabsorbierende / -zersetzende Schichten			■	■	■		
Brandschutz			■				
Wärme- und Schallisolation			■				■
Erhöhung der Dichtigkeit	■	■	■	■			■
Analyse und Qualitätssicherungsinstrumente	■		■				■
Genaueres Dosieren	■		■	■		■	■
Fälschungssichere Kennzeichnung von Produkten			■	■			■
Sensorik					■	■	■

**Tabelle 3.6:** Beispiele für Studien über den Energieverbrauch bei der Herstellung von Nanopartikeln /Steinfeldt et al. 2010/

Untersuchungsgegenstand	Methode	Referenz
Energieverbrauch von Kohlenstoffnanopartikel-Anwendungen	Energiebilanzierung	/Kushnir et al. 2008, Sandén et al. 2007/
Materialverbräuche verschiedener Nanomaterial-Syntheseverfahren	E-Faktor Analyse (Verhältnis aus Produktoutput und Materialinput)	/Eckelman et al. 2008/
Energieverbrauch der Nanopartikelproduktion (TiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> )	Energiebilanzierung	/Osterwalder et al. 2006/
Kohlenstoffnanoröhren	Stoffflussanalyse	/Lekas 2005/

Um daher umfassende Aussagen zum Energiebedarf von neuen Innovationen einschließlich der Herstellungsverfahren machen zu können, sind Betrachtungen und Analysen über den gesamten Lebenszyklus der Produkte notwendig. Beispiele für entsprechende gesamtheitliche Untersuchungen zu den Umweltauswirkungen am Beispiel von nanotechnolo-

giebasierten Produkten und Anwendungen sind in **Tabelle 3.1** in Kapitel 3.3.1 zusammengefasst. Nach /Steinfeldt et al. 2010/ und /Steinfeldt 2013/ lässt sich feststellen, dass nanotechnologische Anwendungen nicht per se ein hohes Umweltentlastungspotenzial, über den gesamten Lebensweg betrachtet, aufweisen. Aus **Tabelle 3.1** (siehe Kapitel 3.3.1) wird jedoch deutlich, dass die Mehrzahl der Untersuchungen zu dem Ergebnis kommen, dass trotz teilweise sehr hohem Energie- und Ressourcenverbrauch bei und für die Herstellung von Nanopartikeln oder nanotechnologischen Produkten, bei einer Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus Einsparungen in vielen umweltrelevanten Bereichen ermöglicht werden. Es lässt sich daher feststellen, dass zumindest die bisherigen Untersuchungen und Studien zeigen, dass hinsichtlich des Energieverbrauchs aber auch hinsichtlich der anderen benötigten Ressourcen und unterschiedlichen Umweltauswirkungen durch nanotechnologische Anwendungen zumeist Vorteile erzielt werden.

Nach /Steinfeldt 2013/ wurden in den letzten Jahren vermehrt Lebenszyklusuntersuchungen von nanotechnologiebasierten Produkten und Anwendungen durchgeführt. Es existieren jedoch noch große Informations- und Datenlücken bei der Erstellung solcher Lebenszyklusanalysen. Speziell in der Produktion und hinsichtlich der Verwertung fehlen Daten zum Material-, Ressourcen- und Energieverbrauch. Die Zuverlässigkeit der Untersuchungen hängt nach /Steinfeldt 2013/ dabei von der Qualität und der Verfügbarkeit von Informationen zum Material- und Energieverbrauch der entsprechenden Anwendungen ab. Für nanotechnologische Anwendungen, die sich noch in der Entwicklung befinden, sind entsprechend wenige Informationen verfügbar.

Ebenso muss dabei beachtet werden, dass, wenn man Anwendungen und Produkte zu Beginn ihrer Entwicklung bzw. ihrer Lernkurve mit bestehenden Technologien vergleicht, ein großes Potenzial für Verbesserungen und Effizienzsteigerungen besteht. Analysen von bereits auf dem Markt befindlichen oder in Zukunft zu erwartenden nanotechnologischen Produkten und Anwendungen mit Bezug auf Umweltschutz und Umweltentlastungen ergeben eine große Vielfalt an schon realisierten und zu erwartenden Anwendungsbereichen.

Neben einem erhöhten Energieverbrauch und den damit verbundenen Umweltauswirkungen bei der Herstellung von Produkten, die auf Innovationen wie z. B. der Nanotechnologie beruhen, wird auch dem Thema des Ressourcenverbrauchs eine wichtige Rolle beigemessen. Gerade im Hinblick auf eine zukünftige starke Verbreitung und Nutzung von neuen Innovationen und Zukunftstechnologien kommt diesem Themenfeld eine verstärkte Bedeutung zu. Der Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage wird in einer umfassenden Studie untersucht und ausgewertet (siehe /Angerer et al. 2009/). Im Rahmen von ausführlichen Untersuchungen wird der globale Rohstoffbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien im Jahr 2006 und 2030 im Verhältnis zur gesamten heutigen Weltproduktionsmenge des jeweiligen Rohstoffs analysiert und bewertet. Unter den untersuchten Zukunftstechnologien befinden sich mehrere mit großer Relevanz für die Energiewirtschaft z. B. Brennstoffzellen, Lithium-Ionen Akkus, Hochtemperatursupraleiter oder Dünnschicht-Photovoltaik. Insgesamt werden in der Untersuchung über 90 Zukunftstechnologien detailliert betrachtet. Davon haben 28 eine durchaus wichtige zukünftige Bedeutung für die Energiewirtschaft. Für die Charakterisierung

des Rohstoffbedarfs werden dabei drei Ausprägungen gewählt: Unkritisch, intensiv und sensibel. Dabei versteht die Studie unter rohstoffintensiv Technologien, von denen vermutet wird, dass sie bei mindestens einem Massenrohstoff<sup>18</sup> eine Nachfragesteigerung von mehr als 25 % der heutigen Weltproduktion dieses Rohstoffs auslösen. Rohstoffsensible Technologien sind dadurch charakterisiert, dass sie bei mindestens einer Rohstoffspezialität<sup>19</sup> eine Nachfragesteigerung von mehr als 100 % der heutigen Weltproduktion dieses Rohstoffs bewirken. Die entsprechenden Tabellen sind im Anhang dargestellt. **Tabelle A.14** bis **Tabelle A.16** zeigen ausgewählte Zukunftstechnologien mit Relevanz für die Energiewirtschaft. Es wird dabei in rohstoffsensitive (**Tabelle A.14**), rohstoffintensive (**Tabelle A.15**) und rohstoffunkritische Technologien (**Tabelle A.16**) unterschieden.

Bei der reinen Betrachtung der Anzahl lässt sich feststellen, dass von den 28 Zukunftstechnologien, die eine wichtige zukünftige Bedeutung für die Energiewirtschaft haben, 9 als sensitiv (32 %), 3 als kritisch (11 %) und mehr als die Hälfte (16) als unkritisch eingestuft werden. Unter den als rohstoffsensitiv eingestuften Zukunftstechnologien befinden sich jedoch Anwendungen mit sehr großer Bedeutung für die zukünftige Entwicklung der Energiewirtschaft wie z. B. Brennstoffzellen, innovative Elektromotoren, thermoelektrische Generatoren, Dünnschicht-Photovoltaik oder LED für die Beleuchtungs- und Displaytechnologie. Auch unter den als rohstoffintensiv eingestuften Technologien finden sich Anwendungen mit großem zukünftigem Potenzial. Die Mehrheit der für die Energiewirtschaft relevanten Zukunftstechnologien wird nach /Angerer et al. 2009/ jedoch als unkritisch eingestuft.

Bei den als rohstoffsensitiv eingestuften Anwendungen wie z. B. den thermoelektrischen Generatoren wird davon ausgegangen, dass erst durch die Nanotechnologie notwendige Wirkungsgradsteigerungen möglich werden und dadurch ein revolutionärer Durchbruch beim gezielten Design effizienter thermoelektrischer Werkstoffe gelingt. Aufgrund der Nanotechnologie könnten sich für die Zukunftstechnologie thermoelektrische Generatoren einerseits erst notwendige Entwicklungsmöglichkeiten für eine entsprechende Verbreitung im Markt ergeben, gleichzeitig wird dadurch jedoch auch die Problematik der Rohstoffversorgung generiert. Eine ähnliche Situation ergibt sich für die Dünnschicht-Photovoltaik. Auch hier bietet die Nanotechnologie Möglichkeiten, z. B. die Effizienz der Zellen zu steigern, da dies unter anderem eine wichtige Voraussetzung für die Durchsetzung am Markt darstellt. Andererseits ergibt sich dann auch hier ein gesteigerter Druck auf den Rohstoffbedarf. Positive Auswirkungen der Nanotechnologie ergeben sich z. B. bei der ebenfalls als rohstoffsensitiv eingestuften Technologie der Brennstoffzelle. Hier ermöglichen nanotechnologiebasierte Fortschritte und Herstellungsverfahren neben der Steigerung der Effizienz auch eine Reduktion der benötigten Rohstoffmengen z. B. von Platin in PEM-Brennstoffzellen.

Darüber hinaus können durch neue Innovationen wie der Nano- und Biotechnologie energierelevante Technologien erst zur Marktreife gebracht werden. Beispiele hierfür sind Farbstoffsolarzellen, Organische Solarzellen, Superkondensatoren, CCS-Technologien, Bio-

---

<sup>18</sup> Massenrohstoffe werden in größeren und größten Mengen hergestellt. Dazu zählen Eisen, Stahl, Kupfer, Chrom, Kobalt, Zinn, Antimon, Titan, Niob, Silber und andere

<sup>19</sup> Spezialitäten sind Rohstoffe mit einer Weltproduktion von bis zu einigen 1000 t/a. Dazu zählen Indium, Selen, Gallium, Germanium, Yttrium, Scandium, Neodym, Tantal und Platinmetalle



raffinerien, industrielle Fermentationstechnologien oder auch die biokatalytische Herstellung von Wasserstoff. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch neue Innovationen der Rohstoffbedarf zukünftig steigen kann, sich jedoch auch gerade bei den angesprochenen Zukunftstechnologien durchaus Ressourceneinsparpotenziale heben lassen. Des Weiteren ergeben sich erst durch die Nano- und Biotechnologie Fortschritte und Technologiesprünge, die neben der Steigerung der Energieeffizienz und der möglichen Erschließung neuer Energiequellen große Einsparungen beim Rohstoffbedarf zukünftiger Technologien ermöglichen.

Neben dem Energie- und Ressourcenbedarf neuer Innovationen stellen gerade aber auch solche Innovationen Hilfsmittel und Möglichkeiten bereit, der Rohstoffknappheit zu begegnen. /Reuscher et al. 2008/ nennen in ihrer Studie „Innovationen gegen Rohstoffknappheit“ vier unterschiedliche Strategien: Erschließung neuer Rohstoffquellen, Erhöhung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen, Substitution knapper Rohstoffe und Steigerung der Ressourceneffizienz.

In der letztgenannten Strategie spielen gerade die Nanotechnologie und auch die Biotechnologie neben weiteren Möglichkeiten wie Überkritische Fluide, Bionik oder neue Werkstoffe und werkstoffgerechte Konstruktion eine bedeutende Rolle. So gehen die Autoren davon aus, dass durch Verfahren der Nano- oder Biotechnologie sich auf jeder Stufe des Herstellungsprozesses Einsparpotenziale erschließen lassen. Das große Potenzial der weißen Biotechnologie wird z. B. in der Einsparung von Syntheseschritten, im geringeren Rohstoffverbrauch, in der höheren Energieeffizienz, in verminderten Emissionen und in einer Reduktion der Produktionskosten gesehen. Nanotechnologische Anwendungen bieten ebenfalls eine Vielzahl an Potenzialen zur ressourceneffizienten Nutzung. So wird beispielsweise der Einsatz von Nanokatalysatoren genannt. Diese können dazu eingesetzt werden, dass chemische Reaktionen sich bei geringeren Temperaturen und mit höheren Ausbeuten umsetzen lassen, wodurch sowohl Energie als auch Material eingespart werden kann. Durch den Einsatz von Nanomaterialien oder im Speziellen durch Nanokomposite können herkömmliche Materialien ersetzt und leichtere sowie widerstandsfähigere Materialien hergestellt und somit Material eingespart werden. Der Nanotechnologie wird auch in zahlreichen anderen Bereichen ein großes Potenzial für einen effizienteren Umgang mit Ressourcen zugesprochen. Gerade im Energiebereich werden z. B. mit effizienten Beleuchtungsquellen, mit nanoskaligen Dämmmaterialien, mit neuen Elektrodenmaterialien oder Oberflächenstrukturierungen sowie mit Treibstoffadditiven große Hoffnungen verbunden /Reuscher et al. 2008/.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Produktion speziell von Nanopartikeln zum Teil mit einem hohen Energieverbrauch verbunden sein kann. Die Mehrzahl von Lebenszyklusanalysen nanotechnologischer Anwendungen kommen jedoch zu dem Ergebnis, dass hinsichtlich des Energieverbrauchs sowie den anderen benötigten Ressourcen zumeist Vorteile erzielt werden (vgl. **Tabelle 3.1** in Kapitel 3.3.1 und /Steinfeldt et al. 2010, Steinfeldt 2013/). Zusätzlich zum Energieverbrauch bei der Herstellung kann für den Ressourcenverbrauch nano- und biotechnologischer Produkte festgesellt werden, dass nach aktuellem Wissenstand, dieser nur für eine geringe Anzahl von Produkten von kritischer Bedeutung ist. Die Mehrzahl der innovativen Anwendungen werden hinsichtlich des zukünftigen Ressourcenverbrauchs als unkritisch eingestuft bzw. es wird teilweise davon ausgegangen,

dass gerade durch z. B. die Nanotechnologie Fortschritte bei den Herstellungsverfahren ermöglicht und dadurch die benötigten Rohstoffmengen reduziert werden können (siehe /Angerer et al. 2009, Reuscher et al. 2008/).

Neben den positiven wie auch möglichen negativen Auswirkungen von neuen Innovationen auf die Energiewirtschaft und sonstige mit der Verwendung und Herstellung entsprechender Technologien und Anwendungen verbundenen Umweltauswirkungen wird im folgenden Kapitel auf mögliche Gefährdungspotenziale neuer Innovationen eingegangen. Nach /Grobe et al. 2008a, Grobe et al. 2013/ haben mit neuen Innovationen möglicherweise verbundene Gefährdungspotenziale einen bedeutenden Einfluss auf deren Akzeptanz in der Bevölkerung. Daher werden im Folgenden auch Vorbehalte hinsichtlich des Einsatzes von nano- und biotechnologischen Anwendungen in der Bevölkerung thematisiert.

### **3.5 Gefährdungspotenziale von und Vorbehalte gegen neue Basisinnovationen**

In diesem Kapitel werden, am Beispiel der betrachteten Basisinnovationen, Gefährdungspotenziale, Vorbehalte sowie die Akzeptanz von neuen Innovationen in der Bevölkerung näher analysiert. Bereits /Steinfeldt et al. 2004/ erstellt eine Fallstudie zu den Gefährdungspotenzialen nanotechnologischer Anwendungen. Die Studie sieht die Erschließung der Potenziale der Nanotechnologie erst am Anfang stehen, mit vergleichsweise einfachen Anwendungen und Produkten. Seit längerem sind bereits Produkte auf dem Markt verfügbar, deren Eigenschaften durch den Einsatz von Nanopartikeln verbessert werden. Als Beispiel kann nanoskaliger Ruß in Autoreifen zur Erhöhung der Abriebfestigkeit genannt werden. Es stellt sich nach /Steinfeldt et al. 2004/ allerdings die Frage, inwieweit mit dem Vorstoß in den nanoskaligen Bereich neuartige Wirkungen verbunden sind und inwieweit Nanomaterialien über Eigenschaften verfügen, die für die Umwelt und die Gesundheit relevant sein können? In vielen Anwendungen ist gerade die Veränderung der Eigenschaften durch die Nanoskaligkeit der ausschlaggebende Grund für den Einsatz der entsprechenden Nanopartikel. Die Fragen nach neuen Eigenschaften und den damit möglicherweise verbundenen negativen Effekten sind wenig untersucht bzw. problematisiert worden. Es existiert bisher wenig gesichertes Wissen über die Gesundheits- und Umweltrelevanz von Nanopartikeln /Steinfeldt et al. 2004/. Bei der Untersuchung der Auswirkungen nanoskaliger Materialien sollten nach /Steinfeldt et al. 2004/ folgende Aspekte besonders berücksichtigt werden:

- Reaktionsfreudigkeit und Mobilität
- Umweltoffene / umweltgeschlossene Anwendung
- Möglichkeiten der Bioakkumulation
- Persistenz
- Lungengängigkeit
- Wasserlöslichkeit

Im Rahmen der Studie wird mithilfe einer Expertenbefragung auch der Frage nachgegangen, ob Effekte von Nanopartikeln eher von der Größe, der Substanz oder der Oberflächenbeschaffenheit ausgehen. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass negative Effekte



sowohl von der Größe, der chemischen Zusammensetzung und der Oberflächenstruktur ausgehen. Als weitere Einflussgrößen auf die Wirkung werden die Höhe der Dosis, Beschichtung, Form, Verteilung im Gewebe, Höhe der elektrischen Spannung zwischen Molekülen und der Grad der Agglomeration genannt. Auch der Zustand des aufnehmenden Körpers beeinflusst die Effekte. So kann der Zustand des Immunsystems, der Gesundheitszustand und der Aufnahmeweg (Atmung, Haut, direkte Injektion, etc.) die möglichen Auswirkungen von Nanopartikeln beeinflussen. Darüber hinaus können Nanopartikel molekulare Fremdstoffe adsorbieren, wodurch der Zugang von Fremdstoffen in Körperregionen und Zellbereiche geschaffen wird, die ansonsten verwehrt bleiben. Nach Einschätzung der befragten Wissenschaftler könnte der Transport von Unreinheiten ein größeres Problem für biologische Systeme sein, als die Nanopartikel selbst. Nach Aussage der Experten existiert eine große Datenbasis über toxikologische Wirkungen von ultrafeinen Partikeln in Zusammenhang mit Luftverschmutzung durch natürliche und aus Verbrennungsprozessen stammende Partikeln. Deren Wirkung auf Lunge, Herz-Kreislauf-System und Klümpchenwirkung im Blut sind gut belegt. Diese Aussagen lassen sich jedoch nicht direkt auf industriell hergestellte Nanopartikel übertragen /Steinfeldt et al. 2004/.

/Steinfeldt et al. 2004/ untersucht die möglichen Auswirkungen von Nanopartikeln am Beispiel des Lebenswegs von Nanomaterialien (vgl. **Abbildung 3.7**).

1. Produktionsprozesse:

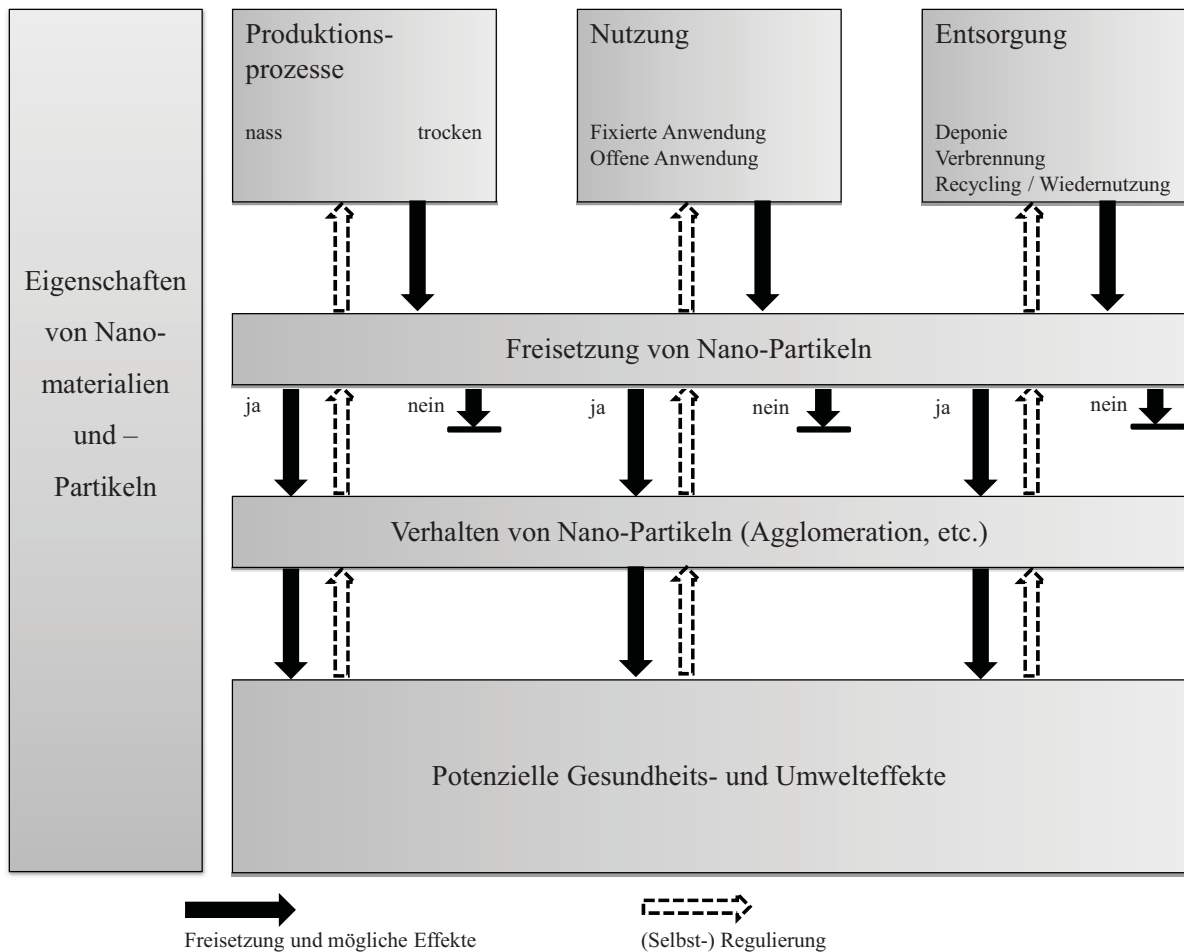
Produktionsprozesse von Nanomaterialien unterscheiden sich deutlich. Industriell gefertigte Nanomaterialien werden meist in flüssigen oder geschlossenen Gasphasen-Reaktoren hergestellt, wodurch eine direkte Belastung mit Nanomaterialien begrenzt sein dürfte. Problematisch sind Belastungen am Arbeitsplatz, in Forschungslaboren oder mögliche Belastungen durch Unfälle.

2. Produkte:

Nanopartikel sind in den meisten Fällen in Produkte eingeschlossen oder fixiert (z. B. Nanoröhren in Bildschirmen oder Partikel in Lacken). Die Möglichkeit der Freisetzung ist daher vermutlich gering.

3. Entsorgung und Wiederverwendung:

Das Verhalten während der Entsorgung und Wiederverwendung ist wenig erforscht, jedoch dürfte die Freisetzung von Nanopartikeln begrenzt sein.



**Abbildung 3.7:** Mögliche Freisetzungswege von Nanopartikeln /Steinfeldt et al. 2004/

Da Nanopartikel sehr mobil sind, gibt es unterschiedliche Untersuchungen zu den Auswirkungen auf den menschlichen Körper, die an Labortieren durchgeführt werden. /Oberdörster et al. 2004/ verfolgt die Verbreitung von Kohlenstoffpartikeln mit einem Durchmesser von 35 nm, nachdem sie bei Ratten auf der Nasenschleimhaut aufgebracht werden. Bereits nach einem Tag können die Partikel im Gehirn nachgewiesen werden. Es ist allerdings unklar, welche Auswirkungen die Partikel dabei auf das Gehirn haben. Diese Ergebnisse werden auch mit anderen Stoffen erzielt. Auch Kohlenstoff mit einer Größe von 20 und 29 nm kann nach Inhalation bei Ratten in der Leber nachgewiesen werden. Dabei gelangen die Partikel über die Lunge in den Blutkreislauf /Oberdörster et al. 2002/. Dieser Verdacht besteht auch bei Nanoröhren. So kommt /Warheit et al. 2004/ bei Ratten zu dem Ergebnis, dass Kohlenstoff-Nanoröhren, die Mäusen über die Luftröhre eingeflüßt werden, bei den Versuchstieren Granulome<sup>20</sup> hervorrufen. Darüber hinaus sterben 15 % der Ratten an einer durch zusammen geklumpfte Nanotubes verursachten mechanischen Blockade der oberen Atemwege. Es kann daher festgestellt werden, dass verschiedene Verdachtsmomente für eine problematische Wirkung von Nanopartikeln auf den Menschen bestehen. Nach /Steinfeldt et al. 2004/ unterstrichen die befragten Experten jedoch, dass es sich bei den Untersuchungen um Laborversuche handelte, bei denen den Versuchstieren oft sehr hohe Dosen verabreicht

<sup>20</sup> Granulome sind eine Mischung aus lebendem und totem Gewebe und ein Zeichen für Toxizität

wurden. Die Belastung des Menschen durch solch hohe Dosen ist, von schweren Unfällen abgesehen, nur schwer vorstellbar.

Nach /Steinfeldt et al. 2004/ lässt sich feststellen, dass sich das Verhalten von Nanopartikeln von Materie auf Makro-Ebene unterscheidet, auch bei Gleichheit der Stoffe. Einige der Studien dokumentieren überraschendes Verhalten und es gibt eine Reihe von ernst zu nehmenden Verdachtsmomenten und auch eindeutige Hinweise über toxische Wirkungen von Nanomaterialien. Alle bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse sind aber vorläufig, teilweise widersprüchlich und beziehen sich nur auf einen Bruchteil von möglichen Effekten. Gleichzeitig erscheint die Übertragbarkeit der Ergebnisse gering. Die befragten Experten merkten an, dass die Möglichkeiten von nanotechnologischer Entwicklung immens seien. Entwicklungsanstrengungen auf Grund berechtigten Verdachts möglicher Toxizität einzustellen, stünde aber in keinem Verhältnis zu den erwartbaren Gewinnen durch die Nanotechnologie. Es solle vielmehr darauf geachtet werden, dass frühzeitig die wissenschaftlich gesicherten Grundlagen für eine Risikobewertung und für ein Risikomanagement gelegt werden.

/Nordan et al. 2005/ fassen die Gefahrenpotenziale von zehn unterschiedlichen nanotechnologischen Anwendungen und verwendeten Nanomaterialien zusammen (vgl. **Tabelle 3.7**). Dabei werden unterschiedliche Risikomöglichkeiten bzw. Expositionslevel bewertet, einerseits die potenzielle Gefahr der Nanopartikel (jeweils die erste Zeile), das Expositionslevel bei Herstellung, Gebrauch und Recycling (mittlere Zeile) und andererseits das Risikolevel bei der Anwendung (untere Zeile). So wird z. B. beim Einsatz von Nano-Clay für Struktur-Komposite in Automobilkarosserien die potenzielle Gefahr der Nanopartikel (erste Zeile) als auch das Risikolevel bei der Anwendung (untere Zeile) als gering eingestuft. Die potenzielle Exposition bei der Herstellung wird als hoch, beim Gebrauch als gering und beim Recycling als mittel bewertet. Werden bei der gleichen Anwendung jedoch einwandige Nanoröhren verwendet, so wird die potenzielle Gefahr der Nanopartikel als hoch eingestuft und das Risikolevel bei der Anwendung wird mit mittel angegeben.

Die Bewertung der potentiellen Exposition bei Herstellung, Gebrauch und Recycling unterscheidet sich zwischen den unterschiedlichen Nanopartikeln jedoch nicht.

Vergleicht man die unterschiedlichen Nanopartikel, so werden vor allem Fullerene als potenziell sehr gefährlich eingestuft, gefolgt von CdS-Quantenpunkten und einwandigen Nanoröhren. Hinsichtlich der potenziellen Exposition bei Herstellung, Gebrauch und Recycling wird die Anwendung von Nanopartikeln als Sonnencremeadditiv sowie als Nahrungsmitteladditiv in allen drei Feldern als hoch eingestuft. Im Gegensatz dazu wird bei Speicherchips bei allen drei Bereichen eine geringe Gefahr der Exposition gesehen. Beim Einsatz von Nanopartikeln in flexible Solarzellen werden die Gefahr einer hohen Exposition während des Recyclings und eine mittlere Gefahr während der Herstellung gesehen. Die Gebrauchsphase wird als unkritisch eingestuft. Insgesamt lässt sich feststellen, dass sich mögliche Gefahren sowohl je nach Anwendung als auch nach eingesetzten Nanopartikeln unterscheiden /Nordan et al. 2005/.

**Tabelle 3.7:** Gefahrenpotenziale von nanotechnologischen Anwendungen /Nordan et al. 2005/

	SWNT <sup>21</sup>	MWNT <sup>22</sup>	Nano-Clay <sup>23</sup>	CdS Quantenpunkte	ZnO Nanopartikel	TiO <sub>2</sub> Nanopartikel	Dendrieme	Fullerene	Silikon Nanodrähte
In vivo Imaging	☹️ ■■■	--	--	☹️ ■■■	--	--	😊 ■■■	☹️ ■■■	--
Struktur-Komposite für Automobilkarosserien	☹️ ■■■	😊 ■■■	😊 ■■■	--	--	--	--	☹️ ■■■	--
Sonnencreme Additive	--	--	--	--	😊 ■■■	😊 ■■■	😊 ■■■	☹️ ■■■	--
Nahrungsmittel Additive	--	--	--	--	😊 ■■■	😊 ■■■	😊 ■■■	☹️ ■■■	--
Bildschirmrückwand	☹️ ■■■	--	--	--	--	--	--	--	😊 ■■■
Poliermittel	--	--	--	--	😊 ■■■	😊 ■■■	--	--	--
Speicherchip	☹️ ■■■	--	--	☹️ ■■■	--	--	--	☹️ ■■■	😊 ■■■
Druckertoner	--	--	--	--	--	--	😊 ■■■	--	--
Arzneimittel	--	--	--	--	--	--	😊 ■■■	☹️ ■■■	--
Flexible Solarzellen	--	--	--	☹️ ■■■	--	😊 ■■■	--	☹️ ■■■	😊 ■■■

Legende:

Potentielle Exposition bei...

Potenzielle Gefahr der Nanopartikel		
Herstellung	Gebrauch	Recycling
Risikolevel bei der Anwendung		

Bewertung der Exposition

gering	mittel	hoch
--------	--------	------

Bewertung der potenziellen Gefahr / des Risikolevels

😊	☺️	☹️
gering	mittel	hoch

<sup>21</sup> SWNT einwandige Nanoröhren, engl. single walled nanotube

<sup>22</sup> MWNT mehrwandige Nanoröhren, engl. multi walled nanotube

<sup>23</sup> Nano-Clay Ein Schichtsilikat

Eine sehr ähnliche Übersicht zum Stand der Untersuchungen und Einschätzungen zum Gefahrenpotenzial von Nanopartikeln stellt /Haas et al. 2007/ in Anlehnung an /Gibbs 2005/ zusammen (vgl. **Tabelle 3.8**).

Beim Umgang mit pulverförmigen Nanomaterialien müssen einige Sicherheitsaspekte beachtet werden, wie aus der Diskussion um Feinstaub allgemein bekannt. Die Freisetzung von pulverförmigen Nanomaterialien ist daher zu vermeiden. Generell gilt, dass ein Gefährdungspotenzial erwartet wird, wenn es zu einer Exposition gegenüber einem potenziell toxischen Material kommt. Die Herstellung und Weiterverarbeitung von pulverförmigen Nanomaterialien erfolgt jedoch üblicherweise in gekapselten Anlagen, wodurch eine Exposition minimiert werden kann. Wenn Nanopartikel in eine Matrix oder Beschichtung eingebunden sind, so ist die Wahrscheinlichkeit für eine Freisetzung relativ gering. Die Oberflächenkräfte der Nanopartikel sorgen dafür, dass sich die Partikel zusammenlagern oder sehr stark an der Beschichtung oder der Matrix haften. Der Umgang mit Nanopartikeln in flüssigen Phasen ist potenziell mit geringeren Gefährdungen verbunden, vor allem, wenn diese z. B. unter industriellen Bedingungen verarbeitet werden /Haas et al. 2007/. Es zeigt sich, dass aufgrund der Summe der einzelnen Charakteristika die potenzielle Gefahr bei einwandigen Nanoröhren, bei CdS-Quantenpunkten und bei Fullerenen als hoch eingeschätzt wird. Geringe Gefahren werden bei Nano-Clay, Titandioxid-Nanopartikel und bei Silikon-Nanodrähten gesehen. Ein gemischtes Bild und damit eine mittlere potenzielle Gefahr sieht /Gibbs 2005/ bei mehrwandigen Nanoröhren, bei Zinkoxid-Nanopartikeln und bei Dendriemen.

/Maynard 2006/ nennt 5 Herausforderungen und einen möglichen Zeitplan für einen sicheren Umgang mit der Nanotechnologie.

1. Die Entwicklung von Instrumenten und Methoden, um die Belastung mit industriell hergestellten Nanomaterialien in Luft und Wasser zu messen und zu bewerten (in den nächsten 3 bis 10 Jahren)
2. Die Entwicklung und Überprüfung von Methoden, um die Toxizität von industriell hergestellten Nanomaterialien abschätzen zu können (in den nächsten 5 bis 15 Jahren)
3. Die Entwicklung von Modellen, um die potenziellen Auswirkungen von industriell gefertigten Nanomaterialien auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit vorherzusagen (in den nächsten 10 Jahren)
4. Die Entwicklung von stabilen Systemen, um die Auswirkungen von industriell gefertigten Nanomaterialien auf die Gesundheit und die Umwelt über deren gesamtes Leben bewerten zu können (in den nächsten 5 Jahren)
5. Die Entwicklung von strategischen Programmen, die eine Risiko fokussierte Forschung ermöglichen (in den nächsten 12 Monaten)

Zusammenfassend sieht /Maynard 2006/ die Nanotechnologie als historische Chance für die Risikoforschung. Da es Hinweise auf die Gefährlichkeit von nanoskaligen Materialien gibt, sollte das Ziel von allen Beteiligten sein, proaktiv die Gefährdungspotenziale zu bewältigen und zu reduzieren. /Maynard 2006/ geht davon aus, dass, wenn die Forschungsgemeinschaft diese Herausforderung annehmen und bewältigen kann, der Weg für einen sicheren

Umgang mit der Nanotechnologie und die damit verbundenen großen Möglichkeiten gebnet wird.

**Tabelle 3.8:** Gefährdungspotenziale verschiedener Nanopartikel (nach /Gibbs 2005/ in /Haas et al. 2007/)

Charakteristika	Gewichtung [%]	Art der Nanopartikel								
		SWNT	MWNT	Nano-Clay	CdS Quantenpunkte	ZnO Nanopartikel	TiO <sub>2</sub> Nanopartikel	Dendrieme	Fullerene	Silikon Nanodrähte
Hinweis auf toxische Wirkung	35	●	●	○	●	●	○	●	●	○
Nano reaktiver als Bulk <sup>24</sup>	15	●	●	○	●	●	●	●	●	●
Bulkmaterial ist toxisch	5	○	○	○	●	○	○	○	○	○
Nicht biodegradierbar	10	●	●	○	●	●	●	●	●	○
Geringe Tendenz zur Agglomeration	5	○	○	○	○	○	○	○	●	○
Einfache Reinigbarkeit / Charakterisierung	10	●	●	●	●	●	●	○	○	●
Hinweis auf Mobilität / negative Wirkung im Körper	10	●	●	○	●	●	○	●	●	○
Hinweis auf Mobilität / negative Wirkung auf Umwelt	10	●	●	○	●	●	○	●	●	○
Potenzielle Gefahren		☹	☹	☺	☹	☹	☺	☺	☹	☺

Legende:

- ja
- eventuell
- nein

☺	☹	☹
Gering	Mittel	Hoch

Im Jahr 2007 sammelt und bewertet eine Nanotechnology Task Force der U.S. Food and Drug Administration (siehe /FDA 2007/) Untersuchungen zu den Wechselwirkungen zwischen Nanomaterialien und biologischen Systemen (z. B. /Hoshino et al. 2004, Oberdörster et al. 2005b, Warheit et al. 2007/). Die Task Force kommt zu dem Ergebnis, dass man in Bezug auf die Zusammensetzung und die Oberflächencharakteristik von nanoskaligen Materialien, die in Kontakt mit biologischen Systemen kommen könnten, besonders achtsam sein sollte. Die Ergebnisse unterschiedlicher Studien sind oft materialspezifisch und es existiert keine Wissensgrundlage, um diese Ergebnisse auf eine breite Klasse von Materialien an-

<sup>24</sup> Bulk: z. B. ein Festkörper



zuwenden. Die bisher vorliegenden Ergebnisse weisen nicht darauf hin, dass alle nanoskalierten Materialien gefährlich sind. Darüber hinaus kommt die Task Force zu dem Ergebnis, dass es nicht offensichtlich ist, dass, wenn alle nanoskalierten Materialien mit nicht nanoskalierten Materialien verglichen werden, die nanoskalierten Materialien als Gesamtheit eine größere Gefahr darstellen. Es wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass die durch die Nanoskaligkeit hervorgerufenen Veränderungen der Materialeigenschaften sich auch auf die Interaktion mit biologischen Systemen auswirken können /FDA 2007/.

Auch /Orthen et al. 2007/ befassen sich umfassend mit Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanomaterialien. Demnach können die toxikologischen und ökotoxikologischen Gefährdungspotenziale, die mit der Nanotechnologie verbunden sind, in vielen Bereichen noch nicht beurteilt werden. Da aber die Bedeutung der Nanotechnologie weiterhin zunimmt und dadurch Arbeiter, Verbraucher und die Umwelt im steigenden Maße exponiert werden, ergibt sich die Notwendigkeit, die Entwicklung der Nanotechnologie zu begleiten und die Chancen und Gefährdungspotenziale in einem transparenten Prozess abzuwägen und mit bestehenden und etablierten Technologien zu vergleichen. Dazu müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um die bestehenden Wissenslücken zu schließen. So ist es nach /Orthen et al. 2007/ grundsätzlich erforderlich, dass die toxikologischen und ökotoxikologischen Studien in der regulatorischen Toxikologie verwendet werden können.

Nach /Boeing 2013/ kann die Entwicklung des Bilds der Nanotechnologie im Wechselspiel von Medien, Wissenschaft und Politik in drei Phasen eingeteilt werden. Seit der getrennten Nennung des Begriffs der Nanotechnologie im Jahr 1974 durch Norio Taniguchi hat sich die Bedeutung der Nanotechnologie merklich geändert. Die erste Phase (vor 2000) wird als futuristische Phase bezeichnet. In den 1990ern wird die Nanotechnologie auch in den öffentlichen Medien verstärkt erwähnt. Damals wird sie als kraftvolle und visionäre Technologie dargestellt, die es möglich machen wird, dass eines Tages nanoskalierte Dinge gebaut und repariert werden können. Als Höhepunkt kann die US National Nanotechnology Initiative (NNI) und deren Bericht aus dem Jahr 1999 angesehen werden (siehe /NSTC 1999/). Die zweite Phase (2000 bis 2006) wird als Nanomärkte Phase bezeichnet. Der Wechsel in die 2. Phase, in der der Fokus auf dem wirtschaftlichen Potential der Nanotechnologie liegt, wird wieder von der NNI hervorgerufen. So sahen /Roco et al. 2001/ in einem Bericht für die US National Science Foundation für 2015 einen Markt von einer Billion Dollar für nanotechnologische Produkte voraus. Die NNI ist auch ein Wegbereiter für eine breitere Definition des Begriffs Nanotechnologie – alles Technische unter der Grenze von 100 Nanometern (siehe /NNI 2000/). Dadurch fallen sehr viele Produkte und wissenschaftliche Projekte in die Definition dieser neuen Technologie. Die bis dahin durchweg positive Einstellung ändert sich und nach /Boeing 2013/ folgt ab 2006 die skeptische Phase. Bereits im Jahr 2003 weist ein Bericht der eher unbekannteren Kanadischen Bürgerechtsorganisation ETC Group auf mögliche Gefahren der Nanotechnologie hin (siehe /ETC 2003/). Auch gibt es in dieser Zeit erste Hinweise von Toxikologen, dass z. B. Kohlenstoffnanoröhren der neue Asbest werden könnten (siehe /Brown 2002/). Dies führt zu ersten negativen Berichterstattungen in den Medien und ändert sich ironischerweise mit einer Falschmeldung im Jahr 2006, als es angeblich durch einen Toilettenspray auf Basis der Nanotechnologie zu Vergiftungen gekommen sei, worauf-



hin der Spray vom Markt genommen wird. Eine Untersuchung des Bundesinstitut für Risikobewertung stellte jedoch fest, dass der Spray überhaupt keine Nanopartikel enthält (siehe /BfR 2006/). Die negativen Reaktionen in den Medien sind jedoch sehr groß. The Economist stellt sogar die Frage „Has all the magic gone?“ (siehe /Economist 2006/). Dieser Zwischenfall kommt zusammen mit einer steigenden Zahl an toxikologischen Untersuchungen, die aufzeigten, dass Gefahren durch Nanopartikel zumindest nicht ausgeschlossen werden können. Im Laufe dieser Entwicklung hat sich die Wahrnehmung der Nanotechnologie als auch die Wahrnehmung der Gefährdungspotenziale der Nanotechnologie verengt /Boeing 2013/.

Frühere Entwicklungen zeigen, dass neue Technologien negative Auswirkungen auf die Menschliche Gesundheit, die Umwelt, die Gesellschaft oder die Wirtschaft haben können, die so von den Erfindern und Entwicklern nicht gedacht waren. Im Falle der Nanotechnologie beginnen die Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen der Nanotechnologie nach /Boeing 2013/ bereits in der futuristischen Phase. Als ein Grund dafür kann der Versuch genannt werden, bei der Nanotechnologie eine ähnlich negative Gegenreaktion der Öffentlichkeit zu verhindern, wie dies in den 90ern bei der Gentechnik der Fall war. Als Grund für die ablehnende Haltung der Menschen im Falle der Gentechnik wird die schlechte und ungenügende Information der Öffentlichkeit über mögliche Gefahren und der kaum vorhandene offene Austausch mit unterschiedlichen Vertretern der öffentlichen Meinung und den Medien angenommen. Bereits im Jahr 2001 veröffentlicht die US National Science Foundation eine erste breit angelegte Untersuchung (siehe /Roco et al. 2001/), in Deutschland erfolgt eine ähnliche Untersuchung im Jahr 2003 durch das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (siehe /Paschen et al. 2003/). Ein weiterer, weltweit stark beachteter Bericht wird im Jahr 2004 durch die Royal Society and Royal Academy of Engineering (siehe /RS 2004/) veröffentlicht, indem auch Empfehlungen für den Umgang mit Nanomaterialien ausgesprochen werden. Nach /Boeing 2013/ ist der Einfluss dieser Berichte jedoch auf Experten in der Wissenschaft, der Politik, der Industrie und Umweltorganisationen beschränkt. Auch liefern sie kein einfach verständliches Konzept, nachdem die Auswirkungen und Gefährdungspotenziale eingeteilt werden können.

Weitere Untersuchungen zu möglichen Gefährdungspotenzialen der Nanotechnologie (siehe /Nel et al. 2009, Oberdörster et al. 2005a/) belegen, dass Nanopartikel, wenn sie direkten Kontakt zu Zellen haben, toxisch wirken und Verletzungen und Entzündungen im Gewebe hervorrufen können. Speziell Kohlenstoffnanoröhren zeigen ein Asbest ähnliches Verhalten (siehe /Poland et al. 2008/). Es kann bisher jedoch keine abschließende und umfassende Bewertung der realen Gefahren von freien Nanopartikeln erreicht werden. Des Weiteren lässt sich feststellen, dass negative Auswirkungen in den meisten Studien mit der Verabreichung von sehr hohen Dosen verbunden sind. Auch stehen das Wissen und das Verständnis für die Wechselwirkungen an der Nano-Bio-Grenzschicht erst am Beginn. Eine aktuelle Übersichtstudie hierzu (siehe /Nel et al. 2009/) kommt zu der Feststellung, dass die Auswirkungen von Nanopartikeln auf Zellen von einer Vielzahl von Faktoren, wie z. B. die Art der Wechselwirkung, der Geometrie der Partikel oder der chemischen Zusammensetzung des Mediums, abhängig sind. Es ist daher bisher nicht möglich, eine Art Formel zu erzeugen, mit welcher die Toxizität eines gegebenen Nanopartikels ex ante bestimmt und bewertet werden kann. Das

nachfolgend beschriebene Forschungsprojekt NanoCare weist jedoch darauf hin, dass Ergebnisse von Zellproben im Labor relativ konsistente Ergebnisse mit Tierversuchen aufweisen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass durch eine Vielzahl von Labortests, ohne weitere kontrovers diskutierte Tierversuche, eine Abschätzung der Gefährlichkeit von Nanopartikeln teilweise möglich ist /Boeing 2013/.

Die umfangreichen Ergebnisse der Untersuchungen des NanoCare-Projektes von über 4 Jahren sind in einem Forschungsbericht zusammengefasst (siehe /Kuhlbusch et al. 2009/). Ziele des Projektes sind die Kombination von Innovationen in der Materialwissenschaft mit dem speziellen Fokus auf nanostrukturierte Materialien und der Identifikation von möglichen Auswirkungen und Gefahren, um eine nachhaltige Entwicklung der Nanotechnologie zu gewährleisten. Dabei bezieht sich der Begriff der Nachhaltigkeit auf Wirtschaftlichkeit und die Möglichkeiten der Gefährdung von Mensch und Umwelt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Generierung von Wissen, dem Management von Wissen und dem Wissenstransfer sowie der Kommunikation der Ergebnisse. Ein wichtiger Teil des Projektes ist die Identifikation, die Herstellung und Charakterisierung von geeigneten Nanomaterialien, um die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der im Rahmen des Projektes durchgeführten Toxizitätsuntersuchungen zu gewährleisten. Für weitere Informationen dazu wird auf /Kuhlbusch et al. 2009/ verwiesen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden negative Auswirkungen von Nanopartikeln mit neuentwickelten, standardisierten *in vitro*<sup>25</sup> und *in vivo*<sup>26</sup> Modellen untersucht. Da bisher keine anerkannten und validierten Toxizitätstestmethoden zur Untersuchung von Nanopartikeln vorliegen, etabliert das Projekt NanoCare erste, verlässliche Untersuchungsstrategien. Nanopartikel weisen deutliche physio-chemische Unterschiede zu Bulk-Materialien der gleichen chemischen Zusammensetzung auf. Daher ist anzunehmen, dass klassische Zytotoxizitätsexperimente nicht geeignet sind, um Nanopartikel zu untersuchen (siehe /Kroll et al. 2009, Oberdörster et al. 2005a, Oberdörster et al. 2005b/). Daher werden im Rahmen von NanoCare Eigenschaften von Nanopartikeln, wie ihr Potenzial in Zellen einzudringen, ihre Interaktivität mit Zellen sowie mit biologischen Medien und mögliche Beeinträchtigungen durch Testkomponenten und geeignete Testmethoden charakterisiert, um verlässliche Risikountersuchungsstrategien und standardisierte Vorgehensweisen (SOP<sup>27</sup>) bei *in vitro* Testmethoden auszuwählen. Die Toxizitätsuntersuchungen werden durch zusätzlich durchgeführte mechanistische Untersuchungen der gegenseitigen Beeinflussung von Partikel und Zelle sowie des Transports durch Epithelgewebe begleitet. Bei den *in vivo* Untersuchungen werden drei unterschiedliche Tests durchgeführt, basierend auf den folgenden beiden Herangehensweisen: a) Intratracheale Einbringung, um eine Lunge einer definierten Menge von definierten Partikeln auszusetzen, und b) Kurz- und Langzeitinhalationsstudien, um eine „reale“ Aufnahme und Belastung durch Luft übertragene Nanopartikel in die Lunge nachzuahmen. Die gemeinsame Evaluation aller im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Tests zeigen, dass keine der untersuchten Nanomaterialien schwerwiegende Effekte in der

---

<sup>25</sup> Bei In-vitro-Untersuchungen werden Organismen und Strukturen nicht in ihrem natürlichen Zusammenhang, sondern unter experimentellen Bedingungen untersucht

<sup>26</sup> Als *in vivo* bezeichnet man Prozesse, die im lebendigen Organismus ablaufen

<sup>27</sup> SOP Standard Operation Procedures

Hinsicht hervorrufen, dass Zellen oder Tiere Zeichen von akuter Toxizität oder anderweitige negative biologische Effekte bei der Behandlung mit geringen Konzentrationen aufweisen. Der Vergleich der Ergebnisse von in vitro Tests zeigt eine sehr gute Korrelation, so dass in erster Annäherung die in vitro Studien relativ gut die Situation von in vivo Tests wiedergeben. Es muss jedoch einschränkend gesagt werden, dass diese Ergebnisse nur für die untersuchten Materialien gültig sind, der Untersuchungsrahmen jedoch 11 unterschiedliche gängige Materialien in 30 verschiedenen Modifikationen umfasste.

In einem Statuspapier zur Risikobewertung sowie zur Human- und Ökotoxologie von Nanomaterialien (siehe /Förster et al. 2011/) werden bereits durchgeführte als auch aktuelle Forschungsvorhaben zusammengefasst und ausgewertet. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass eine Größenbezeichnung Nano nicht unmittelbar auch „toxisch“ bedeutet, also kein intrinsisches Gefährdungsmerkmal darstellt“ /Förster et al. 2011/.

Zusätzlich zu den Auswirkungen auf den Menschen sind auch negative Auswirkungen auf die Umwelt denkbar. /Tomson et al. 2003/ versucht die Auswirkungen von Nanomaterialien in Böden, aquatischen Umgebungen sowie der Bio-Akkumulation zu identifizieren. Als Ergebnis wird festgestellt, dass die Aggregation von Nanopartikeln in verschiedenen wässrigen Umgebungen unterschiedlich sein kann, dass die Adsorption von Fremdkörpern an der Oberfläche sehr stark ist, dass die Adsorption / Desorption von organischen Verbindungen zu Nanopartikeln dauerhaft sein kann und dass Nanomaterialien in natürlichen, wässrigen Umgebungen das Verhalten und die Mobilität von Verunreinigungen erheblich verändern können. /Brumfiel 2003/ untersucht das Verhalten von Buckyballs<sup>28</sup> in Wasser, welches auf gewöhnlichen Erdboden ähnliches Material gegossen wird. Als Ergebnis wird festgestellt, dass je nachdem ob sich die Buckyballs zusammen klumpen oder nicht, sich das Verhalten stark unterscheidet. Verteilten sich die Buckyballs ohne zu klumpen, so bildete das Wasser eine Art Schutzhülle und die Buckyballs können durch den Boden hindurch wandern, ohne aufgenommen zu werden. Dadurch könnten sie eine Gefahr für das Grundwasser darstellen. Ebenso berichtet /Brumfiel 2003/, dass Nanopartikel in die Nahrungskette gelangen können. Sie wurden z. B. von Erdwürmern aufgenommen.

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) stellt in einem Sondergutachten fest, das „es [...] unstrittig (ist), dass Nanotechnologien langfristig vielfältige neue technologische Möglichkeiten eröffnen. Dabei bestehe Grund zur Hoffnung, dass sie in manchen Bereichen nicht nur ökonomischen Gewinn schaffen, sondern auch einen hohen gesellschaftlichen Nutzen mit sich bringen, beispielsweise in der Medizin. [...] Pauschale Urteile über die Risiken von Nanomaterialien sind nicht möglich: Manche Materialien sind nach heutigem Kenntnisstand weitestgehend unbedenklich, bei anderen zeigen Forschungsergebnisse ein relevantes Risikopotenzial auf. Bisher gibt es keine wissenschaftlichen Beweise dahin gehend, dass Nanomaterialien - wie sie heute hergestellt und verwendet werden - zu Schädigungen von Umwelt und Gesundheit führen. Diese Feststellung kann allerdings nicht als pauschale Entwarnung verstanden werden, da bei vielen Nanomaterialien standardisierte Testmethoden

---

<sup>28</sup> Als Buckyballs (engl.) werden Fullerene mit der Summelformel  $C_{60}$  bezeichnet. Diese bestehen aus 12 Fünfecken und 20 Sechsecken, die zusammen ein abgestumpftes Ikosaeder bilden (Struktur eines Fußballs)

für eine umfassende Risikobewertung fehlen und das Wissen um ihre möglichen negativen Wirkungen begrenzt ist.“/SRU 2011/

Neben den beschriebenen möglichen direkten Gefährdungspotenzialen der Nanotechnologie weist /Boeing 2013/ auf soziale Auswirkungen hin, die auch durch „sichere“ nanotechnologische Anwendungen hervorgerufen werden können. Es besteht die Sorge, dass es zu einer deutlichen Unterscheidung in Länder kommt, welche technische und wirtschaftliche Möglichkeiten haben, von der Nanotechnologie zu profitieren, und welche, die davon ausgeschlossen werden. Mit dem Ergebnis, dass die globalen Entwicklungsunterschiede noch mehr verstärkt werden (siehe /ETC 2005, Jones 2007/). Auch innerhalb der industrialisierten Länder könnte die Nanotechnologie problematische Trends verstärken. Der Fokus der Nanomedizin eine vollständig personalisierte Medizin zu ermöglichen, ruft Fragen über den Schutz und die Diskriminierung von individuellen, persönlichen Daten der Patienten hervor. Nach /Nordmann 2006/ könnte die Nanotechnologie den Trend zu einer reduzierten und technikdominierten Medizin verstärken. Eine weitere Gefahr wird durch nanotechnologische Entwicklungen im Bereich der Sensorik und Überwachungstechnik gesehen, da durch die starke Miniaturisierung verstärkt Überwachungssysteme zum Einsatz kommen und dies zu einem weiteren Eingriff in die Privatsphäre führen könnte /Boeing 2013/. /Altmann 2007/ geht noch weiter und weist darauf hin, dass Nanotechnologien für den militärischen Einsatz die internationale Sicherheit destabilisieren und zu einem erneuten Wettrüsten führen könnten.

Zu den Gefahrenpotenzialen der Biotechnologie erstellen /Hoppenheide et al. 2005/ ein Konzept zur vergleichenden Bewertung des Gefahrenpotenzials der biotechnischen und chemisch-technischen Produktion. Chemisch-technische Prozesse sind in der Regel durch hohe Temperaturen, hohen Druck, den Einsatz von organischen Lösungsmitteln und dem Vorhandensein von Schadstoffen gekennzeichnet. Die Biotechnologie gilt im Gegensatz dazu als eine vergleichsweise sanfte Technologie, welche bei milden Bedingungen (Raumtemperatur, Normaldruck) und in wässrigen Milieus arbeitet. Andererseits wird davon ausgegangen, dass mit biotechnologischen Produktionsverfahren als spezifische Gefahr die mögliche Freisetzung ökologisch (gentechnisch veränderter) oder gesundheitlich relevanter Organismen verbunden ist. Als mögliche Vergleichsfelder werden daher in der Untersuchung von /Hoppenheide et al. 2005/ die Mess- und Regelungstechnik, die Materialbeschaffenheit, der Materialaufwand und insbesondere die Anlagensicherheit aufgeführt und exemplarisch anhand zweier Produktionsverfahren zur Herstellung von Vitamin B<sub>2</sub> untersucht. Es wird hierzu ein Bewertungskonzept entwickelt, welches einen systematischen Vergleich der jeweiligen Gefahrenpotenziale differenziert nach Prozessbedingungen, Gefahrstoffen und biologischen Arbeitsstoffen ermöglicht. Das Ergebnis der vergleichenden Bewertung des Gefahrenpotenzials der chemisch-technischen und biotechnologischen Produktion von Vitamin B<sub>2</sub> fällt eindeutig aus. „Das biotechnische Verfahren weist in den wesentlichen Punkten entscheidende gefahrenbezogene Vorteile auf. So ist sowohl die Anzahl der eingesetzten Chemikalien als auch das mit diesen verbundene Gefahrenpotential um Größenordnungen geringer - sowohl was akute und chronische Gesundheitsgefahren als auch Umweltgefahren, Brand- und Explosionsgefahren und Gefahren durch das Freisetzungsverhalten angeht.“ /Hoppenheide et al. 2005/. Auch der Vergleich anhand des prozessspezifischen Gefahrenpotenzials sieht Vorteile

beim biotechnologischen Herstellungsverfahren. Die Bewertung der bei der biotechnologischen Produktion eingesetzten biologischen Arbeitsstoffe kommt zu dem Ergebnis, dass das Gefahrenpotenzial des eingesetzten gentechnisch veränderten *Bacillus subtilis*-Stamms „maximal gering ausfällt und vermutlich eher zu vernachlässigen ist.“ /Hoppenheidt et al. 2005/. Im Gegensatz dazu werden die beim chemisch-technischen Verfahren eingesetzten Chemikalien mehrfach mit hohen bis sehr hohen Gefahrenpotenzialen bewertet /Hoppenheidt et al. 2005/.

Auch im Rahmen eines europäischen Forschungsprojektes zu den Möglichkeiten der weißen Biotechnologie werden die damit verbundenen Gefährdungspotenziale untersucht (siehe /BREW 2006/). Dabei kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass die klassischen Gefahren von biotechnologisch hergestellten Chemikalien mit dem Gefahrenpotenzial von auf petrochemischer Basis hergestellten Chemikalien verglichen werden kann. Es wird jedoch festgestellt, dass, wenn durch die weiße Biotechnologie neue Rohmaterialien, Zwischen- und Endprodukte hergestellt bzw. verwendet werden, entsprechend passende Sicherheitsvorschriften und Vorgehensweisen entwickelt werden müssen.

Über den Einsatz der grünen Biotechnologie (kommerzielle Nutzung von gentechnisch veränderten Organismen) z. B. in der Landwirtschaft wird seit Ende der 80er Jahre in Europa heftig diskutiert. Die Bedenken der Bevölkerung lassen sich dabei in zwei Richtungen einteilen. Viele Menschen haben die Sorge, dass gentechnisch veränderte Organismen direkte gesundheitliche Auswirkungen, wie z. B. die vermehrte Entwicklung von Allergien, haben. Andere warnen vor den ökologischen Auswirkungen der Gentechnik auf die Umwelt. Auch die möglichen Auswirkungen auf die Tierwelt lassen sich nicht eindeutig vorhersagen /Perlitz 2004/.

Neben den möglichen Gefährdungspotenzialen neuer Innovationen wird im Folgenden auf die Wahrnehmung und Akzeptanz neuer Innovationen auch am Beispiel der Nanotechnologie eingegangen. Nach /Grobe et al. 2013/ ist es wichtig für die Darstellung und damit die Akzeptanz der Nanotechnologie in der Öffentlichkeit, eine geeignete Vorgehensweise zu finden, da aufgrund der Diversität und Komplexität der Nanotechnologie eine umfassende und klare Beschreibung und Definition der Nanotechnologie kaum oder nicht möglich ist. Ob nanotechnologische Anwendungen von der Öffentlichkeit in Deutschland angenommen und entsprechende Produkte gekauft werden, ist laut /Grobe et al. 2008a/ noch offen, da sich die Nanotechnologie noch immer in einer frühen Phase der Technologieentwicklung befindet und sich dabei die Akzeptanz einer Technologie schnell ändern kann. Internationale Studien zeigen, dass das Wissen über die Nanotechnologie bei Verbrauchern noch nicht sehr verbreitet ist.

Ein Vergleich von internationalen Studien wird im Jahr 2008 vom International Risk Governance Council veröffentlicht (siehe /Grobe et al. 2008b/). So können in den USA im Jahr 2004 nur 16 % der Befragten etwas mit dem Begriff der Nanotechnologie verbinden (siehe /Cobb et al. 2004/). Im Jahr 2005 steigt der Bekanntheitsgrad auf über 40 % (siehe /Einsiedel 2005, Macoubrie 2005/), in Umfragen aus dem Jahr 2006 sinkt die Anzahl der Befragten, die etwas mit dem Begriff der Nanotechnologie anfangen und auch Anwendungsbeispiele nennen können, wieder auf etwa 30 % (siehe /Hart 2006/) und im Jahr 2007 sogar



auf etwa 20 % (siehe /Kahan et al. 2007/). Nach /komm.passion 2004/ können in Deutschland im Jahr 2004 ca. 45 % der Befragten mit dem Begriff der Nanotechnologie etwas anfangen oder können sogar genauere Informationen angeben. Eine weitere Befragung im Jahr 2007 durch das Bundesinstitut für Risikobewertung (siehe /Zimmer et al. 2008/) bestätigt diese guten Ergebnisse. 52 % der Befragten kennen den Begriff und können auch Anwendungsbeispiele benennen. Doch zeigen diese Zahlen auch, dass fast die Hälfte der Deutschen noch nichts mit dem Begriff der Nanotechnologie verbindet. Die aktuellste Studie dazu zeigt für die USA wieder ähnliche Ergebnisse wie im Jahr 2006. 68 % der Befragten können nichts bzw. wenig mit dem Begriff der Nanotechnologie anfangen.

Die Vielzahl der Studien befragen die Teilnehmer auch nach ihrer Einstellung und den Erwartungen zur Nanotechnologie. Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass sich hierzu noch kein klares Bild ergibt /Grobe et al. 2008a/. Für Deutschland zeigt sich, dass 66 % der Befragten mehr Vorteile durch den Einsatz der Nanotechnologie erwarten /Zimmer et al. 2008/. Von zentraler Bedeutung für den Wissensstand über eine Technologie ist die Anzahl an Anwendungen, die von den Befragten genannt werden können. Für Deutschland stellt /Grobe et al. 2008a/ einen unerwartet hohen Wissensstand fest, da im Durchschnitt 7 bis 8 Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie von den Befragten genannt werden. 85 % der Befragten nennen den Medizinbereich als mögliches Anwendungsfeld der Nanotechnologie. Auf den Medizinbereich folgten Oberflächenbeschichtungen (78 %), Lebensmittel (63 %), Automobil (62 %) und Informations- und Kommunikationstechnologien / Elektronik (61 %). Weitere Anwendungsbereiche sind z. B. Textil, Farben / Lacke, Baumaterialien, Reinigungsmittel, Kosmetik oder das Militär. Insgesamt ist festzustellen, dass die Deutschen Verbraucher recht gut informiert sind und nanotechnologische Anwendungen sehr differenziert betrachtet werden. Die meisten negativen Bemerkungen werden im Bereich der Lebensmittel (16 %) und dem Militär (12 %) getätigt. Weitere von den Befragten genannte Bereiche, die mit Gefährdungspotenzialen verbunden werden, sind der Bereich Reinigungsmittel (4 %), Kosmetik (3 %) und Luftfahrt (1 %). Im Vergleich zu den positiven Bewertungen für Oberflächenbeschichtungen (51 %), Medizin (46 %) oder Automobil (39 %) haben die negativen Bemerkungen einen untergeordneten Stellenwert. In der Regel begründen die Befragten ihre positiven Bewertungen mit allgemein großen Hoffnungen für die Zukunft z. B. wenn es um Bereiche wie Gesundheit, Energienachfrage oder Umweltschutz geht.

Die Mehrheit der Befragten steht Innovationen im Kontext der Nanotechnologie und damit verbundenen Neuerungen grundsätzlich positiv gegenüber (72 %), gleichzeitig möchten die Verbraucher jedoch auch, dass neue Technologien in einen verantwortungsvollen Umgang mit der Umwelt eingebettet werden. Skeptische oder ablehnende Haltungen werden nur von 20 % der Befragten genannt. Als Schlüsselfaktor für eine breit abgestützte, positive Grundhaltung bei Verbrauchern kann ein verantwortungsvoller Umgang mit Nanotechnologien genannt werden. Trotz dieser sehr positiven Einstellung gegenüber der Nanotechnologie nannten 87 % der Befragten Ängste vor negativen gesundheitlichen Effekten. 29 % nannten mögliche negative Effekte auf die Umwelt. Vor allem die ungewollte Aufnahme von Nanomaterialien wurde als mögliches Gefährdungspotenzial angesehen.

Die Themen Energieverbrauch oder Ressourceneinsparung werden von den Befragten mit dem Bereich der Umwelttechnologien verbunden. Nur ein Befragter nennt z. B. die Einsatzmöglichkeiten der Nanotechnologie im Bereich der Photovoltaik. Andere Bemerkungen zu möglichen Anwendungen fallen in den Bereich Bau / Konstruktion. Dabei werden neuartige Fenster, Wärmedämmung oder neue Materialien und Technologien für Niedrigenergiehäuser genannt. Im Automobilbereich werden von zwei Befragten neue Antriebstechnologien und reibungsreduzierte Lager als mögliche Anwendungsfälle genannt. Die Ergebnisse zeigen, dass Nanotechnologie nicht primär mit Argumenten wie Reduktion des Energieverbrauchs oder mit neuen Technologien zur Energiebereitstellung oder Energiespeicherung verbunden wird. Das heißt aber auch, dass eine nachhaltige Entwicklung bei den Befragten im Jahr 2008 nicht primär mit der Nanotechnologie verbunden wird /Grobe et al. 2008a, Grobe et al. 2013/. Auch /Bonazzi 2010/ sieht in der Kommunikation und Verbreitung der Möglichkeiten nanotechnologischer Anwendungen für das Themenfeld der Nachhaltigkeit einen zukünftigen Schwerpunkt. Nano-, Energie- und Umwelttechnologien sind danach einer der Schwerpunkte für die Kommunikation mit der Öffentlichkeit und der Politik. Werden Verbraucher nach den gewünschten Informationsquellen gefragt, so nennen mehr als die Hälfte (53 %) die Wissenschaft an erster Stelle. Auf den Plätzen 2 und 3 folgen die Industrie (51 %) und Behörden (35 %) /Grobe et al. 2008a/. Dies sollte nach /Grobe et al. 2013/ Wissenschaftler, die Industrie sowie öffentliche Einrichtungen dazu ermutigen, Informationen über nachhaltige und innovative nanotechnologische Anwendungsmöglichkeiten den Verbrauchern zur Verfügung zu stellen, denn bisher ist die Einstellung zur Nanotechnologie noch positiv und gerade nachhaltige Anwendungen im Bereich der Energiebereitstellung oder der Speicherung von erneuerbaren Energien könnten die notwendigen Beispiele liefern, um das aufkommende Gefühl der zu geringen Informationen und einer damit verbundenen negativen Einstellung bei den Verbrauchern zu begegnen. Die Zustimmung zu neuen Innovationen wie der Nanotechnologie ist stark verbunden mit einem verantwortungsvollen Umgang mit den Gefährdungspotenzialen und mit transparenten und verständlichen Informationen /Grobe et al. 2008a/.

Die Thematik der Akzeptanz und Wahrnehmung von neuen Technologien wird bereits 2006 für den Einsatz der weißen Biotechnologie in der Herstellung von chemischen Produkten diskutiert. Mit dem Ergebnis, dass die Allgemeinheit und entsprechende Interessensvertreter im Grundsatz eine positive Einstellung gegenüber organischen Chemikalien auf Basis der weißen Biotechnologie aufweisen. Dies kann vor allem auf den Einsatz von erneuerbaren Rohstoffen und die mit dem Einsatz der Biotechnologie verbundenen möglichen Einsparungen an nicht-erneuerbarer Energie in Verbindung gebracht werden /BREW 2006/. Auch nach /Nusser et al. 2007/ zeigt sich, dass die Verbraucherakzeptanz für die industrielle weiße Biotechnologie „in aller Regel kein Innovationshemmnis zu sein scheint“ und das Ausmaß der Verbraucherakzeptanz stark an verschiedene Anwendungsbranchen gebunden ist.

Für die Nanotechnologie lässt sich feststellen, dass bisher keine pauschalen Aussagen und Urteile über die Gefährdungspotenziale von Nanomaterialien für den Menschen und die Umwelt möglich sind. Unterschiedliche Studien können zwar die toxische Wirkung von Nanomaterialien auf Zellen oder die Umwelt nachweisen, doch fehlen bisher anerkannte und



validierte Toxizitätstestmethoden zur Untersuchung von Nanopartikeln. Erste Schritte in diese Richtung wurden im Rahmen des Projektes NanoCare durchgeführt (siehe /Kuhlbusch et al. 2009/). Auch der Sachverständigenrat für Umweltfragen stellt in einem Sondergutachten fest, dass „obwohl also manche Nanomaterialien problematische Eigenschaften besitzen, besteht nach heutigem Kenntnisstand die Herausforderung nicht so sehr in der konkreten Gefährlichkeit von Nanomaterialien, sondern darin, dass Risikoforschung und -regulierung mit der dynamischen Technikentwicklung kaum mithalten können“ /SRU 2011/. Das Gefahrenpotenzial biotechnologischer Prozessverfahren wird im Vergleich zu chemisch-technischen Verfahren entweder als geringer eingeschätzt (siehe /Hoppenheidt et al. 2005/) bzw. es wird davon ausgegangen, dass es mit dem bestehender z. B. petrochemischen Herstellungsverfahren verglichen werden kann (siehe /BREW 2006/).

Der verantwortungsvolle Umgang mit möglichen Gefährdungspotenzialen neuer Innovationen und die Bereitstellung von transparenten und verständlichen Informationen über deren Möglichkeiten und Auswirkungen stellen eine wichtige Grundlage bzw. den Schlüssel für deren Akzeptanz in der Bevölkerung dar. Bisherige Studien kommen zu dem Ergebnis, dass sowohl bei der Nanotechnologie als auch bei der Biotechnologie die Verbraucherakzeptanz kein Innovationshemmnis darstellt. Einen bedeutenden Einfluss auf die Einstellung der Bevölkerung zu einer neuen Innovation hat auch deren Anwendungsbereich. So wird z. B. der Einsatz der Nanotechnologie im Medizinbereich von einer deutlichen Mehrheit der Befragten positiv eingeschätzt, deren Einsatz im Bereich der Lebensmittel oder des Militärs jedoch überwiegend abgelehnt (siehe /Grobe et al. 2008a, Grobe et al. 2013/).



## 4 Beschreibung nanotechnologischer Anwendungen

Die Forschung und die daraus resultierenden neuen oder verbesserten Anwendungen, basierend auf der Nanotechnologie, stehen derzeit noch in der Anfangsphase. Die aus der Nanotechnologie resultierenden Auswirkungen auf die Wirtschaft und im Speziellen auf die Energiewirtschaft wurden noch nicht umfassend abgeschätzt (vgl. Kapitel 3.3.1). In den folgenden Kapiteln wird die Nanotechnologie definiert und es werden technische Grundlagen zur Herangehensweise der Nanotechnologie, zu Nanomaterialien und zu Herstellungsverfahren dargestellt. Kapitel 4.3 beschreibt nanotechnologische Anwendungen mit Relevanz für die Energiewirtschaft und in Kapitel 4.4 erfolgt die Ermittlung des theoretischen Potenzials der in den Szenarien- und Sensitivitätsanalysen (vgl. Kapitel 6) untersuchten Anwendungen und Prozessen.

### 4.1 Begriffsbestimmung und Einordnung von Nanotechnologie

Neben dem Versuch den Begriff Nanotechnologie zu definieren, erfolgt nachfolgend die Darstellung der historischen Entwicklung sowie den mit der Nanoskaligkeit verbundenen Besonderheiten.

#### 4.1.1 Definition und historische Entwicklung

Die Nanotechnologie kann nicht exakt abgegrenzt werden, da ihre wissenschaftlichen Grundlagen im Überschneidungsbereich verschiedener Naturwissenschaften, der Physik, Chemie und Biologie, liegen. Es kommen darüber hinaus auch Erkenntnisse der Ingenieurwissenschaften, z. B. des Maschinenbaus oder der Elektrotechnik, zum Einsatz /Hullmann 2001/. Nanotechnologie ist ein Sammelbegriff für eine große Zahl von Technologien, die sich mit Strukturen und Prozessen auf Nanometerskala befassen. Ein Nanometer ist ein Milliardstel Meter ( $10^{-9}$  m) und bezeichnet einen Grenzbereich, in dem das Verhalten von Materie nicht mehr mit den Gesetzen der klassischen Physik beschrieben werden kann, sondern zunehmend quantenphysikalische Effekte eine Rolle spielen /Paschen et al. 2004/. Bereits 1959 formulierte der Amerikaner Richard P. Feynman, Nobelpreisträger in Physik, die gezielte Manipulation von Materie auf atomarer Ebene als die Leitvision der Nanotechnologie.

„But I am not afraid to consider the final question as to whether, ultimately – in the great future – we can arrange the atoms the way we want; the very atoms, all the way down! What would happen if we could arrange the atoms one by one the way we want them [...]. What would the properties of materials be if we could really arrange the atoms the way we want them? [...] Atoms on a small scale behave like nothing on a large scale, for they satisfy the laws of quantum mechanics. [...] At the atomic level, we have new kinds of forces and new kinds of possibilities, new kinds of effects. The problems of manufacture and reproduction of materials will be quite different. [...] The principles of physics, as far as I can see, do not speak against the possibility of manoeuvring things atom by atom. It is not an attempt to

violate any laws; it is something, in principle, that can be done; but in practice, it has not been done because we are too big“ /Feynman 1960/.

In der Literatur existieren unterschiedliche Definitionen der Nanotechnologie. Dies liegt einerseits daran, dass es sich bei der Nanotechnologie um ein heterogenes Technologiefeld handelt, andererseits erschwert die Abgrenzung zu benachbarten Gebieten, wie z. B. der Mikroelektronik, der Chemie und Biotechnologie, eine allgemein gültige Definition.

Die Definition der Nanotechnologie lässt sich damit über zwei Kriterien herleiten. Das erste Kriterium charakterisiert die geometrischen Maßstäbe und stellt eine notwendige Bedingung dar. Neben der hier verwendeten Grenze von 100 nm gibt es in der Literatur auch andere, strengere Abgrenzungen. /Köhler 2001/ zählt zu Nanostrukturen im engeren Sinne nur solche Strukturen, die in mindestens zwei Dimensionen kleiner als 1 nm sind. Bei Nanostrukturen im weiteren Sinne verlangt er, dass eine Dimension kleiner 1 nm und eine zweite Dimension kleiner 1  $\mu\text{m}$  ist. Die Größendefinition der zweiten Dimension ist von Relevanz, da sie darüber entscheidet, ob mikrostrukturierte, ultradünne Schichten mit nur einer Dimension im Nanometerbereich zur Nanotechnologie gezählt werden. Das zweite Kriterium stellt klar, dass nicht nur die Geometrie sondern vor allem die Nutzbarmachung neuer Effekte und Eigenschaften für die Nanotechnologie entscheidend ist /Paschen et al. 2004/. Trotz der beiden festgelegten Kriterien gibt es eine Vielzahl an Grenzfällen, die einen Definitionsspielraum zulassen und eine scharfe Abgrenzung erschweren.

In ihrer Empfehlung vom 18. Oktober 2011 definiert die Europäische Kommission den Begriff „nanomaterial“ wie folgt: „Nanomaterial means a natural, incidental or manufactured material containing particles, in an unbound state or as an aggregate or as an agglomerate and where, for 50 % or more of the particles in the number size distribution, one or more external dimensions is in the size range 1 nm - 100 nm. In specific cases and where warranted by concerns for the environment, health, safety or competitiveness the number size distribution threshold of 50 % may be replaced by a threshold between 1 and 50 %. By derogation from the above, fullerenes, graphene flakes and single wall carbon nanotubes with one or more external dimensions below 1 nm should be considered as nanomaterials“ /EU 2011/.

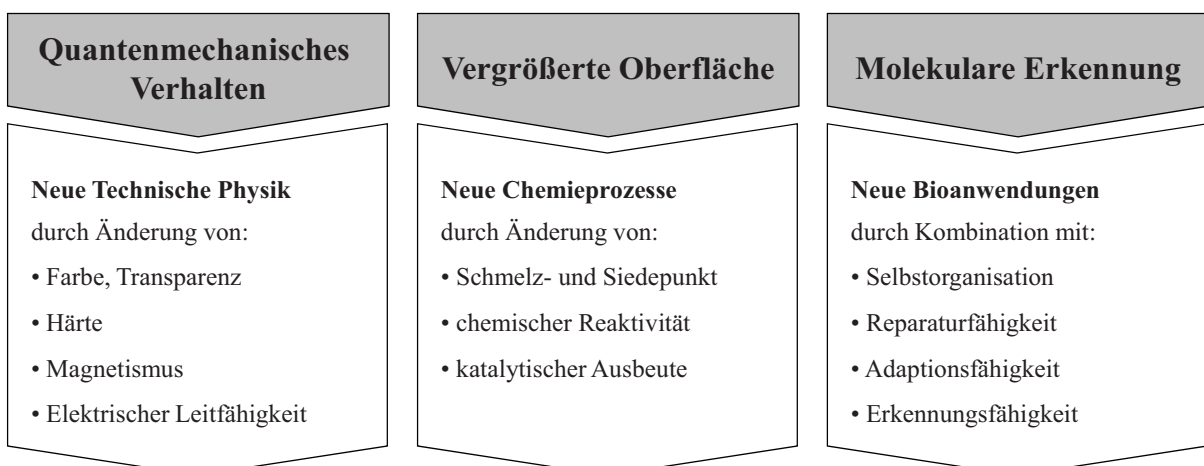
Für die folgenden Betrachtungen wird die nachfolgende Definition des Bundesministeriums für Bildung und Forschung verwendet: „Nanotechnologie beschreibt die Herstellung, Untersuchung und Anwendung von Strukturen, molekularen Materialien, inneren Grenz- und Oberflächen mit mindestens einer kritischen Dimension oder mit Fertigungstoleranzen (typischerweise) unterhalb 100 Nanometer (nm). Entscheidend ist dabei, dass allein aus der Nanoskaligkeit der Systemkomponenten neue Funktionalitäten und Eigenschaften zur Verbesserung bestehender oder Entwicklung neuer Produkte und Anwendungsoptionen resultieren. Diese neuen Effekte und Möglichkeiten sind überwiegend im Verhältnis von Oberflächen- zu Volumenatomen und im quantenmechanischen Verhalten der Materiebausteine begründet“ /Schulenburg 2006/.

Die Tatsache, dass sehr kleine Partikel eines Materials Eigenschaften besitzen, die von denen des Massivmaterials abweichen, war schon den Römern bekannt. Sie verwendeten feinste Goldpartikel oder auch Gold- / Silberpartikel, um Gläser mit markanten Farbeffekten zu verzieren. Ein Beispiel dafür sind Rubingläser. Von einer gezielten Verwendung der Na-

notechnologie kann dabei jedoch nicht gesprochen werden. Aus heutiger Sicht kann der amerikanische Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynman als erster Visionär der Nanotechnologie genannt werden, da er in seiner Rede vor der amerikanisch-physikalischen Gesellschaft im Jahr 1959 /Feynman 1960/ die Konsequenzen einer grenzenlosen Miniaturisierung aus Sicht der Theoretischen Physik konkret diskutierte. Feynman verwendete jedoch noch nicht den Begriff der Nanotechnologie. Dieser wurde durch den Japaner Norio Taniguchi im Jahr 1974 eingeführt. Er bezeichnete damit Technologien, die geeignet sind, die Rauigkeit von Materialoberflächen auf Sub-Mikrometer-Längenskalen zu kontrollieren. Als konkreter experimenteller Meilenstein in der Nanotechnologie kann die Entwicklung des Rastertunnelmikroskops im Jahr 1981 angesehen werden. Damit gelang es erstmalig, einzelne Atome abzubilden. Für diese Entwicklung wurden Gerd Binnig und Heinrich Rohrer 1986 mit dem Nobelpreis in Physik ausgezeichnet /Hartmann 2006/.

#### 4.1.2 Neue Eigenschaften durch Nanoskaligkeit

„Atoms on the small scale behave like nothing on a large scale, for they satisfy the laws of quantum mechanics. [...] At the atomic level, we have new kinds of forces and new kinds of possibilities, new kinds of effects.“ /Feynman 1960/. Ein makroskopischer Körper wird weitgehend durch die Gesetze der klassischen Physik beschrieben. Beim Übergang zur Nanoskala findet ein Wechsel hin zu einem mehr und mehr durch Quantenmechanik beschreibbaren Objekt statt. Darüber hinaus spielen Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften im Vergleich zu den Volumeneigenschaften eine immer größere Rolle /Paschen et al. 2004/. Nanotechnologie spielt sich in einem Übergangsbereich zwischen individuellen Atomen und Molekülen einerseits und größeren Festkörpern andererseits ab. In diesem Zwischenbereich treten Phänomene auf, die bei makroskopischen Gegenständen nicht beobachtet werden und auf quantenmechanischen Effekten, einer vergrößerten Oberfläche sowie auf molekularer Erkennung beruhen (vgl. **Abbildung 4.1**) /Heubach et al. 2005, Luther et al. 2004/.



**Abbildung 4.1:** Veränderungen von Eigenschaften in der Nanowelt (eigene Darstellung nach /Luther et al. 2004/)

Nach /Paschen et al. 2004/ verliert ein Nanopartikel seine typischen Festkörpereigenschaften und kann eher als ein großes Molekül betrachtet werden. Die elektronischen, chemischen und optischen Eigenschaften des Partikels ändern sich dabei oftmals drastisch mit der Partikelgröße. Eine wesentliche Grundlage vieler Eigenschaften von Nanomaterialien liegt im großen Verhältnis von Oberfläche zu Volumen.

Im Allgemeinen haben die Oberflächenatome nicht abgesättigte Bindungen, die eine hohe Reaktivität haben können und dadurch die chemischen Eigenschaften (z. B. katalytische Aktivität) beeinflussen können. Durch einen zunehmenden Oberflächenanteil steigt die Oberflächenenergie der einzelnen Teilchen, wodurch z. B. der Schmelzpunkt sinkt oder die Sinteraktivität steigt. Nanoskalige Materialien und Werkstoffe sind eine wesentliche Grundlage der Nanotechnologie, da sie außergewöhnliche Eigenschaften aufweisen, die in herkömmlichen Materialien nicht vorgefunden werden. Dazu zählen z. B. Superplastizität, erhöhte Härte, verringerte oder erhöhte Wärmeleitfähigkeit oder höherer elektrischer Widerstand /Paschen et al. 2004/. In **Tabelle 4.1** werden einige Anwendungsbeispiele für Effekte und Eigenschaftsänderungen in nanostrukturierten Materialien und Komponenten aufgeführt.

**Tabelle 4.1:** Anwendungsbeispiele für Eigenschaftsänderungen bei Nanomaterialien /Luther 2007b/

Materialeigenschaft	Beispiele für Effekte durch nanoskalige Konfiguration
<b>Chemisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhte Löslichkeit von Lebensmittelzusatzstoffen und medizinischen Wirkstoffen</li> <li>• Easy-To-Clean Eigenschaften von Oberflächen durch nanopartikeläre Beschichtungsmaterialien</li> <li>• Effizientere Abgaskatalysatoren in Automobilen durch vergrößerte Katalysatoroberflächen</li> <li>• Leistungsfähigere Batterien und Akkumulatoren durch höhere spezifische Elektrodenoberflächen</li> </ul>
<b>Mechanisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhte Gasdichtigkeit von Lebensmittelverpackungen durch Zusatz von Nanopartikeln oder Nanobeschichtungen</li> <li>• Verbesserte Kratzfestigkeit von Lacken durch keramische Nanopartikel</li> <li>• Hochbelastbare und verschleißfeste mechanische Komponenten durch nanostrukturierte Hartschichten</li> <li>• Verbesserte Steifigkeit von Sportgeräten durch Zusatz von Nanopartikeln</li> </ul>
<b>Optisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transparenter UV-Schutz in Kosmetika, Textilien oder Möbeln</li> <li>• Spezifische Fluoreszenzeigenschaften von Nanopartikeln in Abhängigkeit von der Partikelgröße für Sicherheitspigmente oder Markerstoffe in medizinischen Schnelltests</li> <li>• Spezielle Farbeffekte bei Farben und Lacken (z. B. Interferenzpigmente)</li> <li>• Selektive Lichtleitung und –steuerung durch photonische Kristalle</li> <li>• Antireflexeigenschaften bei Displays und Anzeigen</li> </ul>

Fortsetzung von **Tabelle 4.1:** Anwendungsbeispiele für Eigenschaftsänderungen bei Nanomaterialien /Luther 2007b/

Materialeigenschaft	Beispiele für Effekte durch nanoskalige Konfiguration
<b>Biologisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhte Durchlässigkeit für physiologische Barrieren (Membrane, Blut-Hirn-Schranke, etc.) in Medikamenten</li> <li>• Erhöhte Biokompatibilität durch Nanostrukturierung von Knochenersatzmaterialien und Wundverschlüssen</li> <li>• Antibakterielle Eigenschaften von Gebrauchsgegenständen durch Silbernanopartikel</li> </ul>
<b>Geometrisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Integrationsdichte von elektronischen Komponenten für miniaturisierte und hochleistungsfähige Computerchips</li> <li>• Nanoporöse Materialien für hochselektive Membranen, Katalysatoren oder thermische Dämmmaterialien</li> <li>• Selektive Hohlräume für Transport oder kontrollierte Abgabe spezifischer Moleküle</li> </ul>

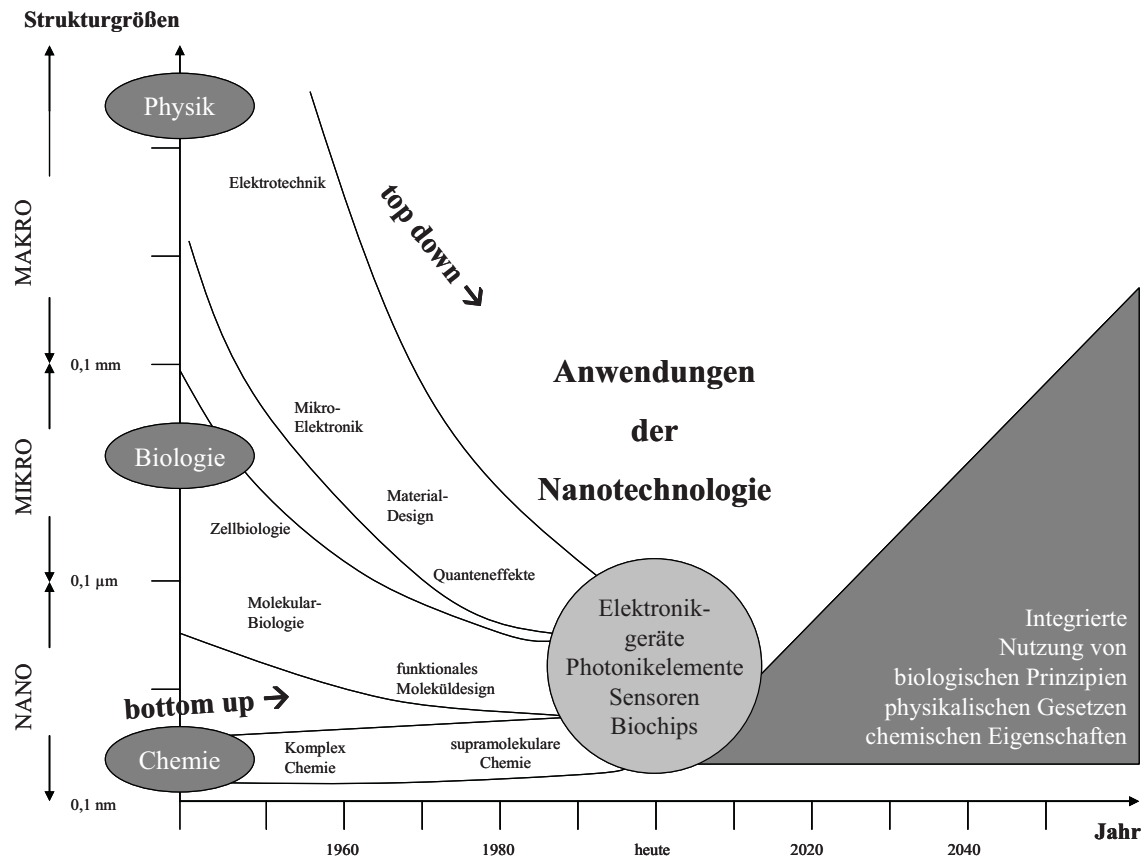
## 4.2 Wissenschaftliche und technische Grundlagen von Nanotechnologie

Bevor in Kapitel 4.2.3 unterschiedliche Herstellungs- und Analyseverfahren der Nanotechnologie beschrieben werden, befassen sich die beiden folgenden Abschnitte mit den unterschiedlichen Möglichkeiten, sich der Nanoskaligkeit zu nähern.

### 4.2.1 Top-down- und Bottom-up-Ansatz

Nach /Paschen et al. 2004/ gibt es zwei unterschiedliche Strategien, um in Nanodimensionen vorzustoßen. Der sogenannte Top-down-Ansatz, welcher die Physik und die physikalische Technik dominiert, und der Bottom-Up-Ansatz, welcher bislang eher durch die Chemie und Biologie repräsentiert wurde. Beim Top-down-Ansatz werden von der Mikrotechnik ausgehend Komponenten und Strukturen immer weiter miniaturisiert. Der wichtigste Treiber dieser Vorgehensweise ist die Elektronikindustrie. Im Vergleich dazu werden beim Bottom-up-Ansatz immer komplexere Strukturen gezielt aus atomaren bzw. molekularen Bausteinen aufgebaut. Die Natur nutzt den Bottom-up-Ansatz zum Aufbau komplexer biologischer Nanostrukturen, z. B. funktionale Biomoleküle oder Zellorganellen (vgl. **Abbildung 4.2**).





**Abbildung 4.2:** Generelle Entwicklungstendenzen in Bezug zur Nanotechnologie (eigene Darstellung nach /Bachmann 1998/)

#### 4.2.2 Nanomaterialien

Neben den Entwicklungstendenzen lässt sich die Nanotechnologie auch aus den grundlegenden geometrischen Arrangements von Atomen bzw. Molekülen erklären. Es kann dabei zwischen punktförmigen, linienförmigen, Schichtstrukturen unterschieden werden. **Tabelle 4.2** stellt ausgewählte Beispiele von Nanomaterialien und deren Anwendungsmöglichkeiten dar.

**Tabelle 4.2:** Beispiele für Nanomaterialien und mögliche Anwendungen /Haas et al. 2007/

Form	Materialien	Anwendungsbeispiele
<b>Partikel (Füllstoffe)</b> punktförmig	TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , Al-Oxid, ZnO, Antimon-Zinn-Oxid, Indium-Zinn-Oxid (ITO), C <sub>60</sub> -Fullerene, Ag	Füllstoffe für Composite, z. B. Nanopartikel für Lacke, transparente elektrische Leitfähigkeit, Antistatik, antimikrobielle Funktionen
<b>Formkörper</b> punktförmig	Metalle, Keramiken, Nanopartikel in metallischen oder keramischen Hartschichten	Keramische oder metallische Formkörper mit erhöhter Zähigkeit bzw. Härte
<b>Komposite</b>	Nanopartikel in Polymeren	Carbon Nanotubes zur mechanischen Verstärkung, Schichtsilikate in Polymeren für verbesserte Barrierewirkung (Flammschutz)
	Nanoporen	Wärmedämmung, Antireflexschichten

Fortsetzung von **Tabelle 4.2:** Beispiele für Nanomaterialien und mögliche Anwendungen /Haas et al. 2007/

Form	Materialien	Anwendungsbeispiele
<b>Fasern / Röhren</b> linienförmig	Carbon Nanotubes (CNT), Polymer-Nanofasern	Füllstoffe für Komposite (verbesserte elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit), Filtration
<b>Schichten</b>	Nanolackschichten, anorganisch-organische Hybridpolymere, Einfach- oder Mehrfachschichten Strukturierte Oberflächen (Ätzstrukturen, Prägungen)	Kratzfeste Schichten für Polymere, tribologische Schutzschichten für Metalle, photokatalytisch aktive Schichten, antimikrobielle Schichten Optik, Antireflex-Schichten, diffraktive optische Elemente, Lotuseffekt-Strukturen für verringerte Oberflächenenergie

### Punktförmige Strukturen

Punktförmige, in allen drei Dimensionen nanoskalige Strukturen treten als kristalline oder amorphe Nanopartikel, Nanoinseln, größere Moleküle oder Cluster auf. Ihre Eigenschaften können sich von denen eines Festkörpers aus dem gleichen Material deutlich unterscheiden. Beispielsweise werden Metalle bei sehr kleinen Teilchengrößen zu Isolatoren. Für punktförmige Strukturen ist charakteristisch, dass sie Eigenschaften aufweisen, die in einem Bereich zwischen den Eigenschaften von Festkörpern und Molekülen liegen. Nanopartikel besitzen im Verhältnis zu ihrem Volumen eine sehr große Oberfläche. Bei einem Nanopartikel mit einem Durchmesser von 10 nm liegen ca. 20 % der Atome auf der Oberfläche. Bei einem Nanopartikel mit 1 nm Durchmesser können sich über 90 % der Atome auf der Oberfläche befinden. Gerade elektronische und optische Eigenschaften von Nanopartikeln sind stark von der Größe abhängig. Beispielsweise lässt sich die Fluoreszenzfarbe von Cadmiumtellurid-Nanopartikeln durch Größenänderung von grün über gelb bis rot einstellen. Solche Nanokristalle eignen sich z. B. als Marker in biologischen Systemen oder zur Herstellung von Leuchtdioden /Paschen et al. 2004/.

Während in Nanopartikeln in der Regel die Atome nicht in einer definierten Zahl vorliegen müssen und deswegen häufig eine Verteilungsbreite in der Partikelgröße aufweisen, besitzen Cluster eine definierte Zahl von Atomen /Köhler 2001/. Unter einem Cluster versteht man eine geordnete Zusammenlagerung von Atomen eines oder mehrerer chemischer Elemente zu einem festen Partikel. Cluster weisen, im Unterschied zu Metall- oder Halbleiterkristallen, wie Atome oder Moleküle, diskrete elektronische Zustände auf. Daher werden gelegentlich auch die irreführenden Begriffe Nanoatom oder Quantenpunkt anstelle der Bezeichnung Cluster verwendet /Grüne et al. 2005/.

Quantenpunkte (engl. Quantum Dots) im eigentlichen Sinne sind Nanopartikel aus Halbleitermaterialien. Wenn Halbleitermaterialien klein genug werden, treten Quanteneffekte auf, die die Energie begrenzen und bei denen Elektronen und Elektronenlöcher existieren können. Ihre optischen Eigenschaften können in Abhängigkeit der Größe eingestellt werden, da die Energie in Bezug zur Wellenlänge (oder Farbe) steht. Es können daher Partikel herge-

stellt werden, die Licht einer bestimmten Wellenlänge (Farbe) emittieren oder absorbieren können. Solche Quantenpunkte können z. B. in Farbstoffsolarzellen oder in Quantenpunkt-LED eingesetzt werden /RS 2004/.

Wegen ihren außergewöhnlichen Eigenschaften und besonderen Struktur stellen Fullerene eine bedeutende Stoffklasse dar. Dabei handelt es sich um mehr oder weniger runde und aus 5-Ecken und 6-Ecken aufgebaute Käfigmoleküle aus Kohlenstoff von unterschiedlicher Größe. Sie haben geringe Dichten (ca.  $1,5 \text{ g/cm}^3$ ) und sind elektrische Nichtleiter /Binnenwies et al. 2003/. Fullerene bieten die Möglichkeit, fremde Atome in ihrem Inneren einzukapseln. Zu ihren besonderen Eigenschaften zählt eine nahezu perfekte Rotationssymmetrie, hohe mechanische Stabilität und sie bieten die Möglichkeit, funktionale Gruppen an das Molekül an räumlich selektiven und definierten Stellen zu binden /Paschen et al. 2004/. Das bekannteste und am einfachsten herzustellende  $C_{60}$ -Fulleren besteht aus 60 Kohlenstoffatomen, die eine Kugel mit einem Durchmesser von 0,7 Nanometern bilden. Die Atome sind dabei zu Fünf- und Sechsecken angeordnet, ähnlich eines Fußballs. Diese Fullerene könnten zukünftig in organischen Solarzellen zum Einsatz kommen /Boeing 2005/. Es sind inzwischen neben den  $C_{60}$ -Fullerenen auch weitere geradzahlige Fullerene im Bereich zwischen  $C_{36}$  und  $C_{100}$  bekannt. In Kombination mit Metallen der 1. und 2. Gruppe können Fullerene auch als Supraleiter fungieren. Eine Verbindung aus Rubidium (Rb) und einem  $C_{60}$ -Fulleren ( $Rb_3C_{60}$ ) leitet z. B. Strom bei einer Temperatur unterhalb von 28 K ohne elektrischen Widerstand /Binnenwies et al. 2003/.

Nanopartikel sind auch im Materialverbund von großem Interesse. Aus Nanopartikel bestehende Materialien können als Nanopulver, als Cluster zusammengesetzter Festkörper, als Nanokomposit, als Agglomerate oder als Nanostrukturen auf Festkörperoberflächen vorliegen. Durch Deposition von Nanokristallen können z. B. auf einer Oberfläche Nanoinseln hergestellt werden, die sich als Katalysator-Material eignen /Paschen et al. 2004/.

### **Linienförmige Strukturen**

Nanoröhren, Nanodrähte, Nanostäbe oder Nanogräben auf Oberflächen stellen Beispiele für linienförmige Strukturen dar. Die bisher am intensivsten untersuchte linienförmige Struktur sind Nanoröhren aus Kohlenstoff. Sie bestehen aus zylinderförmigen Graphitlagen und sind strukturell eng mit den Fulleren verwandt. Sie wurden 1991 eher zufällig bei der Erforschung eines neuen Verfahrens zur Herstellung von Fullerenen durch den japanischen Wissenschaftler Sumio Iijima entdeckt /Binnenwies et al. 2003/. Der Durchmesser von Nanoröhren reicht von 1 nm bis 100 nm und ihre Länge kann mehrere hundert Mikrometer betragen. Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon Nano Tubes, CNT) können in großen Mengen (Tonnenmaßstab) mit dem Verfahren der katalytischen chemischen Gasphasenabscheidung (Catalytic Chemical Vapour Deposition, CCVD) hergestellt werden. Dabei werden bei erhöhter Temperatur Kohlenwasserstoffe oder Kohlenmonoxid an Katalysatorpartikeln zersetzt. An der Oberfläche wachsen dann die Kohlenstoff-Nanoröhren. Es können neben einwandigen Nanoröhren auch mehrwandige Nanoröhren hergestellt werden. Es wird eine Vielzahl an möglichen Anwendungen für Kohlenstoff-Nanoröhren diskutiert. Wegen ihrer mechanischen Eigenschaften

(große Zugfestigkeit, hohe Stabilität) können sie als Fasern für Polymerverbundwerkstoffe eingesetzt werden und sie gelten als Kandidaten für uniaxiale Gleitlager (sog. Wälzlager) bzw. für harte und verschleißarme Schutzschichten. Wegen ihrer chemischen Eigenschaften werden auch Möglichkeiten der Wasserstoffspeicherung untersucht und diskutiert. Darüber hinaus könnten Nanoröhren als Katalysatorträger, als molekulare Filter oder Membranen sowie als Nanoreaktoren eingesetzt werden /Paschen et al. 2004/.

Neben den Nanoröhren zählen auch Nanostäbe (engl. Nanorods) zu den linienförmigen Strukturen. Dabei handelt es sich um dickere und kürzere Drähte mit einem Durchmesser von einigen Nanometern bis hin zu einigen zehn Nanometern sowie mit einer, auf den Durchmesser bezogen, ca. vier- bis zehnfachen Länge. Die Bemühungen zielen auf das Maßschneidern elektrischer und optischer Eigenschaften ab, da Abmessung und Geometrie Einfluss auf die Bandstruktur haben. Mögliche Anwendungen hierfür sind CdS-Nanostäbe für Photovoltaik-Anwendungen in hochflexiblen Kunststofffasern /Grüne et al. 2005/.

### **Schichtstrukturen**

Hinsichtlich des industriellen Einsatzes sind Schichtstrukturen ein sehr wichtiger Bereich der Nanotechnologie und in der Anwendung verbreitet. Sie finden ihren Einsatz in nahezu allen Zukunftstechnologien von der Mikroelektronik und Optik über die Medizin und Sensorik bis hin zu Verschleißschutzschichten /BMBF 2002/.

Diese Strukturen im Nanometerbereich ermöglichen bestimmte Effekte (z. B. Quanten-Effekte) oder sind Voraussetzung, um bestimmte Eigenschaften des Schichtmaterials zu nutzen. Teilweise sind entsprechende Produkte bereits auf dem Markt verfügbar (z. B. Computerfestplatten), andere Beispiele, wie antibakterielle, hydrophobe und oleophobe Textilbeschichtungen, stehen am Übergang von der Forschung und Entwicklung zur Anwendung. Im Bereich der Computerfestplatten sind verschiedenste nanotechnologische Schichtstrukturen bereits im Einsatz. Die hohe Speicherdichte von dem sog. Riesenmagnetwiderstand (Giant Magnetoresistance, GMR) beruht auf einem Schichtsystem aus Eisenschichten, die durch eine wenige nanometerdicke Chromschicht voneinander getrennt sind.

Weitere Schichtstrukturen mit großer technischer Bedeutung sind ultradünne organische Schichten aus festen Substraten, da mit ihrer Hilfe Oberflächeneigenschaften wie Benetzbarkeit, Gleitverhalten und Biokompatibilität gezielt verändert werden können. Einsatzbereiche ergeben sich in der Katalyse, in der Sensorik oder auch als Funktionsmaterialien wie lichtemittierende Polymerschichten /Paschen et al. 2004/. Auch für den Bereich der Energietechnik spielen Nanoschichten eine wichtige Rolle, da hier spezifische Eigenschaften wie große Oberflächenvolumen, hohe selektive Reaktivität oder die Fähigkeit zum Selbstaufbau (engl. self assembly) genutzt werden könnten. Darüber hinaus haben Nanoschichten den Vorteil, dass sie ressourcenschonend sind, und bei teuren Materialien (z. B. Platin) können Nanoschichten zur Kostensenkung beitragen. Beispiele hierfür sind Brennstoffzellen und Katalysatoren /RS 2004/.

## Porenstrukturen

Materialien mit definierter Porosität sind von großem wissenschaftlichem und technischem Interesse, da sowohl an der äußeren Oberfläche als auch durch das ganze Volumen des Materials hindurch Wechselwirkungen mit Atomen, Ionen oder Molekülen auftreten können. Es sind dabei Oberflächen von mehreren Quadratmetern pro Gramm möglich. Einsatzbereiche sind die Katalyse, Filtration, Gasseparation, Wärmedämmung und Antireflexionsbeschichtungen. Für den effizienten technischen Einsatz müssen Porenstrukturen in der Regel eine möglichst einheitliche Porengröße sowie eine gleichmäßige Verteilung der Poren über das hergestellte Werkstück aufweisen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der chemischen Modifikation der Porenoberflächen z. B. durch dünne Schichten aus Katalysatormaterialien wie Platin oder Rhodium.

Porenstrukturen weisen neben den beschriebenen funktionellen Aspekten auch Vorteile in strukturellen Anwendungen gegenüber massiven Werkstoffen auf, z. B. beim Leichtbau. Ein Herstellungsverfahren von Porenstrukturen stellt das Sol-Gel-Verfahren dar. Damit können z. B. hochporöse oxidische Gläser und Keramiken mit Dichten unter  $0,01 \text{ g/cm}^3$  synthetisiert werden /Paschen et al. 2004/. Porenstrukturen lassen sich aus einer Vielzahl von Werkstoffen relativ einfach herstellen. In der Industrie sind Zeolithe weit verbreitet /Grüne et al. 2005/. Es handelt sich dabei um natürlich vorkommende Mineralien, kristalline Aluminosilicate mit einer sehr großen Oberfläche. Zeolithe können als Katalysator in der petrochemischen Industrie eingesetzt werden /Edwards 2006/. Andere eignen sich als Adsorptionsmittel für kleine Moleküle (z. B. Wasser), zur Gastrennung (z. B. Stick- und Sauerstoff) /Binnenwies et al. 2003/ oder als Wärmespeicher. Nanoporöse Porenstrukturen werden auch in der Wärmedämmung und bei Antireflexbeschichtungen eingesetzt /Paschen et al. 2004/.

## Komplexe Strukturen

Durch Zusammenlagerung von molekularen Bausteinen mittels Wasserstoffbrückenbindungen können z. B. supramolekulare Strukturen entstehen. Der Aufbau von komplexen Strukturen kann unter geeigneten Bedingungen ohne äußere Steuerung und häufig spontan erfolgen. Wichtige supramolekulare Strukturen sind, aus nanotechnologischer Sicht, z. B. Flüssigkristalle und Proteinaggregate. Als Flüssigkristalle werden Stoffe bezeichnet, die eine kristallähnliche Fernordnung ihrer Bausteine aber lokale Beweglichkeit der einzelnen Moleküle besitzen. Die makroskopischen Materialeigenschaften werden dabei von der nanoskopischen Molekülstruktur gesteuert. Beispiele sind Displays oder optische Speicher. Weitere Anwendungsmöglichkeiten werden in den Bereichen Photoleiter, Reflektoren und der Farbstoffe gesehen. Bei der Photovoltaik sowie im Bereich der Medizin (Drug Delivery) werden den komplexen Strukturen ein gutes Zukunftspotential attestiert /Paschen et al. 2004/.

Verzweigte Polymere und Dendrieme stellen eine weitere wichtige Stoffklasse dar. Es handelt sich dabei um Strukturen, die sich durch eine dreidimensionale Verästelung selbst bilden. Dabei wächst das Molekül, wie eine Zwiebel, von innen nach außen mit jeder weiteren Verästelung um etwa einen Nanometer an /Edwards 2006/. Aufgrund ihrer variablen mo-



lekularen Architektur bieten Dendrieme vielfältige Möglichkeiten zur Gestaltung verschiedenster Funktionalitäten. Es können so z. B. im Inneren der Moleküle unterschiedlich große Hohlräume geformt und alle Bereiche des Makromoleküls funktionalisiert werden /Paschen et al. 2004/. Beispiele hierfür sind Flüssigkristallgitter, künstliche Antikörper, Biosensoren, Medikamente oder Displays (OLED). Weitere zukünftige Anwendungen finden sich in der Nano-Litografie, Elektronik, Photonik und der chemischen Katalyse. Auch in Batterien oder Photovoltaikmodulen könnten Dendrieme in Zukunft eine Rolle spielen /Edwards 2006/.

Hinsichtlich der Einsatzmöglichkeit in der Energiewirtschaft kommen prinzipiell alle genannten Strukturtypen in Frage. Schichtstrukturen sind bereits im industriellen Bereich weit verbreitet und spielen gerade im Bereich der Energietechnik eine wichtige Rolle. Aufgrund ihrer Vielfalt bieten auch linien- und punktförmige Strukturen eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten. So können z. B. Nanopartikel, Formkörper, Komposite oder Fasern und Röhren zur mechanischen Verstärkung bei Leichtbaumaterialien oder bei Windkonvertern eingesetzt werden. Nanoporöse Strukturen verbessern z. B. katalytische Vorgänge oder dienen als Wärmeisolator bzw. Antireflexschichten. Komplexe Strukturen finden Anwendung bei energieeffizienten Displaytechnologien oder in der Batterie- und Photovoltaikentwicklung.

### **4.2.3 Herstellungsverfahren und Werkzeuge der Nanotechnologie**

Für die industrielle Produktion der beschriebenen Nanostrukturen ist die Verfügbarkeit präparativer und analytischer Verfahren maßgeblich, die es gestatten, eine Komponente, ein Bauelement oder einen Werkstoff in ausreichender Quantität herzustellen und die Qualität zu überwachen. Der industrielle Aspekt der Nanotechnologie wird in großem Maße durch die Funktionalisierung von Werkstoffoberflächen repräsentiert. Ein Synonym dafür ist z. B. der Lotus-Effekt. Im Bereich der Oberflächenfunktionalisierung werden teilweise seit langem bekannte Strategien eingesetzt, z. B. die keimtötende Wirkung von Silberpartikeln. Der innovative Charakter der Nanotechnologie besteht im Einsatz von nanoskaligen Partikeln in Form neuartiger Kompositwerkstoffe, bei denen die Bestandteile zwar bekannt, ihre Zusammensetzung zum Gesamtmaterial jedoch neu ist. Top-down- und Bottom-up-Verfahren zur Herstellung von Nanomaterialien und Nanostrukturen werden zunehmend zusammenwachsen. Bei der Herstellung von Schlüsselkomponenten, wie beispielsweise Fullerenen, Polymeren oder supramolekularen Bausteinen, die dann mit weiteren Strukturen zu kompletten Bauelementen zusammengesetzt werden, kommen Bottom-up-Verfahren zum Einsatz. Die Anbindung des Bauelements an die makroskopische Umgebung erfolgt anschließend mittels Top-down-Verfahren. Im Bereich der Bauelemente stellen sog. mix-and-match-Ansätze zwischen Top-Down- und Bottom-Up-Verfahren eine wichtige Grundlage dar /Hartmann 2006/. Da bereits eine große Vielfalt an Technologien, die eingesetzt und weiterentwickelt werden, existiert, werden in diesem Kapitel die wichtigsten Herstellungsverfahren und Methoden der Nanoanalytik vorgestellt. Nanopartikel und Nanostrukturen, bei denen zumindest eine Dimension nanoskalig ist, können aus Ausgangsstoffen aller drei Phasen hergestellt werden. In der Regel handelt es sich bei den Prozessen um altbekannte Verfahren, die hinsichtlich der Kontrolle,

Zusammensetzung und Strukturierung der nanoskaligen Werkstoffe optimiert wurden /Paschen et al. 2004/. Im Rahmen der Arbeit werden die bedeutendsten Prozesstechnologien dargestellt (für weiterführende Literatur siehe /Grüne et al. 2005/), die sich in fünf Gruppen untergliedern:

- Gasphasenabscheidung
- Herstellung aus flüssiger oder gelöster Ausgangssubstanz
- Herstellung aus festen Ausgangssubstanzen
- Lithographie
- Selbstorganisation

Beim Verfahren der Lithographie handelt es sich um einen Top-down-Ansatz. Die anderen vier Verfahren zur Herstellung von Nanostrukturen vertreten den Bottom-up-Ansatz. Verfahren zur Qualitätskontrolle von Objekten auf der Nanoskala werden unter dem Begriff der Nanoanalytik zusammengefasst und nachfolgend, neben den Herstellungsverfahren, beschrieben.

### **Gasphasenabscheidung**

Die Gasphasenabscheidung wird hauptsächlich zur Herstellung von dünnen Schichten aus gasförmigen Ausgangssubstanzen eingesetzt. Es können damit auch Nanopulver und Quantenpunkte erzeugt werden /Steinfeldt et al. 2004/. Verfahren der Gasphasenabscheidung sind für industrielle Prozesse von besonderem Interesse, da sie oft kontinuierlich betrieben werden können.

Der Begriff Chemical Vapour Deposition (CVD) umfasst alle Verfahren, bei denen ein Ausgangsmaterial verdampft und anschließend auf einer Substratoberfläche kondensiert wird. Die entstehende Schicht entspricht dabei entweder dem Ausgangsmaterial, oder ein neues, verändertes Material kann durch eine chemische Reaktion entstehen. In der Regel finden CVD-Verfahren im Vakuum statt /Theodore et al. 2005/. Wichtige CVD-Verfahren sind z. B. thermische CVD, Plasma-aktivierte CVD, Photo-CVD sowie das katalytische CVD, welches zunehmend bei der Herstellung von Kohlenstoff-Nanoröhren angewendet wird /Steinfeldt et al. 2004/.

Beim Physical Vapour Deposition (PVD) Verfahren wird festes Ausgangsmaterial durch physikalische Einwirkungen (z. B. thermische Energie) im Vakuum in die Gasphase überführt, wo die Kondensation auf dem Substrat einen dünnen Film bildet. Der Vorteil bei diesem Verfahren liegt in den relativ niedrigen Abscheidetemperaturen, wodurch ein besonders großes Spektrum zu beschichtender Materialien eingesetzt werden können. Zu den PVD-Verfahren gehören das Aufdampfen, das Sputtern (Kathodenzerstäubung), das Ionenplattieren und die Molekularstrahl-Epitaxie /Grüne et al. 2005/.

Aerosol-Techniken basieren auf der Zerstäubung eines flüssigen Ausgangsmaterials in feinste Tröpfchen innerhalb eines gasförmigen Mediums. Nach dem Einbringen des Aerosols in eine beheizte Reaktorzone wird das Lösungsmittel verdampft oder verbrannt. Dadurch lassen sich z. B. hochreine Materialien, ultrafeine poröse und nicht poröse Pulver oder dünne Filme auf Substraten erzeugen. Von besonderer Bedeutung ist das Pyrosol-Verfahren. Hierbei



wird das Aerosol durch ein Trägergas in der Nähe des zu beschichtenden Substrats zersetzt und schlägt sich in Form von Produktdampfpartikeln auf der Substratoberfläche nieder /Grüne et al. 2005/.

Bei den Flammenverfahren (engl. Flame-Assisted Deposition) werden Nanopartikel durch die Zersetzung von flüssigen oder gasförmigen Ausgangsstoffen in einer Flamme hergestellt. Die Teilchengröße und die Kristallstruktur lassen sich durch die Variation der Konzentration der Reaktionspartner, der Flammentemperatur sowie der Verweilzeit der Ausgangsstoffe in der Flamme variieren /Steinfeldt et al. 2004/. Zur Herstellung von dünnen Schichten sind Flammenverfahren nicht geeignet /Grüne et al. 2005/. Im industriellen Maßstab werden nanoskalige Industrieruße (sog. Carbon Black) mit Flammenverfahren hergestellt /Degussa 2004/.

### **Herstellung aus flüssiger oder gelöster Ausgangssubstanz**

Zur Herstellung verschiedenster nanotechnologischer Produkte wie Pulver, dünner Schichten, Aerogele und Fasern stellt das Sol-Gel-Verfahren ein wichtiges nasschemisches Verfahren dar. Es bietet die Möglichkeit organische und anorganische Komponenten zu verbinden, d. h., organisch modifizierte Produkte zu erzeugen /Steinfeldt et al. 2004/. Beim Sol-Gel-Verfahren entstehen in einem ersten Schritt durch die Reaktion flüssiger Komponenten größere Moleküle oder Nanopartikel in der Lösung. Das Sol wird gebildet, welches anschließend in den Gelzustand überführt wird. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten. Die gebildeten Moleküle können über chemische Reaktion weiter- und zusammenwachsen, oder es werden Sole eingedickt, bis sie ein Gel bilden. Durch Destabilisierung der Sole bzw. Gele lassen sich Nanopartikel von definierter Größe ausfällen /Grüne et al. 2005/. Der Fällungsvorgang wird durch Zusatz geeigneter Substanzen ausgelöst. Dadurch ändert sich entweder die Zusammensetzung des Lösungsmittels, wodurch der auszufällende Stoff in diesem schwer bzw. unlöslich wird, oder es bildet sich eine neue Verbindung, deren Löslichkeit geringer als ihre Konzentration in der Lösung ist. Die Bildung der Nanopartikel verläuft schrittweise über kristalline Keime oder amorphe Primärpartikel bis zu Partikel-Agglomerationen ab. Die Partikelgröße kann durch Zugabe von Reagenzien kontrolliert werden /Paschen et al. 2004/.

### **Herstellung aus festen Ausgangssubstanzen**

Direkt aus Festkörpern lassen sich Nanopulver durch mechanisches Einwirken (Mahlen) erzeugen. Beim mechanischen Mahlen in Hochenergiemøhlen lassen sich mit einer hohen Durchsatzrate Nanopartikel herstellen. Dabei wird der in der Regel pulverförmige Ausgangsstoff in einem Mahlbehälter von Mahlkörpern trocken oder nasstechnisch bearbeitet. Durch den Einsatz von Kleinstmahlkörpern mit Durchmessern von 0,2 bis 0,5 mm lassen sich Partikel mit Durchmessern zwischen 40 und 100 nm erzielen /Grüne et al. 2005/.

Durch gezielte Wärmebehandlung bei Temperaturen unterhalb der Schmelztemperatur, dem sog. Tempern, lassen sich in festen Stoffen Festkörperreaktionen anregen, die strukturelle Umwandlungen zur Folge haben können. Mit diesem Verfahren ist es z. B. möglich,

dass amorphe Metalle oder Legierungen, die durch sehr schnelles Abkühlen einer Schmelze hergestellt wurden, durch kontrolliertes Anlassen eine nanokristalline Struktur ausbilden /Grüne et al. 2005/.

Auch durch starke mechanische Deformation lassen sich in Metallen und Legierungen Strukturen im Nanometerbereich erzeugen. Beispiele für derartige Verfahren sind die Equal-Channel-Angular-Extrusion-Methode (ECAE), bei der eine zylindrische oder eine quaderförmige Probe entlang eines Kanals um eine Ecke gepresst wird. Wird dieser Vorgang mehrfach wiederholt, lassen sich hohe Verformungsgrade erzielen. Beim Hochdruck-Torsions-Verfahren (High Pressure Torsion, HPT) werden dünne Plättchen verwendet, die unter einem hohen hydrostatischen Druck verdrillt werden. Während der plastischen Verformung wird eine große Defektdichte im Material erzeugt, wodurch es zur Ausbildung von Subkörnern kommt. Mit steigender Verformung nimmt die Größe dieser Körner ab /Grüne et al. 2005/.

### **Lithographie**

Bei der optischen Lithographie werden durch steigende Verfeinerung und Miniaturisierung Nanostrukturen erschaffen. Die Lithographie ist das am meisten verwendete Verfahren zur Herstellung von Nanostrukturen und wird z. B. zur Herstellung von Mikrochips verwendet. Durch strukturierte Masken werden Licht- oder Röntgenstrahlen auf eine Probeoberfläche projiziert, die mit einem Photolack überzogen ist. Durch Ätzprozesse kann die nach der Entwicklung des Lacks abgebildete Struktur auf das Substrat übertragen werden. Die kleinstmöglichen erzielbaren Strukturen sind von der Wellenlänge des Lichts bestimmt. Da Produktionsprozesse mit UV-Licht (Wellenlänge 248 nm) an einer Grenze angelangt sind, wird an F2-Laserlichtquellen (156 nm) und Röntgenlicht (13,5 nm) zur weiteren Miniaturisierung der Nanostrukturen geforscht /Paschen et al. 2004/. Ein von der Carl Zeiss AG angeführtes Konsortium untersucht im Rahmen eines vom BMBF geförderten Forschungsvorhabens die Einsatzmöglichkeiten von Strahlung im extremen UV-Bereich, die sog. EUV-Lithographie (Extreme Ultra Violet Lithography), mit dem Ziel, diese von der industriellen Grundlagenforschung zu einer voll einsetzbaren Produktionstechnologie für die Serienproduktion voranzutreiben (/Zeiss 2011/).

### **Selbstorganisation**

Im eigentlichen Sinne ist Selbstorganisation kein technisches Verfahren, sondern vielmehr ein molekulares Bauprinzip, nach dem auch Wachstums- und Strukturbildungsprozesse in der Natur ablaufen. Es fügen sich bei diesem Prozess Moleküle, Atome oder Partikel zu funktionierenden Einheiten zusammen. Dabei ist ein zentrales Merkmal, dass die Informationen zur Strukturbildung in den einzelnen Bausteinen gespeichert sind. Ein Verfahren zur Herstellung selbstorganisierter Strukturen, welche kommerziell genutzt wird, ist die selbstorganisierte Monoschicht. Es lassen sich mit diesem Verfahren ultradünne Schichten herstellen, deren Struktur durch die Anordnung der Substratatome vorgegeben ist, da die angelagerten Moleküle eine chemische Bindung mit diesen eingehen /Steinfeldt et al. 2004/.

## Nanoanalytik

Unter Nanoanalytik versteht man alle Methoden und Instrumente, die sich zur Analyse und Qualitätskontrolle von Objekten auf der Nanoskala eignen. Sie ist dadurch ein unabdingbarer Bestandteil der Nanotechnologie. „Die Tür zur Nanowelt wurde 1981 mit der Entwicklung des Rastertunnelmikroskops aufgestoßen, mit dem es erstmals gelang, atomare Strukturen direkt sichtbar zu machen. Im Gefolge wurden das Tasterkraftmikroskop sowie weitere Rastersondenverfahren entwickelt“ /Paschen et al. 2004/. Das Verfahren der Rastertunnelmikroskopie stellt einen Meilenstein im Entstehungsprozess der Nanotechnologie dar und in der Nanoanalytik sind Rastersondenverfahren (sog. SPM-Verfahren) von großer Bedeutung. Bei diesem Mikroskopieverfahren (mit atomarer Auflösung) wird das Substrat mit einer Mikrosondenspitze rasterförmig abgetastet und die auftretenden physikalischen und chemischen Wechselwirkungen zwischen Substrat und Sonde werden gemessen. Zu den Rastersondenverfahren gehören eine Vielzahl von Mikroskopievarianten /Luther et al. 2004/:

- Rasterkraftmikroskopie (AFM)
- Rastertunnelmikroskopie (STM)
- Raster-Nahfeld-Optische-Mikroskopie (SNOM)

Nachfolgend wird das Verfahren der Rastertunnelmikroskopie herausgegriffen und erläutert. Das Rastertunnelmikroskop nutzt den quantenmechanischen Effekt aus, dass bei Annäherung einer feinen Spitze an die Oberfläche einer Probe bereits vor dem Kontaktschluss Elektronen auf die andere Seite hinübergelangen („tunneln“) können /Paschen et al. 2004/. Dabei ist der Tunnelstrom proportional zum Abstand zwischen der Sondenspitze und der Oberfläche. Je näher sich die Spitze an der Oberfläche befindet, umso größer ist der Strom /Edwards 2006/. Rechnergestützt kann dadurch aus dem gemessenen Tunnelstrom-Signal ein topografisches Abbild der zu untersuchenden Oberfläche ermittelt werden, indem die Spitze in einem Zeilenraster über die Probe geführt wird. Bei Isolatoren und schlecht leitenden z. B. oxidierten Oberflächen kann das Rastertunnelmikroskop jedoch nur schwer angewendet werden /Paschen et al. 2004/.

### 4.3 Nanotechnologische Anwendungen und Produkte mit Auswirkungen auf die Energiewirtschaft

Nanotechnologien können in allen Phasen der Wertschöpfungskette im Energiesektor eingesetzt werden. Dabei kann es sich um Additive (z. B. Nanopartikel, Fullerene oder Nanoröhren) handeln, die dem Werkstoff zugegeben werden, um die vorhandenen Werkstoffeigenschaften zu verbessern oder sie sind selbst Basismaterial eines innovativen Werkstoffes mit neuen Eigenschaften. Der Überblick über mögliche Einsatzbereiche (vgl. **Abbildung 4.3**) der Nanotechnologie im Energiesektor zeigt deutlich die Breite der Einsatzmöglichkeiten. Nanotechnologien haben das Potenzial, die Energieeffizienz in allen Industriebranchen durch neue technologische Lösungen und optimierte Produktionstechnologien zu verbessern. Sie können auch der regenerativen Energieerzeugung zu einem breiten wirtschaftlichen Durchbruch ver-

helfen. Insgesamt werden sich durch die Nanotechnologie langfristig wesentliche Beiträge für eine nachhaltige Energieversorgung und eine weltweite Klimaschutzpolitik erzielen lassen /Luther 2008/. Im Rahmen der Identifikation von Einssatzmöglichkeiten und systematischen Analyse der Auswirkungen von Basisinnovationen (vgl. Kapitel 2.1 und 2.2) werden im Folgenden Anwendungen mit Relevanz für die Energiewirtschaft detailliert erläutert. Diese Ergebnisse dienen als Grundlage für die in Kapitel 6.1 beschriebene Szenarienenalyse. Für weitere Übersichten zu Einsatzmöglichkeiten der Nanotechnologie wird z. B. auf folgende Literatur verwiesen /Greiner et al. 2009, Haas et al. 2007, Heubach et al. 2005, Luther 2007a, Luther et al. 2011, Noack 2007, Pastewski et al. 2009, Wagner et al. 2006, Werner et al. 2006/.

### **4.3.1 Energieerzeugung und -wandlung**

Auf dem Gebiet der Energieerzeugung werden ausgewählte nanotechnologische Anwendungsbeispiele im Bereich der Solarthermie und der Photovoltaik detailliert dargestellt. Es werden der Einsatz von funktionalen Beschichtungen (antireflex, spektral selektiv, selbstreinigend) als auch neuartige Photovoltaiktechnologien betrachtet. Nanotechnologische Anwendungen und Verbesserungen im Bereich der Energiewandlung sind z. B. Brennstoffzellen, Kraftstoffadditive, der Einsatz von Nanomembranen, thermoelektrische Generatoren oder auch neue Werkstoffe und Beschichtungen im Kraftwerksbereich.

#### **Photovoltaik und Solarthermie**

Für die Nutzung der Sonnenenergie zur Energiebereitstellung können verschiedene Systeme verwendet werden. Es wird dabei zwischen solarthermischen Anlagen, bei denen die Sonnenstrahlen als Wärmequellen dienen, und der Photovoltaik, welche die Sonnenstrahlung direkt in Strom umwandelt, unterschieden. Die Solarthermie wird zur Brauchwassererwärmung oder Heizungsunterstützung in Gebäuden und in thermischen Großkraftwerken genutzt, wo z. B. Wasser mit Hilfe konzentrierter Sonnenstrahlung verdampft und damit in einer Turbine Strom erzeugt wird. Die Nanotechnologie kann hier z. B. in Form von Antireflexschichten sowie Beschichtungen, welche die Energieabsorption verbessern, eingesetzt werden. Im Bereich der solaren Energiegewinnung besitzen nanotechnologische Ansätze ein großes Potenzial. Neben der Entwicklung von herkömmlichen, meist auf Silizium basierenden Solarzellen wird an neuen, innovativen Solartechnologien geforscht. Forscher an der ETH Zürich wollen durch den Einsatz der Nanotechnologie, die Ausbeute deutlich erhöhen und sie arbeiten auch an der Erzeugung von Wasserstoff direkt aus Sonnenlicht /Müller 2011/.

Zu den neuen Technologien zählen z. B. Farbstoffsolarzellen und organische Polymersolarzellen, von denen eine entscheidende Kostenreduktion erwartet wird. Die notwendigen Durchbrüche basieren dabei auf der Nanotechnologie. Auch bei etablierten Halbleitersolarzellen kann die Umwandlung von solarer Energie in elektrischen Strom durch Verwendung nanotechnologischer Werkstoffe zu Effizienzsteigerungen führen /Paschen et al. 2004/.

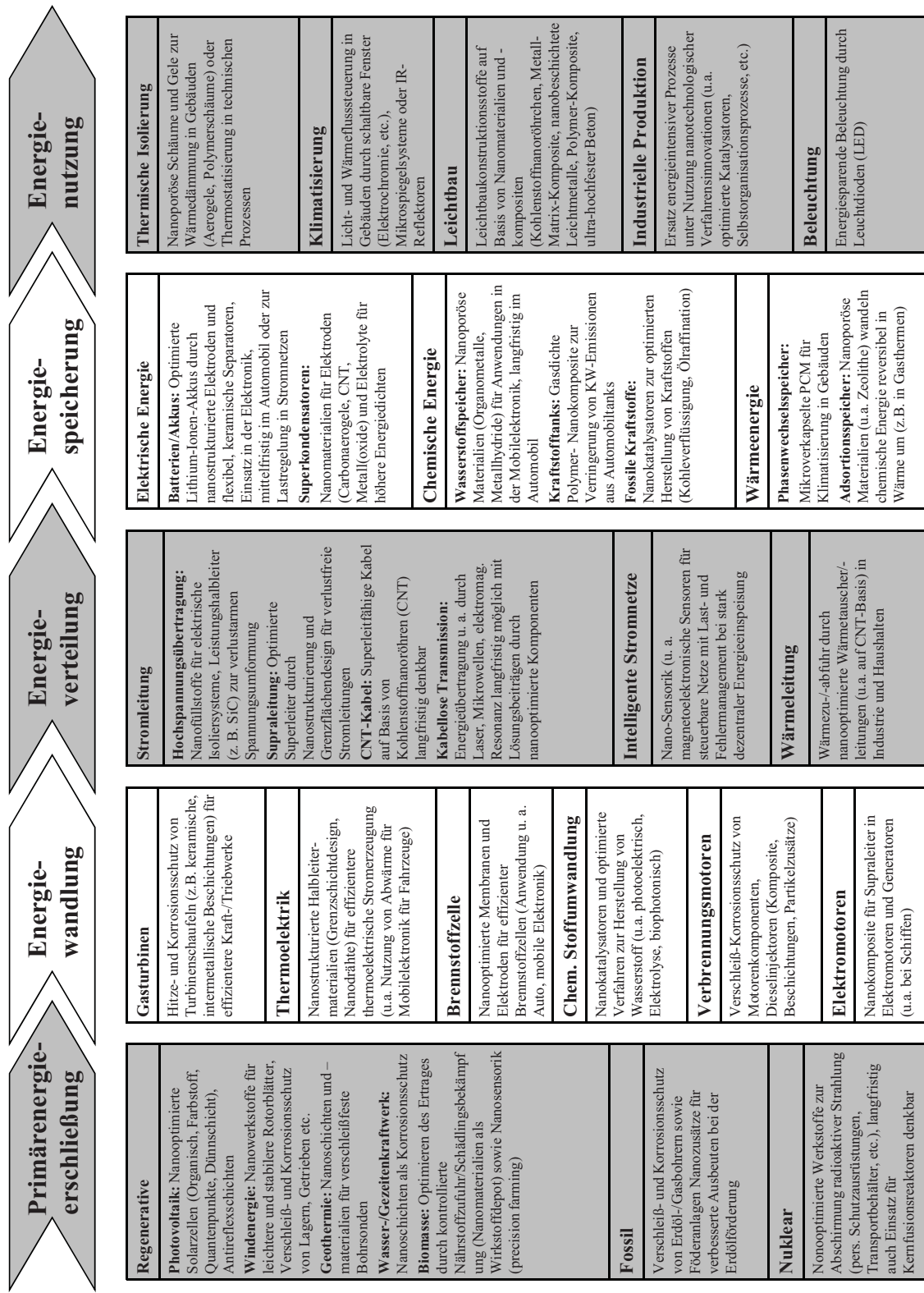


Abbildung 4.3: Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie im Energiebereich /Luther 2008/



Dabei geht es primär um eine Funktionalisierung durch nanostrukturierte Beschichtungen. Es wird neben der Effizienzsteigerung erwartet, dass sich die Kosten zur Herstellung von photovoltaischen Elementen, die bislang mittels etablierter Siliziumtechnologie gefertigt werden, um bis zu 80 % reduzieren lassen /Hartmann 2006/.

Antireflexschichten und selbstreinigende Beschichtungen können die Effizienz sowohl von thermischen Solarkollektoren als auch von Photovoltaikmodulen verbessern.

### **Antireflexschichtungen**

Durch Reflexion gehen bei Solarzellen ca. 8 % der Sonnenstrahlung und weitere 2 % durch Streuung und Absorption verloren. Nach Abzug dieser Verluste beträgt die solare Transmission lediglich 90 % /Hofmann 2006/. Durch nanoskalige Funktionsschichten, die antireflexierend wirken und dadurch die Transmission von Glas erhöhen, kann die Effizienz von Solarkollektoren vergrößert werden /Hartmann 2006/. Antireflexschichten bestehen aus porösem Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ).  $\text{SiO}_2$ -Partikel (mit Durchmessern von 20 bis 50 nm) werden mittels Sol-Gel-Verfahren (vgl. Kapitel 4.2.3) auf das Glassubstrat aufgebracht und anschließend bei Temperaturen von 650 °C thermisch gehärtet. Bei optimalen Schichtdicken von 150 nm wird die Oberreflexion auf Glas von 8 % auf 2 % reduziert, sodass nahezu das gesamte Spektrum des Sonnenlichts (von 400 nm bis 2.500 nm) energetisch genutzt werden kann /HA 2005/. Neben Photovoltaikmodulen können Antireflexbeschichtungen auch bei Warmwasserkollektoren /Hofmann 2006/ und Hochtemperaturreceiver für solare thermische Kraftwerke (/Kuckelkorn 2006, Uhlig 2007/ eingesetzt werden. Bei PV-Modulen kann die Leistung durch den Einsatz von Antireflexglas um mindestens 3,5 bis 4 Prozentpunkte, bei Warmwasserkollektoren um 5 bis 6 Prozentpunkte erhöht werden /Hofmann 2006/. Weitere Vorteile durch den Einsatz von  $\text{TiO}_2$  sind eine beträchtliche Steigerung der Oberflächenhärte, sowie der Kratz- und Abriebfestigkeit /Hartmann 2006/. Breitbandbeschichtungen über das ganze Lichtspektrum wären als Antireflexionsschichten ideal. Dazu bräuchte man jedoch eine Kombination mehrerer Schichten, die jeweils einen Teil des Spektrums nutzbar machen. Solche Kombinationen sind jedoch sehr teuer, daher wird in der Praxis meist nur eine Einzelschicht aus  $\text{SiN}_x$  oder  $\text{TiO}_2$  verwendet /Paddon et al. 2008/.

### **Selbstreinigende Beschichtungen**

Neben Reflexion wird der Wirkungsgrad von Solarzellen und Solarkollektoren durch Verschmutzungen beeinträchtigt. Abhilfe könnte hier der Lotuseffekt schaffen, welcher die zwei wesentlichen Eigenschaften Superhydrophobie und Selbstreinigung vereint. Physikalisch lässt sich der Lotuseffekt auf die Noppenstrukturen auf der Blattoberfläche zurückführen. Diese Noppenstrukturen verhindern, dass selbst Wasser auf der Blattoberfläche haften bleibt. Diese Entdeckung war revolutionär, da sie widerlegte, dass glatte Oberflächen besser zu reinigen seien als raue /Rossman et al. 2005/.

Die technische Umsetzung konzentriert sich auf die Entwicklung geschickter Kombinationen hydrophober Materialien und Oberflächenstrukturen /Jopp 2006/. Es bestehen jedoch noch Probleme mit der praktischen Anwendung. So sind die Schichten nicht völlig transparent und werden relativ leicht abgerieben /Hartmann 2006/. Des Weiteren sind auch Beschichtungsmaterialien auf Basis photokatalytischer  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel möglich. An die-

sen Partikeln oxidieren organische Verschmutzungen in Verbindung mit Sonnenlicht und Feuchtigkeit und können anschließend abgewaschen werden.  $\text{TiO}_2$  absorbiert jedoch UV-Strahlung, weshalb die Wirkungsgradsteigerung durch eine saubere Oberfläche den Wirkungsgradverlusten durch die UV-Absorption entgegen gerechnet werden muss. Wissenschaftliche Erfahrungswerte gibt es nach /Groß 2006a, 2006b/ keine.

### **Photovoltaiktechnologien**

Da nur ein Teil des solaren Spektrums für die Stromerzeugung genutzt werden kann, ist es bei Antireflexschichtungen unerwünscht, wenn Licht aller Wellenlängen optimal eingekoppelt wird. Damit die Solarzelle nicht durch das Licht photovoltaisch nicht nutzbarer Wellenlängenbereiche aufgeheizt wird, sind spektral selektive Eintrittsfenster erwünscht /Paschen et al. 2004/. Eine solche Selektivität wird z. B. durch eine Beschichtung mit Silber-Nanopartikeln ermöglicht /Grüne et al. 2005/. Diese Partikel haben einen Durchmesser von ungefähr 100 nm. Durch einen thermischen Verdampfungsprozess werden die Nanopartikel auf der Oberfläche der Solarzelle erzeugt, die nach dem Erstarren durch die Oberflächenspannung koaleszieren. Die Partikel befinden sich auf einer dielektrischen Beschichtung, wobei das dielektrische Material so gewählt wird, dass die Schicht wie eine Lichtfalle wirkt /Lewis et al. 2005/. Simulationen zur Ermittlung der Lichtabsorption zeigen nach /Paddon et al. 2008/, dass spektral selektive Schichten aus Silber-Nanopartikeln eine potenzielle Erhöhung des Wirkungsgrades um 24 % ermöglichen.

Neben der Verbesserung bestehender Photovoltaiktechnologien bietet die Nanotechnologie eine Vielzahl an neuen Möglichkeiten im Bereich der Photovoltaik. Nachfolgend werden einige innovative, auf der Nanotechnologie basierende Solarzellentypen näher beschrieben.

#### *Dünnschichtsolarzellen*

Dünnschichtsolarzellen bestehen aus dünnen Halbleiterschichten mit Dicken in der Größenordnung von 1  $\mu\text{m}$ , etwa um den Faktor 100 kleiner als mono- oder multikristalline Silizium-solarzellen. Sie werden hauptsächlich auf Basis von amorphem Silizium (a-Si), Cadmium-Tellurid (CdTe) und Kupfer-Indium-(Gallium)-Diselenid (Cis oder CIGS) hergestellt. Dünnschichtsolarzellen haben den Vorteil, dass aufgrund ihrer Dicke bei der Herstellung deutlich weniger Material eingesetzt werden muss, und sie weisen trotzdem einen relativ guten Wirkungsgrad auf. Weitere Vorteile liegen darin, dass auch bei Temperaturschwankungen und suboptimalen Strahlungsverhältnissen (Lichteinfallswinkel, Bewölkung) der Wirkungsgrad relativ konstant bleibt. Im Vergleich zur Silizium-Wafertechnologie ermöglichen Dünnschichtsolarzellen Niedertemperaturprozesse, integrierte Zellenverschaltungen und hohe Automatisierungsgrade in der Seriefertigung wodurch die Herstellungskosten gesenkt werden können /Luther 2008/. Es eröffnen sich dadurch neue Anwendungsbereiche wie Flachdächer, Fassaden oder die Integration in Textilien /Luther 2008, Quaschnig 2008/. Nach /Paddon et al. 2008/ sind Dünnschichtsolarzellen die Solarzellen mit dem größten Zukunftspotenzial.

Bei amorphem Silizium sind die Si-Atome ungeordnet in einem Netz, welches 10 % Wasserstoffatome enthält, eingelagert. Amorphe Si-Solarzellen besitzen ein gutes Absorptionsverhalten, das von der Bandlücke des Materials bestimmt wird, und benötigen daher nur



eine vergleichsweise geringe Schichtdicke. Die im Vergleich zu kristallinen Si-Solarzellen höhere Zellspannung resultiert aus der größeren Bandlücke des a-Si /Brendel et al. 2006, Reisch 2007/. Amorphe Si-Solarzellen besitzen gestalterisch relevante Merkmale, die entscheidend für ihren Einsatz sind. Durch Veränderung der Schichtdicken, des Trägermaterials und deren Strukturen erscheinen a-Si-Solarzellen opak, semitransparent oder transparent. Für die Anwendung in der Gebäudeintegration können flexible Trägermaterialien eingesetzt werden. Jedoch ist der geringe Wirkungsgrad (6 – 8 %) von a-Si-Solarzellen im Vergleich zu kristallinen Zellen ein Nachteil und auch die Langzeitstabilität ist noch nicht ausreichend gesichert /Quaschnig 2008, Reisch 2007/. Sie haben jedoch den Vorteil, dass sich der Wirkungsgrad auch bei diffusem Licht nicht stark verringert, wodurch sie auch an vertikalen Wänden und Fassaden angebracht werden können. Durchsichtige a-Si-Solarzellen können z. B. als Dachfassaden zur natürlichen Raumbelichtung eingesetzt werden /Hagemann 2007/.

Cadmium-Tellurid (CdTe)-Dünnschicht-Solarzellen werden bereits für Kleinstanwendungen (z. B. Taschenrechner und Uhren) eingesetzt. CdTe ist ein graues Material, welches zu den II-IV Halbleitern gezählt wird. Die Bandlücke des reinen Materials beträgt 1,52 eV (~820 nm). CdTe besitzt einen sehr hohen Absorptionskoeffizient, so dass bereits eine 2 µm dicke CdTe-Schicht zur Absorption von 99 % des einfallenden Lichts ausreicht /Mack 2006/. Ein großer Nachteil ist jedoch die Toxizität von Cadmium, da es bei Menschen als krebserregend gilt /Quaschnig 2008/. Es ist jedoch in CdTe nur als feste Verbindung vorhanden und somit wesentlich ungefährlicher /Schlandt 2009/. CdTe lässt sich jedoch leichter und dauerhafter mit Glas verbinden als Silizium. Dadurch sind dünne und sparsame Beschichtungen technisch herstellbar /Brand et al. 2007/. Studien zeigen die ökologischen Vorteile von CdTe-Dünnschicht-Solarzellen im Vergleich zu anderen Photovoltaiktechnologien (siehe /Bonnet et al. 1998, Fthenakis et al. 2005/). Weitere Vorteile sind einfache Fertigungsverfahren und ein guter Modulwirkungsgrad. Im Labor konnten Wirkungsgrade von 16,5 % erreicht werden, 19 % erscheinen mittelfristig möglich /Lüdemann et al. 2005/.

Kupfer-Indium-(Gallium)-Diselenid (Cis oder CIGS) Solarzellen erreichen unter den Dünnschicht-Solarzellen die höchsten Wirkungsgrade von bis zu 11,8 %. Im Labormaßstab werden knapp 20 % erreicht /IWR 2012, Quaschnig 2008, ZSW 2009/. Bei der Bauweise bestehen große Ähnlichkeiten mit den CdTe-Solarzellen. CIGS besitzt zwei Eigenschaften, welche für die Entwicklung von CIGS-Solarzellen von großer Bedeutung sind. Einerseits kann die Bandlücke von CIGS variiert werden und somit eine höhere Lichtabsorption erreicht werden und andererseits besitzt CIGS eine direkte Bandlücke. Diese erlaubt eine zwei bis dreifach höhere Lichtabsorption des Materials und führt dazu, dass z. B. eine 1 µm dicke Absorberschicht ausreicht, um 90 % des Lichtes zu absorbieren /Werner 2008/. Weitere Eigenschaften sind im Vergleich zu a-Si-Solarzellen die gute Langzeitstabilität und die hohe Flexibilität /Quaschnig 2008/.

#### *Quantentrog- und Quantenpunkt-Solarzellen*

Quantenpunktstrukturen, die eine optimale Nutzung der Sonnenenergie auch im infraroten Bereich ermöglichen könnten, befinden sich im Stadium der Grundlagenforschung /Paschen

et al. 2004/. Quantentrog-Solarzellen basieren auf einer Schichtfolge aus einigen 10 nm dünnen Halbleiterschichten mit abwechselnd größeren und kleineren Bandlücken. Die Quantenschichten weisen aufgrund der Nanoskaligkeit zusätzliche elektronische Zustände auf, wodurch die Absorption anderer Wellenlängen durch die Kontrolle der Schichtdicken eingestellt werden kann. Es ist jedoch nicht klar, ob die Spannung und damit der Wirkungsgrad deutlich erhöht werden kann /Grüne et al. 2005/. Bei Quantenpunkten ändert sich neben den elektronischen Zuständen auch die thermische Relaxation angeregter Ladungsträger. Um diese Eigenschaften in Quantenpunkt-Solarzellen nutzbar zu machen, gibt es unterschiedliche Konzepte. Die damit erzielten Wirkungsgrade sind gering /Grüne et al. 2005/. Das Potenzial für die Energietechnik wird trotz technischer Umsetzungsschwierigkeiten als hoch eingeschätzt /Texocon 2008/. Durch Quantenpunkte können einerseits mehrere Elektronen-Loch-Paare pro Photon erzeugt und andererseits können Absorptionsbänder optimal auf die Wellenlängen des einstrahlenden Lichts angepasst werden /Luther 2008/. Quantenpunkte lassen sich „Maßschneidern“, so dass ein scharf begrenzter Wellenlängenbereich entsteht, in dem das Material Licht absorbiert oder emittiert /Paschen et al. 2004/. Der Einsatz von Quantenpunkten zeigt sich gerade in Dünnschicht- und Stapelsolarzellen als vielversprechend. Mit derartigen optimierten Solarzellen sind Umwandlungseffizienzen von über 60 % theoretisch machbar. Es könnten bereits in 2015 Quantenpunktsolarzellen marktreif sein, die jedoch zu Beginn noch niedrige Wirkungsgrade von ungefähr 17 % aufweisen werden. Stapelquantenpunktsolarzellen könnten im Jahr 2030 Wirkungsgrade von 30 % erreichen /Green 2008/.

#### *Farbstoffsolarzellen*

Das physikalische Prinzip der Farbstoffsolarzellen oder auch nach ihrem Erfinder Prof. Michael Grätzel als Grätzelzelle bekannt, wurde Anfang der 90er Jahre entwickelt. Es beruht auf der Photosynthese. Bei der Photosynthese wird der Farbstoff Chlorophyll unter Sonneneinstrahlung zur Produktion von Zuckermolekülen verwendet. In der Solartechnik werden ausgehend aus biologischem Chlorophyll nanometerfeine Farbstoffmoleküle eingesetzt. Im Vergleich zur herkömmlichen Halbleitertechnik öffnet die Farbstoffsolarzellentechnik neue Wege in der Grundlagenforschung innovativer Solarzellen /Jopp 2006/. Farbstoffsolarzellen sind elektrochemische Dünnschicht solarzellen, welche auf nanotechnologischen Methoden aufbauen. Sie bestehen aus zwei Elektroden mit einem Abstand von typischerweise 20 – 40  $\mu\text{m}$ , wobei beide Elektroden mit einer elektrisch leitenden Schicht beschichtet sind. Auf der Frontelektrode ist eine 8 – 15  $\mu\text{m}$  dicke kolloidale Schicht aus  $\text{TiO}_2$ -Nanokristallen aufgebracht. Die  $\text{TiO}_2$ -Teilchen haben einen Durchmesser von 5 – 20 nm und auf ihrer Oberfläche ist eine monomolekulare Schicht Farbstoffmoleküle (metallorganischer Rutheniumfarbstoff) aufgebracht. Im Zwischenraum der beiden Glasplatten befindet sich ein Redoxelektrolyt, der die nanoporöse  $\text{TiO}_2$ -Schicht durchdringt /Grüne et al. 2005/.

Der Farbstoff soll eine höhere Lichtausbeute und einen besseren Elektronentransfer vom Lichtabsorber zur Elektrode erzielen. Im Labor wurden bei diffusem Lichteinfall Gesamtwirkungsgrade von 8 – 10 % erreicht. Diese könnten die wesentlich niedrigere Leistungsfähigkeit bei direkter Lichteinstrahlung, im Vergleich zu amorphen oder kristallinen Dünnschicht solarzellen, wettmachen. Ihr wesentlicher Vorteil liegt jedoch in kostengünstigen

Herstellungsverfahren /Paschen et al. 2004/. Bei Farbstoffsolarzellen mit festem Elektrolytmaterialien (sog. Polymer-TiO<sub>2</sub> Solarzellen) wurden Wirkungsgrade von 4 % erreicht /Oey et al. 2006/. Nach /BSI 2007/ können nanokristallin beschichtete Zellen bis zu 12 % der Sonnenenergie in elektrische Energie umwandeln, gegenwärtig liegt der Wirkungsgrad bei 5 bis 8 %. Auch nach /Tolbert 2008/ sind Wirkungsgrade von 5 % möglich, die Entwicklung steht jedoch erst am Anfang. Nach /Brake 2007/ haben Module mit Farbstoffsolarzellen Wirkungsgrade von 2,5 %. Testzellen nach /Hug 2004/ erreichten Wirkungsgrade von 7 bis 8 % und eine Weiterentwicklung auf bis zu 12 % wird für möglich gehalten.

Ein wichtiges Entwicklungsziel ist die deutliche Erhöhung der Lebensdauer von ca. drei bis vier Jahren auf zehn bis zwanzig, wie es für Fassadenanwendungen gefordert wird. Man erhofft sich Verbesserungen durch den Ersatz des organischen Farbstoffes durch Halbleiter-Quantenpunkte mit einstellbaren Absorptionseigenschaften, durch Nanostrukturierung der Platinelektrode und durch den Ersatz des flüssigen Elektrolyten durch einen festen polymeren Lochleiter /Grüne et al. 2005/. Weitere Herausforderungen stellen die Skalierbarkeit dieser Technologie auf Modulflächen > 0,5 m<sup>2</sup> und die Entwicklung von Solarzellen für leistungsarme, mobile Anwendungen dar /FhG-ISE 2006, Paschen et al. 2004/. Farbstoffsolarzellen zeichnen sich durch eine hohe mechanische Flexibilität aus und können teil- bis vollständig transparent hergestellt werden. Dazu kommen die Möglichkeiten der Farbgestaltung und die aktive Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Lichtverhältnisse. So könnten Farbstoffsolarzellen als „smart windows“ eingesetzt werden, die bei starker Sonneneinstrahlung Strom produzieren und gleichzeitig aufgrund des in der Zelle gebildeten Jods abdunkeln /Wevers et al. 2002/. Auch bei schwachen Lichtverhältnissen bleiben Farbstoffsolarzellen effizient. Diese Besonderheit ermöglicht einen Wirkungsgrad von bis zu 13 % auch bei Bewölkung, sandhaltiger Luft oder bei einer Innenraumanwendung wodurch sich die jährlichen Nutzungsstunden erhöhen /Luther 2008/.

### *Organische Solarzellen*

Organische Solarzellen zeichnen sich durch mechanische Flexibilität verbunden mit niedrigen Herstellungskosten aus /FhG-ISE 2006/. Es lassen sich zwei Zellaufbauten unterscheiden. Während beim Bilayer-Konzept die photokatalytische Schicht aus einer flachen p-n-Grenzschicht aus organischen p- und n-leitenden Materialien besteht, ist die photokatalytische Schicht beim Komposit-Konzept aus einer nanophasigen Mischung dieser Materialien aufgebaut. In beiden Fällen sind die photoaktiven Schichten nur 100 – 200 nm dick. Die beste Effizienz (3 %) erreichen Polymersolarzellen auf Basis von Kompositen aus p-leitenden Polymeren (Donatoren) und C60-Fullerenderivaten (Akzeptoren). Allerdings ist das Potenzial noch nicht evaluiert und langfristig können höhere Wirkungsgrade möglich sein /Grüne et al. 2005/.

Nach /WFU 2007/ wurde bei organischen Solarzellen Wirkungsgrade von über 6 % erreicht. Diese relativ hohe Effizienz wurde durch Nanofilamente innerhalb des lichtabsorbierenden Polymers erzielt, vergleichbar mit den Adern in Blättern von Bäumen. Dadurch kann die Dicke der absorbierenden Schicht erhöht und eine bessere Lichtausbeute erreicht werden. Wissenschaftler hoffen, dass der Wirkungsgrad in den nächsten Jahren auf 10 % erhöht wer-

den kann /WFU 2007/. Denkbar sind die Implementierung auf gewölbten Oberflächen sowie die großflächige Gebäuderverglasung /Hartmann 2006/. Die Langzeitstabilität organischer Solarzellen ist noch nicht ausreichend /Gombert 2006/. In 2015 bzw. 2020 kann mit großflächigen Anwendungen organischer Solarzellen gerechnet werden /Niggemann 2006/. Nach /FhG-ISE 2006/ eignen sich Organische Solarzellen auch als Spannungsquelle für Produkte mit kurzer Lebensdauer (z. B. smart labels). In Nischenanwendungen ist ein Markteintritt in den nächsten Jahren sehr wahrscheinlich /Gombert 2006/, erste Produkte für Kleingeräte könnten ab 2012 bzw. 2013 auf den Markt kommen /Niggemann 2006/. Forschungsziele sind die weitere Steigerung des Wirkungsgrades und die Verringerung der Produktionskosten. Ein wichtiger Schritt in Richtung Marktreife stellt jedoch die Weiterentwicklung der Langzeitstabilität organischer Solarzellen dar /ISE 2007/.

### *Stapelsolarzellen*

Stapelsolarzellen zeigen im Vergleich zu anderen Solarzellentypen die höchsten theoretischen Umwandlungseffizienzen in Labortests. Sie bestehen aus einer Kombination mehrerer Funktionsschichten. Das Besondere an der Kombination mehrerer unterschiedlicher Halbleiterschichten ist das dadurch hohe summierte Ausbeutungspotenzial aufgrund der unterschiedlichen Bandlücken. Somit kann ein größeres Strahlungsspektrum in Strom umgewandelt werden. Diese Halbleitersysteme erreichen im Labor Wirkungsgrade in der Größenordnung von über 40 % /Brand et al. 2007, ISE 2009, Luther 2008, ObservatoryNano 2008/. Theoretisch lassen sich fast alle Halbleitermaterialien kombinieren. In der Praxis werden bereits Stapelsolarzellen aus Materialsystemen wie Silizium oder Polymeren getestet. Technisch werden in der Regel Stapelzellen aus III/V Halbleitern mit optischen Konzentratoren betrieben, die das Licht auf der Solarzelle bündeln, um den Wirkungsgrad noch weiter zu erhöhen. Aufgrund der hohen Herstellungskosten kommen Stapelsolarzellen z. B. in der Raumfahrt zum Einsatz /ObservatoryNano 2008/.

### **Solarthermie**

Unter Solarthermie wird die Nutzung der Sonnenstrahlung zur Wärmeerzeugung verstanden. Die erzeugte Wärme dient in den meisten Fällen zur Bereitstellung von Warmwasser und zur Raumheizung. Sonnenkollektoren können die Solarstrahlung mit hohem Wirkungsgrad in Niedertemperaturwärme umwandeln /Zahoransky 2009/. Die Solarthermie bietet im Vergleich zu anderen Technologien eine kostengünstige und auf langjährige Erfahrung basierte zuverlässige Methode zur Bereitstellung von Wärme /Jopp 2006/. Eine Steigerung des Wirkungsgrades von Solarkollektoren kann prinzipiell auf drei Arten erfolgen. Durch die Erhöhung des Transparenzgrades der Kollektorabdeckung, durch Minimierung der Wärmeverluste und durch Optimierung des Wärmeübergangs vom Absorber an das Wärmeträgermedium. Die Nanotechnologie bietet vor allem für die beiden erstgenannten Beispiele konkrete Lösungsmöglichkeiten. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde ein hochtransparentes Glas entwickelt, das beidseitig mit Nanoteilchen aus Siliziumdioxid beschichtet wird. Dadurch kann die Transparenz und die Witterungsbeständigkeit deutlich erhöht und somit der Wirkungsgrad gesteigert werden /DBU 2007/. Um Strahlungsverluste zu minimieren, werden selektive Nanobeschichtungen auf der Frontseite der Absorberflächen eingesetzt /Hofmann

2006/. Nanoskalige Funktionsschichten, die nach dem Sol-Gel-Verfahren hergestellt werden, können die Energieausbeute um bis zu 7 Prozentpunkte erhöhen. Es werden dabei Schichten von ca. 100 nm Dicke eingesetzt, die z. B. aus porösem Siliziumdioxid bestehen /Jopp 2006/.

Auch bei solarthermischen Kraftwerken, die Solarstrahlung in Wärme wandeln, diese dann in einem thermodynamischen Kreisprozess nutzen und damit elektrische Energie bereitstellen, kann Nanotechnologie eingesetzt werden /Kaltschmitt et al. 2006/. Bei Parabolrinnenkraftwerken kann das Absorberglasrohr, welches eine hohe Lichtdurchlässigkeit aufweisen muss, um Reflexionsverluste zu minimieren, und extremen Bedingungen ausgesetzt ist (Temperaturschwankungen von über 400 °C), durch funktionale Beschichtungen verbessert werden. In der Praxis wird häufig Borosilikatglas verwendet, da es sich dabei um ein Hartglas handelt und es einen sehr niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweist. Es hat jedoch den Nachteil, dass jede Grenzfläche dieses Spezialglases etwa 4 % des Sonnenlichts reflektiert, wodurch es zu Energieverlusten kommt. Insgesamt können daher bis zu 8 % der Sonnenenergie durch Spiegelung verloren gehen. Herkömmliche Antireflexschichten haften nicht auf Borosilikatglas und man kann sie nach /Helsch 2006/ mit einem Papiertuch abwischen bzw. sie werden schon nach kurzer Zeit von Wind, Staub und Regen abgetragen. Ein Forschungsteam der TU Clausthal entwickelte eine mit Phosphoroxid modifizierte Schicht aus SiO<sub>2</sub>, welche eine Dicke von 100 nm und eine Porosität von 37 % aufweist. Zur Beschichtung werden die Borosilikatglasrohre in eine mit Phosphorsäure modifizierte Lösung mit Silizium-Partikeln getaucht. Mit dieser abriebfesten Nanobeschichtung erreicht man eine um 5 Prozentpunkte höhere Lichtausbeute, d. h. eine Optimierung der Lichtdurchlässigkeit von 92 auf 97 %. Dies resultiert in einer Steigerung der möglichen Energiegewinnung um ca. 5 Prozentpunkte /Helsch 2006, IHK-Braunschweig 2006/.

### **Thermophotovoltaik und thermoelektrische Generatoren**

Die Thermophotovoltaik (TPV) nutzt Photozellen zur Umwandlung von thermischer in elektrische Energie. Dabei wandelt ein beheizter Strahlungsemitter die Wärme in Strahlungsenergie um, wobei die Wärme von einer beliebigen Quelle stammen kann. Der selektive Emitter ist ein Hauptelement des TPV-Systems. Er sollte eine möglichst hohe Emissivität und ein Strahlungsspektrum aufweisen, das an die spektrale Empfindlichkeit der Photozellen angepasst ist /Bitnar et al. 2002/. Eine Methode, um die Emission des Emitters gezielt einzustellen, ist die Mikrostrukturierung metallischer Oberflächen. Problematisch ist jedoch noch die Langzeitstabilität der Oberflächen bei hoher Temperaturbelastung. Mit einer stabilisierenden, 25 nm dicken Schicht aus Hafniumoxid (HfO<sub>2</sub>) kann dies verhindert werden /Grüne et al. 2005/. Die theoretischen Wirkungsgrade von TPV-Systemen liegen im Bereich von 20 %, allerdings erreichen Prototypen erst Wirkungsgrade kleiner 5 %. Interessant sind TPV-Systeme, neben der Raumfahrt, für die Koproduktion von Wärme und Elektrizität. Hierzu zählt neben elektrisch autarken Heizungen und Wärme/Strom-Generatoren für Ferienhäuser auch die netzgekoppelte Erzeugung von Spitzenlaststrom mit Heißwasserboilern. Allerdings sind diese Arbeiten noch nicht so weit fortgeschritten, dass sich ein kommerzielles Produkt abzeichnet. Generell wird das Marktpotenzial der TPV jedoch als hoch eingeschätzt /Bitnar et



al. 2002, Bitnar et al. 2003/. Auch in Fahrzeugen könnten TPV-Systeme künftig den Verbrennungsmotor bei der Energieversorgung elektrischer Systeme ergänzen /Thomson 2006/. Mittelfristig könnten TPV-Systeme nach /Grüne et al. 2005/ Vorteile gegenüber der Thermoelektrik aufweisen.

Bei der thermoelektrischen Energiewandlung wird thermische Energie in Form von Temperaturunterschieden unmittelbar in elektrische Energie umgesetzt. Dieser physikalische Effekt (Seebeck-Effekt) funktioniert auch in umgekehrter Weise und wird dann als Peltier-Effekt bezeichnet. Elektrische Energie kann so in Kühl- oder Heizleistung gewandelt werden. Zur Nutzung von Abwärme, die bei Energiewandlungs- und Produktionsprozessen freigesetzt wird, könnten thermoelektrische Generatoren eingesetzt werden /Grüne et al. 2005/. Üblicherweise bestehen thermoelektrische Energiewandler aus Halbleitermaterialien (z. B. Wismut-Tellur-Legierungen). Nach /Sommerlatte et al. 2007/ werden je nach Temperatur unterschiedliche Elemente und Legierungen eingesetzt. So können z. B. Elemente der V. Hauptgruppe wie z. B. Bismut (Bi) und Antimon (Sb) bereits bei Temperaturen von 100 K eingesetzt werden. Bei sehr hohen Temperaturen (600 bis 1.200 K) können PbTe oder SiGe-Legierungen genutzt werden. Durch den Einsatz neuer Materialien, z. B. nanokristalliner Schichten aus Halbleitern, kommt es zu einer ausgeprägten thermoelektrischen Umwandlung mit guten Wirkungsgraden /BMBF 2004, Paschen et al. 2004/. Der Wirkungsgrad der Energiewandlung hängt wesentlich von der Thermoelektrischen Effektivität  $z$  der eingesetzten Materialien ab, die durch den Seebeck-Koeffizienten  $\alpha$ , ihre elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  und ihre Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  bestimmt ist. Nach /Luther 2008/ erreicht man mit den besten thermoelektrischen Massivmaterialien Werte für  $z$  von knapp über 1. Der Wirkungsgrad solcher Generatoren liegt dabei zwischen 5 und 10 % /Fröhlich 2007/. Allerdings erhofft man sich durch nanostrukturierte Materialien Effizienzverbesserungen von 50 – 200 % /UH 2008/. Festkörperphysikalische Berechnungen belegen eine Erhöhung der thermoelektrischen Effektivität. Mit nanoskaligen Materialien wurden experimentell in Multi-Quantum-Well-Strukturen (MQW) Werte von  $z > 2$  ermittelt. Diese bestehen aus nur einigen Nanometer dicken Well-Schichten und einer dazwischen liegenden Barrierschicht. Eine weitere Steigerung der thermoelektrischen Effektivität wird durch Nanodrähte erwartet /Luther 2008/. Als hocheffiziente Thermoelektrika haben sich nanoskalige Strukturen aus Wismut-Tellur- und Antimon-Tellur-Quantenpunkten herausgestellt. Eine Effizienzsteigerung um ca. 50 % mit Blei-Selen-Tellur-Quantenpunkten konnte bereits nachgewiesen werden. Weiterhin konnte mit einer Legierung aus Blei, Tellur und Nanopartikeln aus Silber und Antimon eine Umsetzung der Wärmeenergie in Elektrizität mit einer Effizienz von 18 % bei einer Temperaturdifferenz von 600 °C erreicht werden, was nach /Bachmann et al. 2007/ zu Anwendungen in Verbrennungsmotoren und Kraftwerken führen kann.

Bei Fahrzeugen könnten thermoelektrische Generatoren an heißen Modulen wie Motor oder Abgasanlage einschließlich des Katalysators angebracht werden /Paschen et al. 2004/. Nach /Pester et al. 2009/ sollten bereits 2012 thermoelektrische Generatoren (TEG) Strom aus Abgashitze gewinnen und direkt ins Bordnetz einspeisen. Der TEG soll bis zu 250 W Strom aus dem heißen Abgas der Abgasrückführung erzeugen, wodurch eine Kraftstoffeinsparung von 2 % erreicht wird.

## Brennstoffzellen

Prinzipiell bestehen alle Brennstoffzellen (FC) aus zwei porösen Schichten, den katalytisch aktiven Elektroden (Anode und Kathode), die durch eine dritte Schicht, den Elektrolyten, voneinander getrennt sind. Eine Elektrode wird mit Wasserstoff, die andere mit Sauerstoff umspült. Schaltet man die Elektroden außen zusammen, so fließt elektrischer Strom, jedoch nur so lange die Zellen mit Wasserstoff und Sauerstoff versorgt sind. Mittels elektrochemischer Vorgänge werden an den Elektroden elektrisch neutraler Wasserstoff und Sauerstoff in elektrisch geladene Ionen umgewandelt. Dabei werden vom Wasserstoff Elektronen abgegeben, die über den äußeren Stromkreis zur Sauerstoffseite fließen. Die elektrisch geladenen Ionen im Elektrolyten transportieren den Strom zwischen den Elektroden. Es gibt unterschiedliche Brennstoffzellentypen, die sich im Aufbau, dem verwendeten Elektrolyten und der Betriebstemperatur unterscheiden /Grüne et al. 2005, Pehnt et al. 2002/. Niedertemperatur-Brennstoffzellen sind z. B. alkalische Brennstoffzellen (AFC) und Polymerelektrolytbrennstoffzellen (PEFC, PEMFC), welche in Temperaturbereich von 60 °C bis ca. 120 °C betrieben werden. Der Betriebstemperaturbereich von phosphorsauren Brennstoffzellen (PAFC) liegt zwischen 120 °C und 200 °C. Hochtemperaturbrennstoffzellen (500 °C bis 1000 °C) sind z. B. Schmelzkarbonatbrennstoffzellen (MCFC) und Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC). Für weitere Informationen zu Brennstoffzellentypen wird auf /Aigle et al. 2003, Blum et al. 2002, Gummert et al. 2006/ verwiesen.

Die Verbreitung von Brennstoffzellen wird auch heute noch vor allem durch den hohen Preis eingeschränkt. Auf der Nanotechnologie basierende Verbesserungen bei Membranen, Katalysatoren und Elektroden können Brennstoffzellen leistungsfähiger und preiswerter machen /Paschen et al. 2004/.

Bei der Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEMFC) ist die Kostenreduktion ein wichtiges Ziel. Sie besteht aus porösen Kohlenstoffelektroden und Platin-Katalysatoren mit Partikeln von 2 – 5 nm Größe. Die Nanostrukturierung ist dabei entscheidend, um das Verhältnis von Oberfläche und Volumen zu erhöhen und somit den Bedarf des Edelmetalls Platin zu reduzieren. Die Herstellung von Platin-Nanopartikeln in den 1960-ern war vermutlich die erste Erscheinung einer Nanostruktur /Nanoforum 2004, Steele et al. 2001/. Werden PEM-Brennstoffzellen mit reformiertem Brennstoff betrieben, können Spuren von Inertgasen und Kohlenmonoxid (CO) im Brennstoff vorkommen. Daher werden CO-tolerante Elektroden und Katalysatoren benötigt. So sind z. B. Brennstoffzellen-Katalysatoren aus Ruthenium-Platin-Nanopartikeln wesentlich beständiger gegenüber dem als Gift wirkenden CO und funktionieren 50-mal länger als traditionelle Brennstoffzellen-Katalysatoren. Durch eine Positionierung der aktiven Platin-Atome auf dem Ruthenium-Nanopartikel verringert sich zudem die Platin-Beladung des Katalysators, wodurch sich die Kosten senken lassen /Grüne et al. 2005, NNI 2005/. PEM-Brennstoffzellen funktionieren entweder mit reinem Wasserstoff oder mit reformiertem Brennstoff. Bei Reformern zur Umwandlung von fossilen Kraftstoffen in Wasserstoff können Nanodüsen, sog. Nanojets, eingesetzt werden. Nanojets lassen sich durch Einbringen von Kanälen mit Sub-Mikrometerdurchmesser in Ma-



materialien wie Silizium oder Siliziumcarbit erzeugen. Dazu muss das Innere zusätzlich mit katalytischen Materialien, z. B. Platin, beschichtet werden /Hartmann 2006/.

Bei den Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC) ist der Festelektrolyt einer der wichtigsten Komponenten. Es wird meist ein Festelektrolyt aus yttriumstabilisiertem Zirkoniumdioxid verwendet, welcher oberhalb von 750 °C ein brauchbarer Oxidionenleiter bei gleichzeitiger Gasdurchlässigkeit ist. Um die Ohmschen Verluste zu verringern und die Betriebstemperatur herabzusetzen, ist das Ziel, die Dicke des Feststoffelektrolyts so weit als möglich zu reduzieren, ohne dabei die Gasdichtheit der Schicht zu beeinflussen /Gaudon et al. 2005, Kurzweil 2003/. Um die Gasdichtheit zu garantieren, wird der Elektrolyt bei Temperaturen nahe 1.400 °C gesintert, wofür ein poröses Keramiksustrat benötigt wird, welches häufig als Anoden- oder Kathodenmaterial Verwendung findet. Die Kathode verträgt jedoch nur maximal 1.200 °C, weshalb zur Dichtsinterung mehrere, hintereinander folgende Sinterungen notwendig sind, die zu erheblichen Kosten- und Zeitaufwendungen führen. Ein Ziel ist es daher, die zur Dichtsinterung des Elektrolyten notwendige Sintertemperatur auf unter 1.300 °C zu reduzieren, was durch den Einsatz von hochreaktivem Sub- $\mu$  oder Nanopulver erfolgen kann /FZJ 2003, Hansch et al. 2005, Steele et al. 2001/. Nanopartikel wurden zur Herstellung von yttriumstabilisiertem Zirkoniumdioxid-Elektrolyten bereits eingesetzt. Deren hohe Sinteraktivität bei geringen Temperaturen führte jedoch zu einer großen Unausgeglichenheit bei der Schrumpfung des Trägermaterials und der Schicht, wodurch Risse oder Ablösungen entstanden. Zufriedenstellende Ergebnisse wurden bei Mischungen von mikrogroßen und nano-großen Partikeln erreicht. Bei SOFC mit niedrigen Betriebstemperaturen können Materialien auf Basis von  $\text{CeO}_2$  verwendet werden. Die Dünnschichtelektroden aus  $\text{CeO}_2$ -Materialien werden auf porösen Elektroden aufgebracht und gesintert. Dünnschicht-Brennstoffzellen erreichen hohe Leistungsdichten /Gaudon et al. 2005, Grüne et al. 2005/.

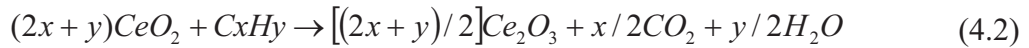
### **Kraftstoffadditiv Ceroxid**

Auf Grund ihrer großen Oberfläche sind Nanopartikel als Katalysatoren geeignet, die Effizienz und Wirksamkeit von chemischen Reaktionen zu erhöhen (siehe Abschnitt Brennstoffzellen). Bei Verbrennungsprozessen können nanoporöse Katalysatoren und Nanopartikel die Wirkungsgrade verbessern und Emissionen reduzieren. Nach /Nanoforum 2004/ sind Energieeinsparpotenziale in diesem Bereich enorm. „It has been recognized for some time that cerium oxide could give a cleaner-burning fuel, but until nanoparticles could be manufactured, the catalyst simply settled out to the bottom of the gas tank” /Edwards 2006/. Die Wirksamkeit von Ceroxid als Katalysator basiert auf der Transformation von  $\text{CeO}_2$  zu  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  und der Fähigkeit, bei der Verbrennung Sauerstoff abzugeben (vgl. Formel 4.1). Aufgrund des Sauerstoffs kann der Brennstoffumsatz erhöht werden. Zusätzlich wird die Verbrennungstemperatur herabgesetzt, wodurch vorhandene Rußablagerungen im Motor abgebrannt werden können /Fairley 2008, Oxonica 2005a, 2005b/.

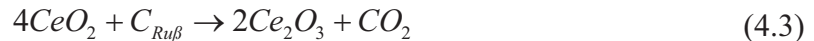


Dieses technische Prinzip, die Verbrennungstemperatur durch das Additiv Cer herabzusetzen, wird auch in Partikelfiltern bei Pkw-Dieselmotoren angewandt /Jungemann 2003/. Darüber hinaus reduziert eine geringere Temperatur die Bildung von  $\text{NO}_x$  (vgl. auch Formel 4.2 bis 4.4 /Oxonica 2005b/).

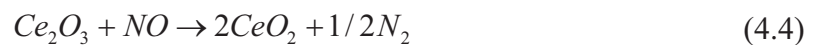
Kohlenwasserstoff-Verbrennung:



Ruß-Verbrennung:



$\text{NO}_x$ -Reduktion:



Nach Herstellerangaben lassen sich mit dem Diesel-Additiv Verbrauchseinsparungen zwischen 5 % und 11,4 % erreichen /Oxonica 2005a/. Ein britisches Verkehrsunternehmen erzielte bei Tests mit 1.300 Bussen nach eigenen Angaben Einsparungen von über 5 %. Für den Einsatz sind keine Modifikationen des Motors nötig und die Beimischung ist mit einem Verhältnis von 5 bis 10 zu einer Million Teilchen sehr gering /Oxonica 2007, 2008/. Allerdings werden von der amerikanischen Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) eine nicht ausreichende Untersuchung der Auswirkungen dieses Treibstoffzusatzes und der damit verbundenen Abgase auf die menschliche Gesundheit bemängelt, weshalb eine Genehmigung für eine Testreihe für den amerikanischen Markt nicht erfolgte /EPA 2007, 2009, Fairley 2008/.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Verbrennungsreaktion ist die Beschichtung des Verbrennungsinnenraums mit Nanokatalysatoren. Diese Beschichtungen aus nanoporösen Keramiken können zu einer verbesserten Durchmischung des Treibstoffs und zu einer erhöhten Menge an Sauerstoff im Verbrennungsraum führen, wodurch eine Effizienzsteigerung realisiert werden kann /Bachmann et al. 2007/.

### Nanostrukturierte Membranen

Haupteinsatzgebiete von Nanomembranen liegen in der Reinigung und Aufbereitung von Wasser oder in der Meerwasserentsalzung. Dabei sind solche Membranschichten mit Nanoporen sogar in der Lage Bakterien auszufiltern. Als Material kommt größten Teils Keramik zum Einsatz. Untersuchungen zeigen, dass Membranverfahren wie auch Mikro- und Ultrafiltration eine Alternative zu herkömmlichen Verfahren darstellen. Die Anwendung der Nanofiltration ist vielfältig und reicht von der Wasseraufbereitung über die Isolierung von Inhaltsstoffen in der Nahrungsmittelindustrie bis zur Reinigung von Abwässern. Nanofilter auf Polymerbasis werden weiterentwickelt, um sie im industriellen Bereich nutzbar zu machen und somit Vorteile hinsichtlich des Energie- und Rohstoffbedarfs gegenüber Verdampfungsverfahren geltend zu machen. Potenzielle Anwendungsmöglichkeiten sind auch die Aufbereitung

von Erdölfractionen und Schmieröl in der Petrochemie /fona 2008, Melin et al. 2007/. Zusätzlich zu den genannten Anwendungsgebieten sind Membrane in Brennstoffzellen oder Osmosekraftwerken einsetzbar /Jopp 2006/.

In einem Osmosekraftwerk kann der physikalische Effekt der Osmose zur Stromgewinnung eingesetzt werden. Dabei wird der unterschiedliche Salzgehalt von Süß- und Salzwasser genutzt. Hierbei werden zwei Salzlösungen mit unterschiedlicher Konzentration in Kontakt gebracht, getrennt durch eine semipermeable Membran, die nur für Wasser, nicht aber für gelöste Salze durchlässig ist. Da beide Lösungen nach einem Konzentrationsausgleich streben, kann dieser nur durch ein Übertritt des niedrig konzentrierten Wassers in die höher konzentrierte Salzlösung stattfinden. Dabei wird ein Druck aufgebaut, der in einer Turbine zur Stromerzeugung genutzt werden kann. Osmosekraftwerke können dort eingesetzt werden, wo sich Wassermengen mit unterschiedlichen Salzgehalten treffen, was hauptsächlich an Flussmündungen ins Meer der Fall ist. Entscheidend für eine große Energieausbeute sind dabei eine hohe Durchflussmenge und ein möglichst hoher Konzentrationsunterschied des Salzes. Der Druckunterschied zwischen Salz- und Süßwasser liegt bei 26 – 27 bar /GKSS 2005/. Die semipermeable Membran ist die entscheidende Komponente einer solchen Anlage.

Um entsprechende Membranen zu entwickeln, wurde z. B. 2001 das EU-Projekt Salinity Power gestartet. Zusammen mit Forschungseinrichtungen und dem norwegischen Stromkonzern Statkraft wurde die Entwicklung einer Membran, zum Teil im Rahmen des EU-Projektes NanoMemPro, vorangetrieben. Auf Basis dieser Forschungsprojekte hat Statkraft den Bau einer Prototypenanlage beschlossen, welche 2 bis 4 kW erzeugen soll. Im November 2009 wurde der Prototyp in Betrieb genommen /Statkraft 2009/.

Verläuft diese Entwicklung nach Plan soll eine 25 MW-Anlage bis 2015 folgen. Das Kernstück, die semipermeable Membran wird dabei stetig weiterentwickelt. Am Anfang wurde eine kommerziell erhältliche Membran, die zur Meerwasserentsalzung eingesetzt wird, verwendet, welche eine Leistung von 0,1 Watt pro  $\text{m}^2$  leistete. Nach /Frey 2007/ werden Trennschichten mit einer Leistung von 3,7 Watt pro  $\text{m}^2$  entwickelt. Trotz dieser Steigerung kann das Verfahren erst ab einer Leistung von 5 Watt pro  $\text{m}^2$  wirtschaftlich eingesetzt werden. Die Stromgestehungskosten lägen dann mit ca. 5 Cent pro Kilowattstunde im unteren Kostenbereich für erneuerbare Energien /Lübbert 2005/. Nach /Peinemann et al. 2008/ ist eine Leistung von 4 bis 6 Watt pro  $\text{m}^2$  erforderlich, um in Konkurrenz zu anderen erneuerbaren Energien treten zu können. Das Potenzial solcher Anlagen liegt in Norwegen bei rund 12 TWh/a.

Dieses hohe Potenzial lässt sich jedoch kaum auf andere Länder übertragen, da Norwegen durch seine große Zahl an Fjorden viele besonders geeignete Standorte besitzt. In Deutschland ist der Konzentrationsunterschied zwischen Fluss- und Meerwasser wohl zu gering, um die Technik nutzen zu können. Experten schätzen, dass bei einer vollständigen Ausnutzung aller Flussmündungen in Deutschland für Osmose-Kraftwerke ca. 1.400 MW gewonnen werden könnten. Größere Wassermengen führen der Rhein und die Donau mit sich, die außerhalb Deutschlands münden. Aussichtsreich wäre der Bau von Osmose-Kraftwerken vor allem am Mittelmeer, am Toten Meer oder an Salzseen. Diese lassen eine höhere Energieausbeute erwarten, da sie einen wesentlich höheren Salzgehalt aufweisen /Lübbert 2005/.

Europaweit wird das Potenzial auf 200 TWh/a und weltweit auf 1.600 bis 1.700 TWh/a geschätzt /IPP 2005, 2007, Statkraft 2009/.

Gegenüber chemischen Abscheideverfahren haben Membranverfahren den Vorteil, dass sie geringere Wirkungsgradverluste aufweisen. Nach /Birnbaum et al. 2010/ wird davon ausgegangen, dass sich der Nettowirkungsgrad von Kohlekraftwerken durch CCS um ca. 10 bis 14 Prozentpunkte verringert. Dementsprechend erhöht sich der Energieeigenbedarf der Kraftwerke um ca. 15 bis 30 %. Mit einer Weiterentwicklung der Technologie, speziell der Verbesserung von Gas-Trennmembranen, wird mit einem geringeren Wirkungsgradverlust gerechnet. Längerfristig rechnet /Birnbaum et al. 2010/ mit Wirkungsgradeinbußen in einer Bandbreite von 8 bis 10 Prozentpunkten. /Viebahn et al. 2010/ fassen unterschiedliche Studien zusammen. Dabei variieren die Wirkungsgradverluste in einer Bandbreite von 7,5 bis 18,2 Prozentpunkten. Durch neue Trennprozesse sind weitere Effizienzverbesserungen denkbar. In Norwegen wurde eine Membran entwickelt, die CO<sub>2</sub> einfängt und andere Abgase passieren lässt. Die Methode wird *facilitated transport* genannt und ist mit der Arbeitsweise der Lunge zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung vergleichbar. Die Neuerung besteht darin, dass anstelle eines Filters, ein in der Membran befestigter Träger das Gas in ein anderes Produkt umwandelt. Dabei wird das CO<sub>2</sub>-Molekül mit Hilfe von Feuchtigkeit in HCO<sub>3</sub> umgewandelt, welches durch die Membran transportiert wird, während die anderen Gase blockiert werden. Diese Technologie ist bisher jedoch nur für kleine Anlagen mit geringen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen einsetzbar, da ansonsten sehr viel Membranmaterial benötigt werden würde /Oksholen 2007/.

Nanobasierte Membranen können prinzipiell bei der Luftzerlegung und bei der CO<sub>2</sub>-Abtrennung eingesetzt werden /Radgen et al. 2006/. Durch das Ersetzen der anderen Verfahren werden jedoch deutlich reduzierte Wirkungsgradeinbußen erwartet. So liegt z. B. beim Oxyfuelverfahren der Aufwand zur Sauerstoffgewinnung in der Trennarbeit, die zur Zerlegung der Luft aufgewendet werden muss. Gegenüber heutigen Kraftwerken ohne CO<sub>2</sub>-Abscheidung kommt es bei dieser Technik zu Wirkungsgradeinbußen von ca. 11 Prozentpunkten. Durch eine Weiterentwicklung der Membranen wird erwartet, dass diese Sauerstoff mit deutlich niedrigerem Energieaufwand als herkömmliche Verfahren bereitstellen und in Zukunft die Tieftemperaturverfahren als Standardtechnologie zur Luftzerlegung ablösen /Birnbaum et al. 2010, Radgen et al. 2006/. Realisiert man die Luftzerlegung über eine keramische Hochtemperaturmembran könnten die Wirkungsgradeinbußen wohl auf ca. 2 bis 5 Prozentpunkte verringert werden /RWTH 2008/. Auch /Birnbaum et al. 2010, Viebahn et al. 2010/ gehen davon aus, dass Wirkungsgradverluste von 4 bis 8 Prozentpunkten erreichbar sind.

### **Nanostrukturierte Beschichtungen in Kraftwerkstechnologien**

Zur Verbesserung der Effizienz von Kraftwerken sind nanokeramische Antihafbeschichtungen und nanostrukturierte Wärmedämmschichten für Gasturbinen denkbar. In Kraftwerken, die mit Kohlen oder Abfall betrieben werden, kommt es zu starken Anbackungen der Verbrennungsrückstände im Kesselbereich und an Wärmeübertrager. Durch diese Anbackungen wird einerseits eine effiziente Wärmeübertragung verhindert und andererseits begünstigen sie

die Korrosion der Rohre, was gerade bei Müllkraftwerken und deren reaktiven Brennstoffzusammensetzung ein Problem darstellt. Durch den Einsatz einer Antihafbeschichtung lassen sich Anhaftungen reduzieren und dadurch die Lebensdauer und Wartungsintervalle erhöhen. Die Beschichtung besteht aus einer Kombination von Bornitrid als inertes Basismaterial und einer Binderphase aus keramischen Nanopartikeln, wodurch die Beschichtung ihre Festigkeit erhält. Durch den Einbau von hexagonalem plättchenförmigen Bornitrid werden die Flexibilität und die Antihafteigenschaften der Beschichtung erreicht /ItN 2006/. Nach /Meyer et al. 2006/ ist das Beschichtungssystem erfolgreich auf seine Wirksamkeit getestet worden. Neben der Anwendung in Kraftwerken bieten Antihafbeschichtungen auch Potenziale in industriellen Prozessen, bei denen die Verkrustung von Wärmeübertragern mit einhergehendem vermindertem Wärmeübergang zu Problemen führt /Luther 2008/.

Wärmedämmschichten als Schutz für Gasturbinenschaufeln sind erforderlich, da die Eintrittstemperaturen des heißen Gases bei über 1.500 °C und somit über dem Schmelzpunkt der verwendeten Turbinenwerkstoffe liegen. Anforderungen an Wärmedämmschichten sind neben einer geringen Wärmeleitfähigkeit, eine dem Substrat angepasste Wärmeausdehnung, um Spannungen und Rissbildung im Material zu vermeiden. Das Wärmedämmschichtsystem besteht dabei aus Grundwerkstoff, Haftvermittlerschicht und Wärmedämmschicht (WDS oder TBC<sup>29</sup>) /Luther 2008/. Bisher wird als Werkstoff für die Wärmedämmschichten hauptsächlich sog. YST, mit Yttrium teilstabilisiertes Zirkonoxid verwendet /IEF 2008/. Mit modernen Multiquellen-Plasma-Beschichtungsverfahren oder durch Elektronenstrahlaufdampfung wird das komplexe Schichtsystem in nanoskaliger Präzision und mit unterschiedlichen Materialkombinationen erzeugt. Durch die Erforschung verschiedener Materialien wird an der Optimierung gearbeitet, um die Betriebstemperaturen weiter erhöhen zu können und dadurch den Wirkungsgrad der Turbine zu steigern /Luther 2008/.

### **Titanaluminide**

Die intermetallische Legierungsgruppe der Titanaluminide kann als Zwitter zwischen Metall und Keramik angesehen werden. Sie sind, bei vergleichbarer Hochtemperaturfähigkeit, aufgrund ihres geringeren spezifischen Gewichts von etwa der Hälfte gegenüber den ansonsten für Hochtemperaturanwendungen eingesetzten Stählen und Nickelbasislegierungen, besonders für Anwendungen im Leichtbau (z. B. Turbinenschaufeln, Ventile, Rotoren, etc.), interessant /Harig et al. 1997/. Bisher blieb die Anwendung der Titanaluminide auf Temperaturen von 700 °C begrenzt, obwohl ihr Festigkeitspotenzial den Einsatz bei Temperaturen von 1.000 °C zulässt, da der Werkstoff bei hohen Temperaturen an Luft tiefgreifend aufoxidiert bzw. oxinitriert wird. Als Folge platzen die oxidischen Oberflächenschichten meist ab /Borany et al. 2004/. Die Anwendung des Halogeneffekts ermöglicht es, das Oxidationsproblem zu lösen und damit den Werkstoff auch bei Temperaturen bis 1.000 °C einzusetzen. Die Halogene Fluor, Chlor, Brom und Jod verhalten sich normalerweise aggressiv gegenüber metallischen Werkstoffen. Bringt man jedoch mit der Plasma-Immersion-Ionenimplantation

---

<sup>29</sup> TBC Thermal Barrier Coating



geringe Mengen in die äußerste Werkstoffzone ein, tritt ein Oxidationsschutzeffekt auf. Die Halogene lösen bei Temperaturen zwischen 700 und 1.000 °C das Aluminium selektiv in Form von Aluminiumhalogeniden aus der Werkstoffoberfläche heraus. Verlassen die gasförmigen Halogenide die Oberfläche, reagieren sie mit dem Sauerstoff der Umgebung. Es bildet sich eine hauchdünne keramische Schicht aus festem Aluminiumoxid, welche gasdicht ist und ein weiteres Oxidieren des Werkstoffes verhindert. Sollte diese Schicht abplatzen, heilt sie sich selbst. Durch den Einsatz dieser Nanoschutzschicht kann die erhöhte Hitzebeständigkeit zur Erhöhung des Wirkungsgrads von Turbinen und zu Gewichtseinsparungen genutzt werden /3Sat 2006, ChemLin 2004, Dechema 2010/.

### 4.3.2 Energieverteilung und -speicherung

Fortschritte in der Energieverteilung durch nanotechnologische Anwendungen werden z. B. im Bereich von Hochtemperatur-Supraleitern erwartet. Bereits heute, aber gerade hinsichtlich den zukünftigen Herausforderungen und Ansprüchen an die Energieversorgung, kommt dem Themenfeld der Energiespeicherung eine immer wichtigere Rolle zu. Die Nanotechnologie kann im Bereich der Energiespeicherung z. B. bei Superkondensatoren, bei Hochtemperatur-Supraleitern, bei Batterien und Akkumulatoren oder auch bei zukünftigen Wasserstoffspeichern zu Fortschritten bzw. Verbesserungen führen.

#### Superkondensatoren

Bei Superkondensatoren<sup>30</sup>, die bei vielen Anwendungen als Zwischenspeicher für Energie dienen, kann nanoporöses Elektrodenmaterial eingesetzt werden. Bei der Beladung eines Superkondensators wird Energie als Ladung oder Konzentration von Elektronen in einer elektrochemischen Doppelschicht auf der Materialoberfläche gespeichert. Die Energiedichte von Superkondensatoren ist bis zu 100-mal größer als bei konventionellen Kondensatoren, die Leistungsdichte ist 10-mal größer als bei Batterien und sie überzeugen durch Wartungsfreiheit und Zuverlässigkeit /Fischle 2005, Grüne et al. 2005, Nanoforum 2004/. Um eine deutliche Steigerung der Kapazität, im Vergleich zu einem konventionellen Kondensator zu erreichen, müssen die Elektroden eine sehr große Oberfläche aufweisen. Zudem muss die elektrochemische Schnittstelle eine große Ladungsspeicherfähigkeit besitzen, weshalb für die Elektroden Kohlenstoff mit Poren im Nanometerbereich verwendet wird. Dabei beträgt die Oberfläche der Kohlenstoff-Elektroden zwischen 1.000 und 2.000 m<sup>2</sup>/g.

Bei den Kohlenstoff-Elektroden kann durch den Einsatz der Nanotechnologie die Oberfläche weiter vergrößert werden. Dafür muss die Partikelgröße von 50 nm auf 2 nm reduziert werden /Nanoforum 2004/. Als Elektrodenmaterial wurde bisher Industrieruß verwendet. Es können jedoch auch Carbon-Aerogele verwendet werden, welche sich durch eine sehr große innere Oberfläche sowie kontrollierbare Porenverteilung und Porendurchmesser auszeichnen. Dadurch lassen sich ein guter Kontakt zum Elektrolyten und eine Erhöhung der

---

<sup>30</sup> Als Synonym für Superkondensatoren werden auch die Begriffe Doppelschicht-Kondensator und Supercap sowie firmenspezifische Bezeichnungen (Ultracap, Boostcap, Goldcap) verwendet



Energie- als auch Leistungsdichten erreichen. Auch der Einsatz mehrschaliger Kohlenstoffnanoröhren sowie fullerenartiger Partikel wird untersucht. Die durch die nanoporöse Morphologie erzielte Oberflächenvergrößerung soll dabei eine deutlich höhere Akkumulation elektrischer Ladungen in der für die Speicherung verantwortlichen elektrochemischen Doppelschicht erlauben und so zukünftig Energiedichten weit über 10 Wh/kg ermöglichen /Grüne et al. 2005, VDI-TZ 2006a/.

Superkondensatoren werden nach /Fischle 2005/ zur Spannungsunterstützung, zur schnellen Bereitstellung elektrischer Energie, z. B. zur Deckung von Leistungsspitzen, oder zur Schonung von Akkumulatoren eingesetzt. Die Bedeutung derartiger integrationsfähiger Superkondensatoren, die z. B. in mobilen Elektronikprodukten insbesondere zur Deckung kurzfristiger Verbrauchsspitzen eingesetzt werden, hat in den letzten Jahren zugenommen /VDI-TZ 2006a/. Vielversprechend ist die Kombination aus Superkondensator mit sehr hoher Kapazität und Leistungsdichte mit einem Akkumulator mit hoher Energiedichte. Die Leistung eines elektrisch angetriebenen Fahrzeugs lässt sich kurzfristig, z. B. zum Beschleunigen, deutlich erhöhen und beim Bremsen erzeugte elektrische Energie kann schnell gespeichert werden. Weitere Applikationen sind die unterbrechungsfreie Stromversorgung, Stützung von U-Bahnnetzen, Start von Lokomotiven und Netz-Überbrückungsfahrten, Energiepuffer in der Photovoltaik sowie Schlupfregelungen bei Windkraftanlagen /Fischle 2005, Grüne et al. 2005/.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert im Rahmen des Super-Kon Projektes die Entwicklung von Superkondensatoren. Als wichtiges Anwendungsgebiet für Super-Kondensatoren wurden in einer ersten Projektphase von 2009 bis 2010 der Markt der erneuerbaren Energien und die Speicherung von Windenergie identifiziert /Bertz 2011/. Nach /Suckau 2011/ ist das Ziel des Projektes, mit neuartigen Kondensatoren aus Kompositmaterialien, Energiedichten von, in der Anwendbarkeit begrenzten, Doppelschichtkondensatoren (Supercaps) zu erreichen.

Neu entwickelte Ultrakondensatoren eines amerikanischen Unternehmens sollen nach Angaben von /Bullis 2011/ eine Energiedichte von 20 Wh/kg ermöglichen. Konventionelle Ultrakondensatoren erreichen ca. 5 Wh/kg. Das Ziel des Unternehmens sind Werte von 35 bis 40 Wh/kg.

Die Prozesse zur Herstellung der für Superkondensatoren benötigten nanostrukturierten Elektroden sind häufig sehr empfindlich und daher kaum für den industriellen Maßstab geeignet, oder es werden Additive verwendet, die jedoch den Wirkungsgrad der Superkondensatoren reduzieren. /Lu et al. 2011/ haben einen Herstellungsprozess für Elektroden aus einem Nickeloxid/Nickel-Komposit entwickelt, der diese Einschränkungen überwinden kann. Die Charakteristika der Elektroden erlauben eine hohe Kapazität und Leistungsdichte.

Eine neue Stoffklasse, mit interessanten Eigenschaften für den Einsatz als Superkondensatoren, sind spezielle gerüstartig aufgebaute, mikroporöse organische Polymere. /Kou et al. 2011/ ist es gelungen, ein stickstoffhaltiges Gerüst zu synthetisieren, dessen Porengröße für den Austausch von Ionen optimal sind. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für ein schnelles Auf- und Entladen. Durch die Kombination verschiedener vorteilhafter Eigenschaf-

ten ermöglicht das neue Material sehr hohe Stromspeicher-Kapazitäten und hohe Energiedichten.

### **Hochtemperatur-Supraleiter**

Nach /Beck 2006/ sind Supraleiter Materialien, welche elektrischen Strom unterhalb einer Sprungtemperatur widerstands- und damit verlustfrei leiten. Da Supraleitfähigkeit auf quantenmechanischen Effekten beruht, können Anwendungen mit supraleitenden Materialien der Nanotechnologie zugerechnet werden. In der Energietechnik werden Hochtemperatur-Supraleiter z. B. als verlustfreie Kabel, als Strombegrenzer und als magnetische Lager in Schwungradspeichern eingesetzt. Auf dem Gebiet der Energieübertragung werden Hochtemperatur-Supraleitende-Kabel in ersten Demonstrationsprojekten getestet /VDI-TZ 2006b/. Kohlenstoffnanoröhren könnten einen Durchbruch bei supraleitenden Materialien bringen, da bei diesen eine Supraleitfähigkeit bei Raumtemperatur für möglich gehalten wird /Paschen et al. 2004/. In Albany im US-Bundesstaat New York wurde zu Testzwecken ein supraleitendes Kabel mit einer Länge von 350 m installiert, welches in der Lage ist, drei bis fünf Mal mehr Strom als konventionelle Leitungen derselben Größe zu transportieren. Durch Kühlung des auf Keramik basierenden Supraleiters mit flüssigem Stickstoff bei Temperaturen von ca. -200 °C wird ein sehr kleiner elektrischer Widerstand erreicht /Moscovic 2007/.

Neben dem Einsatz als Transportleitung ist auch eine Energiespeicherung in supraleitenden magnetischen Energiespeichern denkbar. Die Energie könnte dabei in einer supraleitenden Spule als endloser Kreisstrom ohne Widerstandsverluste gespeichert werden. Anwendungen wären beim Ausgleich von Lastspitzen und bei der Frequenz- und Spannungssteuerung denkbar /Grüne et al. 2005/.

Nach /Arnold 2011/ scheint für die 2. Generation von Hochtemperatur-Supraleitern, die anstatt Silber Nickel- oder Stahl-Bänder einsetzen, durch die beginnende Industrialisierung der Herstellungsprozesse, der kommerzielle Einsatz in greifbarer Nähe. Jedoch können nach /Arnold 2011/ bisher keine Kabel mit großer Länge gefertigt werden. „Um einen Kilometer Kabel fertigen zu können, benötigt man zwischen 200 und 300 km Draht“. Weltweit werden ca. 1.000 bis 1.500 km keramischer Hochtemperatur-Supraleiter hergestellt. US-Forschern ist es gelungen, sehr dünne Stromkabel aus Hochtemperatur-Supraleitern zu fertigen. Bei einem Durchmesser von nur 7,5 mm und bei einer Temperatur von 76 Kelvin ermöglichen diese Kabel eine Stromstärke von 2.800 Ampere. Im Vergleich dazu können Wismut-basierte Kabel mit einem Durchmesser von 7 cm ca. 3.000 Ampere transportieren /Laan et al. 2011/.

### **Batterien und Akkumulatoren**

Die elektronischen Eigenschaften von Nanomaterialien können auch zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Batterien und Akkumulatoren eingesetzt werden. Ein Problem von Batterien und Akkumulatoren ist die Selbstentladung. /mPhase 2008/ hat eine Batterie vorgestellt, die dieses Problem lösen soll. Die Batterie besteht aus Elektroden am Boden der Batterie und

einem flüssigen Elektrolyt, welche durch eine nanostrukturierte Membran voneinander getrennt sind. In ruhendem Zustand hat der Elektrolyt keinen Kontakt mit den Elektroden. Er fängt erst durch eine Aktivierung an zu fließen und kommt dadurch in Kontakt mit den Elektroden. Solche Batterien könnten eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten aufweisen /Bachmann et al. 2007, mPhase 2008/.

Durch Sol-Gel-Verfahren hergestellte nanokristalline Materialien eignen sich aufgrund ihrer schaumartigen Aerogel-Struktur als Elektrodenmaterial. Aerogele können größere Mengen an Energie speichern als konventionelle Materialien und bei Akkumulatoren kann die Ladegeschwindigkeit erhöht werden. Kohlenstoffnanoröhren sind aufgrund ihrer großen elektrochemisch zugänglichen Oberfläche und ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit attraktive Elektrodenmaterialien. Durch ihre Verwendung kann die Speicherkapazität von Li-Ionen-Akkumulatoren um 30 % erhöht werden /Grüne et al. 2005, RS 2004, VDI-TZ 2006a/. Neben polymeren Batterie- und Akkumulatorseparatoren werden bereits flexible Membranfolien eingesetzt. Die Separatorfolien bestehen im Inneren aus einem Vlies, auf das von beiden Seiten eine dünne Schicht einer Metalloxidmischung, welche aus Nanopartikeln besteht, aufgetragen wird. Vielversprechend ist die Anwendung dieser Separatorfolie bei großvolumigen Li-Ionen-Akkumulatoren für Traktionsanwendungen aber auch für den stationären Einsatz. Erfolgreich wurde die Folie bereits bei Li-Ionen-Akkumulatoren in einem umgebauten, auf dem Markt verfügbarem, Hybrid-Fahrzeug getestet /BMBF 2005, Degussa 2006a, Grüne et al. 2005, Lange 2008/.

Durch eine zunehmende Nachfrage nach tragbaren elektronischen Geräten steigt auch der Bedarf an leichten und leistungsfähigen Akkumulatoren. Darüber hinaus gewinnen Akkumulatoren in Zukunft in Kombination mit der regenerativen Stromerzeugung an Bedeutung. Berücksichtigt man die steigende Zahl an Hybrid- und zukünftig Elektrofahrzeugen, so kann die Nanotechnologie im Bereich der Batterien und Akkumulatoren einen großen Einfluss nehmen /Grüne et al. 2005, RS 2004/. Ein von einer amerikanischen Firma entwickelter Li-Ionen-Akkumulator kann durch den Einsatz von Nanopartikeln fünfmal mehr Energie speichern, innerhalb von fünf Minuten auf 90 % seiner Kapazität aufgeladen werden und hat eine deutlich längere Lebensdauer. Verwirklicht wurde dies durch Nanopartikel aus Aluminium, Mangan oder Titan, mit denen die Elektroden beschichtet werden und somit ein schneller Ionen-Fluss stattfinden kann /net-t 2006/. Eine kommerziell erhältlicher Li-Ionen-Akkumulator hat durch den Einsatz von nanostrukturierten Hybridelektroden eine 30 % höhere Speicherkapazität erreicht /Bachmann et al. 2007/.

Wissenschaftler der Northwestern University in Evanston, USA, ist es gelungen, die Leistungsfähigkeit von Li-Ionen-Akkus um den Faktor 10 zu erhöhen sowie die Ladezeit zu verkürzen. Um dies zu erreichen, verwendeten sie eine Anode, die aus Silizium und Graphen besteht. Sie platzierten Siliziumcluster zwischen die Graphenlagen, wodurch das Silizium stabilisiert wird. Eine höhere Kapazität wird auch durch Anoden, die nur aus Silizium gefertigt sind, erreicht, dabei besteht jedoch das Problem, dass sich Silizium beim Anlagern von Lithium-Ionen stark ausdehnt und zusammenzieht. Dadurch reduziert sich seine Speicherkapazität deutlich. Durch den Einsatz des Silizium-Graphene-Komposites gelang es, dieses Problem zu lösen /Zhao et al. 2011/. Einen anderen Ansatz für die gleiche Problematik wähl-

ten /Kovalenko et al. 2011/. Sie vermischten Siliziumnanopuder mit Alginat, welches aus Braunalgen, wie z. B. dem Riesenseetang *Macrocystis pyrifera*, gewonnen werden kann, und verwendeten diese Mischung als Elektrodenmaterial. Dadurch erreichten Sie eine achtfach höhere Kapazität als herkömmliche Li-Ionen-Akkus.

/Frater et al. 2008/ haben einen Akkumulator aus Papier entwickelt, der zu 90 % aus Zellulose besteht und die typischen Eigenschaften von Papier aufweist. Er ist entsprechend dünn und ähnlich gut formbar. Mithilfe von in das Material eingearbeiteten Kohlenstoffnanoröhren, werden die elektrischen Eigenschaften erreicht. Zusätzlich enthält die Zelluloseschicht eine ionische Flüssigkeit aus Salzen, die als Elektrolyt dient. Somit kann eine elektrische Spannung zwischen den Kohlenstoffnanoröhren und einer Lithium-Elektroden-schicht, die auf der anderen Seite der Zelluloseschicht liegt, aufgebaut werden. Mit ähnlichen Verfahren können die Forscher auch Superkondensatoren erzeugen. Hier kommen zwei Schichten der Kohlenstoffnanoröhren zum Einsatz. Damit lassen sich Akkumulator und Superkondensator in Kombination herstellen, welche dadurch als vielseitige Stromquelle dienen, die sowohl langfristig Energie liefern als auch kurzfristig größere Mengen Strom zur Verfügung stellen kann /Dewald 2007, Pushparaj et al. 2007/. Durch das geringe Gewicht ist eine Nutzung in Fahrzeugen, z. B. als Belag auf der Autotür denkbar. Weitere Anwendungen sind im medizinischen Bereich möglich, da der Akkumulator auch mit Blut oder Schweiß als Elektrolyt funktioniert und beispielsweise in Herzschrittmachern verwendet werden könnte. Für einen kommerziellen Einsatz müssen die Herstellungskosten gesenkt werden. Die Ausgangsmaterialien sind zwar nicht teuer, der Herstellungsprozess aber sehr komplex. Ziel ist es eine Maschine zu entwickeln, die die elektrischen Elemente wie bei einer Druckmaschine auf das Papier drucken kann /Frater et al. 2008/.

### **Wasserstoffspeicher**

Bei den physikalischen Speichermethoden wird zwischen Druck- und Flüssigspeichern unterschieden. Bei Druckspeichern ist die Speicherdichte begrenzt und ein hoher Druck bedeutet hohe Sicherheitsauflagen. Die Speicherung in flüssiger Form beinhaltet einen Energieverlust durch die Abkühlung und es kommt zu Abdampfungsverlusten. Eine weitere Möglichkeit ist die Speicherung in chemischer Form. Ein gutes Speichermaterial für Wasserstoff benötigt eine große Oberfläche, sodass die Wasserstoffatome adsorbiert werden können. Metallhydridspeicher mit nanokristallinen Partikeln erreichen eine Speicherkapazität von unter 2 Gew. %. Durch die Verwendung verschiedener Methoden der Mikro- und Nanostrukturierung versucht man einen höheren Anteil zu erreichen. So kann man mit Natrium-Aluminiumhydrid (Natriumalanat) reversible Speicherkapazitäten von bis zu 5 Gew. % erzielen. Nanoskalige Materialien besitzen deshalb eine große Bedeutung, weil bei Umwandlungsvorgängen in den Speichern Diffusionsprozesse im Festkörper einen gewichtigen Einfluss haben und somit die Austauschprozesse stark beschleunigt werden. Bei der Diskussion von Kohlenstoffnanoröhren als Speichermedium haben sich die anfänglich hohen Erwartungen nicht bestätigen lassen und ihr Einsatz steht daher noch offen /Fichtner 2003, Grüne et al. 2005, Nanoforum 2004/.

Der Nanowürfel als Speichermedium für Wasserstoff basiert auf Methoden der Nanostrukturierung. Es werden dabei Metalloxide und organische Verbindungen, z. B. Zinkoxid und Terephtalsäure, genutzt, um ein Netz aus nanometergroßen Hohlräumen, welche dreidimensional miteinander verwoben sind, zu erzeugen. Es wird dadurch ein Verhältnis von Oberfläche zu Masse von ca.  $3.400 \text{ m}^2/\text{g}$  erreicht. Die einzelnen Nanowürfel können abhängig vom Herstellungsprozess zwischen  $1 - 2 \text{ }\mu\text{m}$  und  $0,5 \text{ mm}$  groß sein. Neben Gasen kann auch Wasserstoff von den Poren des Nanowürfels wie bei einem Schwamm aufgesaugt werden. Dabei werden Stahl Druckflaschen mit organischen Metalloxid-Clustern gefüllt, wodurch die Flaschen bei Drücken von bis zu 40 bar eine höhere Speicherkapazität für Gas aufweisen. Bei Raumtemperatur wird z. B. für Wasserstoff eine um ca. 15 % höhere Aufnahmefähigkeit erreicht. Die Herstellung der Nanowürfel erfolgt mit etablierten Herstellungstechnologien. Es ergeben sich Anwendungen als Wasserstoffspeicher im mobilen Bereich zur Versorgung einer Brennstoffzelle mit kleiner Leistung und in anderen Bereichen als Gasfilter oder Katalysator /BASF 2004, 2008/.

Nach /BASF 2010/ konnten mit einem neuen Verfahren sogenannte MOFs (Metal-Organic Frameworks) bzw. metallorganische Gerüstmaterialien im Industriemaßstab lösungsmittelfrei hergestellt werden. MOFs sind hochkristalline Strukturen, die aufgrund nanometergroßer Poren Wasserstoff und andere energiereiche Gase speichern können.

Für den Einsatz von Wasserstoff im Verkehrssektor ist eine effiziente Speicherung unabdingbar bzw. stellt nach /Hirscher 2011/ noch ein großes Hemmnis dar. Auch er sieht im Einsatz von MOFs eine Lösungsmöglichkeit. Eine neuentwickelte Variante (MOF-210) zeigte besonders herausragende Eigenschaften und stellt, seiner Meinung nach, einen großen Fortschritt bei der Suche nach Materialien zur Wasserstoffspeicherung dar.

/Harder et al. 2011/ untersuchen Cluster aus molekularem Magnesiumhydrid als Modellspezies, um die Prozesse bei der Wasserstoffspeicherung genauer zu untersuchen. Nach Computerberechnungen sei es möglich, dass diese Cluster Wasserstoff bereits bei deutlich unter  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  abgeben. So bauten die Wissenschaftler einen Magnesiumhydrid-Cluster aus Moelkülen auf (Bottom-up-Ansatz, siehe Kapitel 4.2.1), mit dem sie zeigen konnten, dass molekulare Cluster Wasserstoff bereits bei Temperaturen um  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  freisetzen können. Der bisher vorhandene Cluster ist zwar nicht als Wasserstoffspeicher praktikabel, lässt sich jedoch leicht untersuchen und kann als Modellsystem zur Analyse der Vorgänge bei der Wasserstoffspeicherung genutzt werden.

### 4.3.3 Energienutzung

Die möglichen Auswirkungen der Nanotechnologie auf die Energiewirtschaft im Bereich der Energienutzung sind bereits zu erkennen. So spielt die Nanotechnologie bei neuen Beleuchtungs- und Displaytechnologien eine bedeutende Rolle. Im Baubereich (hochfester Beton, Einsatzmöglichkeiten in Fenstern) oder auf dem Gebiet von Isolationsanwendungen werden große Fortschritte durch die Nanotechnologie erwartet. Durch den Einsatz von Polycarbonat in der Automobilverschiebung, Nanolacke, Nanofüllstoffe in Autoreifen oder reibungsreduzierende Beschichtungen kann die Nanotechnologie eine Reduktion des Energiebedarfs im



Verkehrssektor ermöglichen. Im industriellen Bereich wird der Einsatz der Nanotechnologie z. B. bei Katalysatoren, in der Kunststoffproduktion, bei Filterwerkstoffen oder bei Klebstoffen diskutiert.

### **Beleuchtungstechnologien**

Im Bereich der Beleuchtungstechnologien werden so genannte Lichtemittierenden Dioden (LED) bereits heute eingesetzt. Eine weitere zukünftige Beleuchtungstechnologie stellen organische Leuchtdioden (OLED) dar, die neben der Beleuchtungstechnik auch in der Displayentwicklung eine wichtige Rolle spielen.

#### **Lichtemittierende Dioden (LED)**

LED sind Halbleiter-Lichtquellen, die aus nanometerdicken Halbleiterschichten Licht erzeugen. In den Halbleiterschichten existiert ein n-leitender Bereich (negative Ladungen), ein p-leitender Bereich (positive Ladungen) und ein pn-Übergang (Sperrschicht). Durch das Anlegen einer Spannung überwinden Elektronen im n-Bereich die Sperrschicht und verbinden sich im p-Bereich mit den positiven Ladungen. Dabei wird Energie frei, die in Form von elektromagnetischer Strahlung abgegeben wird. Je nach Halbleitermaterial wird jeweils Licht in einer bestimmten Farbe (rot, grün, gelb und blau) abgegeben. LED für Beleuchtungsanwendungen werden auf Basis von Aluminium Indium Gallium Phosphid (AlInGaP) für rote oder gelbe und Indium Gallium Nitrid (InGaN) für grüne und blaue LED hergestellt. Zur Herstellung weißer LED gibt es zwei Möglichkeiten. Bei der additiven Farbmischung entsteht eine weiße LED, indem verschieden farbige LED-Chips in einer LED kombiniert werden. Bei der Lumineszenzkonversion absorbieren Lumineszenzfarbstoffe teilweise die von blauen oder blau-grünen LED erzeugte Strahlung und emittieren selbst orangene Strahlung. Die Überlagerung dieser Strahlungen wird als weißes Licht wahrgenommen. Der Farbton der weißen LED ist bei diesem Verfahren über die Wahl des Farbstoffes einstellbar /FGL 2006, LED-Info 2006, Luther et al. 2004, Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/.

Verstärkt wird der Einsatz von LED als Alternative zu konventionellen Lichtquellen diskutiert, da angenommen wird, dass LED effizienter für die Lichterzeugung genutzt werden können. Das technische Problem einer LED ist, dass die interne Umwandlung von bis zu 90 % der Energie in sichtbares Licht zwar sehr hoch ist, aber nur ca. 20 – 30 % des Lichts aus dem Bauelement ausgekoppelt werden können. Heute bieten LED Lichtausbeuten, die mit denen von Halogen-Glühlampen vergleichbar sind und auch die Leistungen von Kompakt-Leuchtstofflampen erreichen. Ziel für eine Marktdurchdringung in der Allgemeinbeleuchtung mit weißen LED ist eine Lichtausbeute<sup>31</sup> von 200 lm/W, welche bis 2020 realisiert werden soll. Neben der Allgemeinbeleuchtung können LED auch im Automobilbereich (Innenraum, Heckbeleuchtung, Frontscheinwerfer) und in der Straßen-Signal-Beleuchtung eingesetzt werden. In den USA wurden bereits über ein Drittel aller Ampelanlagen auf LED-Beleuchtung

---

<sup>31</sup> Die Lichtausbeute ist ein Maß für die effektive Umwandlung elektrischer Energie in Lichtmenge. Die Einheit ist Lumen/Watt [lm/W]



umgerüstet /Edwards 2006, FGL 2006, Jüstel 2006a, OIDA 2002, Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/.

Nach /BG-EITEM 2011/ wird bis zum großflächige Einsatz von LED, z. B. für die Bürobeleuchtung, aufgrund der höheren Gesamtkosten noch einige Zeit vergehen, aber auch /BG-EITEM 2011/ geht davon aus, dass die LED in der Allgemeinbeleuchtung zukünftig eine große Rolle spielen wird. Bereits in 2009 initiierte das BMBF die „LED-Leitmarktinitiative“, in deren Rahmen ein bundesweiter Wettbewerb ausgerufen wurde. Das Ziel war es, „die Berührungshemmnisse zu überwinden und die bevorstehende, breite Markteinführung der LED-Technologie in Deutschland zu unterstützen [...]“ /BMBF 2011/. Es wird davon ausgegangen, dass mit „künftigen LED-Lichtquellen in Kombination mit intelligenten Lichtmanagementsystemen [...] bis zu zwei Drittel [...] Energie eingespart [...] werden (können)“ /BMBF 2011/. Ein im Rahmen dieser Initiative gefördertes Projekt ist das LED Netzwerk Schwarzwald. Hierbei wurde bis Sommer 2012 im Rahmen des Demonstrationsprojektes die großflächige Einführung von LEDs in für Deutschland typischen Kommunalstrukturen (Ober-, Unter- und Kleinzentrum) getestet und evaluiert /Link 2011/.

Hinsichtlich möglicher Ökoeffizienzpotenziale durch den Einsatz von LED kommen Untersuchungen von /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/ zu dem Ergebnis, dass bei der ökologischen Beurteilung von Lichtquellen für Beleuchtungszwecke fast nur der Energieverbrauch in der Gebrauchsphase von Bedeutung ist. Weiße LED schneiden in der Studie zwar gegenüber klassischen Glühlampen besser ab, sind aber im Vergleich mit Energiesparlampen noch im Nachteil. Erst bei Lichtausbeuten oberhalb von 65 lm/W können LED mit Energiesparlampen hinsichtlich der Umweltauswirkungen in Konkurrenz treten.

Nach /Württemberg 2011/ ist die Helligkeit von LEDs inzwischen ausreichend um mit konventionellen Leuchtmitteln konkurrieren zu können. Bei einer hohen Effizienz ist jedoch die Farbtemperatur noch ein Problem und die bei einer Umrüstung anfallenden Investitionskosten sind hoch. In den kommenden Jahren werden Verbraucherpreise erwartet, die auf dem Niveau von Energiesparlampen liegen.

### **Organische Leuchtdioden (OLED)**

Organische Leuchtdioden sind Bauelemente aus organischen Schichten, die beim Anlegen einer Spannung Licht aussenden. Die Schichten können übereinander entweder auf ein flexibles und durchsichtiges Material (z. B. Polyethylen) oder auf ein starres Trägersubstrat wie Glas aufgebracht werden. Die eigentliche Licht emittierende Schicht besteht aus einem organischen Material und ist wenige 10 nm dick. Die Auswahl des Materials bestimmt dabei die Leuchtfarbe der OLED. Gegenüber Leuchtdioden aus anorganischen Halbleitern haben OLED den Vorteil, dass sie aufgrund der chemischen Variabilität praktisch in allen Farben hergestellt werden können, dass sich die Dünnschichtsysteme großflächig auf flexiblen Trägern aufbringen lassen und dass die Bauelemente potenziell kostengünstig hergestellt werden können. Darüber hinaus sind sie sehr effizient im Vergleich zu herkömmlichen Glühlampen. Aufgrund dieser vorteilhaften Eigenschaften können OLED als Displays und als Lichtquellen eingesetzt werden. Obwohl bereits erste Produkte auf dem Markt sind, gibt es noch einige Probleme zu lösen. Die leuchtenden Polymere dürfen nicht mit Wasser oder Sauerstoff in Be-

rührung kommen und das für die Farbe blau verwendete Polymer verliert nach kurzer Zeit seine Leuchtkraft /BMBF 2006, Hartmann 2006, Paschen et al. 2004/.

Nach /OLLA 2009/ können Festkörperbeleuchtungstechnologien (LED und OLED) als effiziente Möglichkeiten angesehen werden, Energie direkt in sichtbares Licht zu wandeln. LED stellen dabei die beste Möglichkeit für eine direkte Beleuchtung dar, wohingegen OLED eine vielversprechende Technologie für großflächige Beleuchtungsanwendungen darstellen. Dabei sind OLED die ersten dünnen und flächigen Lichtquellen, die ein gleichmäßiges Licht ohne große Wärmeentwicklung erzeugen. OLED mit einer Lebensdauer von über 10.000 Stunden bei einer Effizienz bzw. Lichtausbeute von 50 lm/W wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes bereits realisiert. Um auf dem Massenmarkt bestehen zu können, sind jedoch Lichtausbeuten von 100 lm/W und eine Lebensdauer von 100.000 Stunden notwendig /OLLA 2009/. Im Rahmen eines weiteren Forschungsprojektes sollen diese Werte erreicht werden /OLED100 2009, 2011/.

## Displaytechnologien

Der Markt für Displaytechnologien ist sehr dynamisch und weist ein großes Wachstum auf. Nach /Yersin 2010/ zeichnet sich in der Bildschirm- und Beleuchtungstechnik ein drastischer Wandel ab. Bis vor einigen Jahren dominierte im Bereich der Displays noch die CRT-Technologie<sup>32</sup>. Seit einigen Jahren steigt jedoch der Anteil an LCD-Displays<sup>33</sup> stetig an. Nach /Stobbe et al. 2009/ ist die Anzahl an LCD- und CRT-Monitoren im Sektor Haushalte mit je über 14 Mio. Geräten fast identisch (Stand 2007). Bei Unternehmen sind LCD-Monitore heute schon stärker verbreitet und CRT-Monitore spielen bereits eine untergeordnete Rolle. Für großflächige Anwendungen werden aktuell auch Plasmabildschirme<sup>34</sup> eingesetzt. Neue, nanobasierte Technologien im Bereich von Displays stellen z. B. Feldemitterdisplays (CNT-FED<sup>35</sup>) auf Basis von Nanoröhren und OLED-Displays dar. Mit der OLED-Technologie wird es nach /Yersin 2010/ zukünftig möglich sein, flache Displays oder Leuchtflächen mit einer Dicke von unter 0,5 mm zu fertigen. So sind z. B. Leuchtflächen als Tapeten mit sehr geringem Energieverbrauch denkbar. Im Bereich der Displaytechnologien ist es dadurch möglich, dass Farbbildschirme mit bisher nicht erreichbarer Farbechtheit, Helligkeit und Blickwinkelunabhängigkeit, mit geringem Gewicht sowie sehr kleinem Stromverbrauch hergestellt werden können. Dabei wird davon ausgegangen, dass einfache und kostensparende Herstellungsverfahren wie Siebdruck oder Tintenstrahldruck eingesetzt werden können.

OLED-Displays haben eine einfache Struktur mit einem oder mehreren organischen Filmen zwischen zwei Elektroden. Dabei liegt die typische Dicke bei etwa 100 bis 200 nm. In der Regel werden zwei Arten organischer Materialien eingesetzt, einerseits langkettige Polymere, die aus einer Lösung verarbeitet werden, und andererseits kleine Moleküle, die unter

---

<sup>32</sup> CRT Cathode Ray Tube, Kathodenstrahlröhre

<sup>33</sup> LCD Liquid Crystal Displays, Flüssigkristallbildschirme

<sup>34</sup> PDP Plasma Display Panel

<sup>35</sup> CNT-FED Carbon Nanotube- Field Emission Display

Vakuum thermisch aufgedampft werden. Bei einer Spannung von 3 bis 10 V werden von einem Kathodenmaterial mit niedriger Austrittsarbeit Elektronen in den Film injiziert. Als Kathodenmaterial sind Metalle wie Barium, Kalzium oder auch bestimmte Fluoride geeignet. Gleichzeitig werden Löcher (positive Ladungen) von einer transparenten Anode (z. B. Indiumzinnoxid, ITO) mit hoher Austrittsarbeit in das organische Material injiziert. Durch das angelegte elektrische Feld wandern Löcher und Elektronen durch den organischen Film und bilden bei ihrer Rekombination angeregte Zustände, die unter Aussendung von Photonen zerfallen. Durch die transparente ITO-Elektrode wird das erzeugte Licht ausgekoppelt. Der Einsatz bestehender Technologie-, Fertigungs- und Prozess-Infrastrukturen innerhalb der Flachbildschirm-Industrie kann zu einem schnellen und kostengünstigen Markteinstieg dieser neuen Displaygeneration führen.

Im Vergleich mit LCD-Displays bieten OLED-Displays verschiedene Vorteile: höherer Kontrast (100:1), weiterer Betrachtungswinkel ( $160^\circ$ ), weiterer Betriebstemperaturbereich, dünneres Profil der aktiven Schicht, besser handhabbare Leistungsaufnahme sowie schnellere Reaktion und Video-Bildraten-Fähigkeit /Antoniadis et al. 2004/. Für den Bau von hoch-effektiven OLED sind die verwendeten Leuchtmaterialien (Emitter-Moleküle) entscheidend. Diese können auf unterschiedliche Weise realisiert werden, z. B. unter Verwendung rein organischer oder metall-organischer Moleküle. Dabei lässt sich zeigen, dass die Lichtausbeute von OLED mit metall-organischen Substanzen, den sog. Triplett-Emittern, wesentlich größer sein kann (Faktor vier) als bei rein organischen Materialien /Yersin 2010/.

CNT-FED-Displays befinden sich überwiegend noch im Forschungsstadium. Basisbestandteile eines Feldemitter-Displays sind die rückwärtige Platte mit der Kathodenschicht, eine Vakuumlücke und anschließend eine Frontplatte, die auf der Innenseite mit einer ITO-Schicht als Anode beschichtet ist. Einer der entscheidenden Bestandteile eines CNT-FED ist die Kathodenschicht (Emitterschicht) auf der rückwärtigen Platte, da die Art, die Charakteristik und die Beschaffenheit der Emitter entscheidend für die Bildqualität, den Stromverbrauch während des Gebrauchs und die Lebensdauer sind. Aufgrund der Anforderungen an FED, wie z. B. möglichst geringe Größe und Durchmesser, Stabilität bei hoher Stromdichte, hohe Leitfähigkeit, geringer Energieverlust und große chemische Stabilität, sind Kohlenstoffnanoröhren besonders für den Einsatz in FED geeignet.

Die Kathodenschicht stellt das komplexeste Bauteil eines CNT-FED dar. Auf dem Glassubstrat ist zunächst eine Schicht Leiterbahnen (-drähte) aufgetragen. Über dieser Schicht liegt die Emitterschicht aus Nanoröhren (kalte Kathode). Darüber liegt nochmals eine Elektrodenschicht, deren Bahnen jedoch rechtwinklig zur ersten Elektronenschicht liegen. Damit wird die zweite Richtung der Pixel definiert, welche an den jeweiligen Kreuzungspunkten der ersten und zweiten Elektrodenschicht liegt. Die Elektronen aus der Emitterschicht können durch die in die zweite Schicht eingätzten Lücken ins Vakuum und zur Anodenschicht gelangen. Zwischen Kathoden- und Anodenschicht besteht ein Vakuum. Gegenüber jedem Pixel der Kathodenschicht liegt ein Phosphorbereich ähnlicher Größe über einem transparenten Leitermaterial, welches die Anode bildet.

FED arbeiten allgemein wie Kathodenstrahlröhren mit vielen parallel emittierenden kalten Feldelektronenquellen pro Bildelement und erreichen daher ähnliche Charakteristika

wie herkömmliche CRT hinsichtlich Bildhelligkeit, Farbwiedergabe, Blickwinkel und Wiedergabegeschwindigkeit. Ein großer Vorteil des FED ist, dass es durch das Anlegen eines elektrischen Feldes zu einem kalten Elektronenaustritt an der Spitze kommt, wodurch weitaus weniger Energie verbraucht wird, als bei der herkömmlichen CRT, die stark aufgeheizt werden müssen /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/.

/Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/ vergleichen unterschiedliche Displaytechnologien in Bezug auf ihre Leistungsaufnahme in der Gebrauchsphase. Dabei wird ersichtlich, dass die beiden beschriebenen nanotechnologischen Displaytechnologien hinsichtlich der Energieeffizienz deutliche Vorteile aufweisen (vgl. **Tabelle 4.3**). Neben der Leistungsaufnahme während des Gebrauchs ist auch der Energieverbrauch über den gesamten Lebensweg wichtig.

**Tabelle 4.3:** Energieleistungsaufnahmen von Displaytechnologien in der Gebrauchsphase

Jahr	Technik	2000	2005	2010
Größe		32“	50“	50“
Energieleistungsaufnahme	CRT	200 W	230 W (HDTV <sup>36</sup> )	200 W (HDTV)
	LCD	140 W	120 W	100 W
	PDP	300 W	200 W	100 W
	OLED	k. A.	60 W	30 W
	CNT-FED	70 W	70 W	40 W

Der Energieverbrauch unterschiedlicher Displaytechnologien in den einzelnen Lebenswegstufen sowie der Gesamtenergieverbrauch sind nach /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/ in **Tabelle 4.4** dargestellt. Es wird bei der OLED-Technologie in zwei Varianten unterschieden. In den Stufen Vorproduktion und Herstellung kann bei OLED aufgrund des einfacheren Aufbaus mit geringeren Energieverbräuchen gerechnet werden (Variante A: 10 % Energieeinsparung, Variante B: 30 % Energieeinsparung).

**Tabelle 4.4:** Energieverbrauch unterschiedlicher Displaytechnologien in den einzelnen Lebenswegstufen

Technologie (Stand 2005)	Vorproduktion [MJ]	Herstellung [MJ]	Gebrauch [MJ]	Summe [MJ]
CRT	366	18.300	2.290	20.956
LCD	633	1.440	853	2.926
PDP	633	1.440	1.422	3.495
OLED 10%	570	1.296	427	2.293
OLED 30%	443	1.008	427	1.878
CNT-FED	570	1.440	498	2.508

Es wird deutlich, dass die OLED-Varianten aufgrund des geringeren Energieverbrauchs während der Gebrauchsphase am Besten abschneiden. Auch wenn alle Lebenswegstufen betrachtet werden, bleibt der energetische Vorteil der OLED-Technologie erhalten. Energieeffizienzsteigerungen für den gesamten Produktionsweg bei OLED liegen nach /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/ durchaus im Bereich des Möglichen. Es muss

<sup>36</sup> HDTV High definition TV, hochauflösendes Fernsehen

hierzu jedoch gelingen, die anvisierten Material- und Energieeffizienzen einerseits zu erreichen und andererseits das bisherige Problem der Langzeitstabilität der Leuchtstoffe zu lösen. Auch CNT-FED weisen geringere Energieverbräuche im Vergleich zu LCD auf. Voraussetzung ist dabei, dass die angegebenen Energieverbräuche in den Stufen Vorproduktion und Herstellung zukünftig bei CNT-FED auch umgesetzt werden können. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass, eine 20 bis 30 %ige Energieeinsparung gegenüber LCD über den gesamten Lebensweg möglich wird, wenn es gelingt, Steigerungen bei Material- und Energieeffizienz in einer Massenproduktion umzusetzen.

Mit den bisher auf Silizium-Technik basierenden Transistoren ist die realisierbare Größe von OLED-Displays begrenzt. Durch den Einsatz von Nanoröhren-Netzwerken, die eine höhere Stabilität aufweisen, konnten Forscher dieses Problem lösen. Darüber hinaus können die damit hergestellten Transistoren bei einer niedrigeren Spannung betrieben werden, wodurch sich nicht nur die Energieeffizienz, sondern auch die Lebensdauer der organischen Leuchtdioden verlängern lässt /McCarthy et al. 2011/.

Ein koreanisches Konsortium aus Unternehmen und Forschungseinrichtungen plant bis 2018 einen 40 Zoll Display auf den Markt zu bringen /OLED-A 2011/.

Quantenpunkte können aufgrund ihrer außergewöhnlichen optischen Eigenschaften durch Anregung Licht emittieren und stellen daher eine weitere neue Displaytechnologie dar. Sie erzeugen ein sehr reines und helles Licht und decken trotzdem ein ganzes Farbspektrum ab. Im Vergleich zu Flüssigkristalldisplays verbrauchen sie nur etwa ein Dreißigstel der Strommenge, was maßgeblich auf den Verzicht der Hintergrundbeleuchtung zurückzuführen ist. Bislang gibt es Quantenpunkt-LED-Displays nur im Labormaßstab, dennoch kann davon ausgegangen werden, dass Quantenpunkttechnologien langfristig einen festen Platz in der Displaytechnologie, gerade in Kombination mit OLED, einnehmen werden /Bullis et al. 2006, Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/.

/Kim et al. 2011/ stellten einen extrem flachen Quantenpunkt-Display unter Verwendung eines einfachen Druckverfahrens her. Durch den Einsatz dieser Stempeltechnik lassen sich verschiedenfarbige Pixel sowohl auf starren als auch auf flexiblen Trägermaterialien deponieren. Bis zur Marktreife müssen jedoch einige Punkte, wie z. B. die Schaltgeschwindigkeiten der Quantenpunkt-Pixel, verbessert werden.

Nach /Patel 2011/ ist es Wissenschaftler von Samsung Electronics gelungen, einen vollfarbigen 4 Zoll Quantenpunkt-Display herzustellen, was einen ersten, wichtigen Schritt für eine Markteinführung dieser Technologie bedeutet.

### **Ultrahochfester Beton**

Ultrahochfester Beton (UHPC<sup>37</sup>) ist eine Betonsorte, die Druckfestigkeiten oberhalb der in DIN EN 206-1 definierten Festigkeitsklasse C 100/115 erreicht. An der Universität Kassel wurde ein Hochleistungsbeton entwickelt, der aufgrund seiner stahlähnlichen Druckfestigkeit (200 N/mm<sup>2</sup>) besonders filigrane, leichte, nachhaltige und dennoch hoch tragfähige und kor-

---

<sup>37</sup> UHPC Ultra High Performance Concrete



rosionsbeständige Bauwerke ermöglicht. Die hohe Leistungsfähigkeit beruht im Wesentlichen auf der Zugabe von leicht löslicher und hochreaktiver nanoskaliger Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ ). Darüber hinaus wird die Kornzusammensetzung des Betons im Nano- und Mikrobereich durch gezielte Zugabe weiterer mineralischer Füllstoffe so optimiert, dass das Gefüge des erhärteten Zementgesteins besonders dicht und fest wird /Luther 2007a/. Dadurch wird sowohl die Druckfestigkeit und auch weitere für den Betonbau wichtige Eigenschaften verbessert (vgl. **Tabelle 4.5**). Schätzungen gehen davon aus, dass mit UHPC bei gleichen Bauteilen rund 60 % der Rohstoffe sowie bis zu 40 % der Energie und der  $\text{CO}_2$ -Emissionen eingespart werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass für das Bauwesen jährlich ca. 700 Mio. t Gestein produziert werden und allein die deutsche Zementherstellung im Jahr 2009 ca. 100 PJ Energie benötigte /BDZ 2010, 2011, DFG 2004, VDZ 2007/.

**Tabelle 4.5:** Betoneigenschaften /Böing 2007/

Eigenschaft	Einheit	UHPC	Normalbeton
Dichte	[ $\text{kg}/\text{dm}^3$ ]	2,45 – 2,55	2,2 – 2,5
Druckfestigkeit	[MPa]	180 – 200	10 – 60
Biegezugfestigkeit	[MPa]	36 – 40	2 – 8
Zugfestigkeit	[MPa]	8 – 10	1 – 4
E-Modul	[GPa]	55 – 60	20 – 40

Nach /Luther 2007a/ liegen die Kosten bei einer ersten Anwendung von UHPC, der Bau einer Brücke, bereits jetzt nicht wesentlich über denen einer herkömmlichen Beton- oder Stahlbrücken-Konstruktion, obwohl Normalbeton mit 50 bis 75 €/m<sup>3</sup> deutlich günstiger ist als UHPC mit Kosten von 700 bis 1.000 €/m<sup>3</sup>. Vergleicht man allerdings Träger mit vergleichbaren Tragfähigkeiten, so fällt der Kostenunterschied deutlich geringer aus (vgl. **Tabelle 4.6**). Aufgrund der bereits bei ersten Anwendungen vergleichsweise marktfähigen Kosten kann mit einem breiten Einsatz von UHPC gerechnet werden, wobei der Schwerpunkt sicherlich im Spezial- und Hochbau sowie im Brückenbau zu sehen ist. Eine Vielzahl von weltweiten Anwendungsbeispielen sind in /Fehling et al. 2008/ dargestellt.

Neben den Anwendungsbeispielen im Brückenbau sieht /Paschmann 2011/ Einsatzmöglichkeiten von UHPC im Bereich der Fassadenverkleidungen. Durch die besonderen Eigenschaften sind sehr dünne Platten möglich und aufgrund der hohen Biegefestigkeit sind entsprechende Verkleidungen in der Lage, hohe auftretende Windlasten auszuhalten.

**Tabelle 4.6:** Kostenvergleich für einen Bauträger aus UHPC mit konventionellen Materialien

Material	Kosten
Normalbeton	15 €/m
UHPC	50 €/m
Stahl	70 €/m

## Isolationsanwendungen

Durch den Einsatz der Nanotechnologie lässt sich die Isolationswirkung bei unterschiedlichen Anwendungen verbessern. Beispiele sind Vakuum-Isolations-Paneele (VIP), Nanoschäume zur Isolation von Gebäuden oder die Anwendung von Aerogelen.



### **Vakuum-Isolations-Paneele (VIP)**

Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) sind nanoporöse Kieselsäureboards, die mit geeigneten Foliensystemen eingepackt werden. Bei der Herstellung der hochdispersen, pyrogenen Kieselsäure entstehen Agglomerate mit einer nanoporösen, offenen Struktur, welche die Bewegungsfreiheit der eingeschlossenen Luftmoleküle, und somit die Übertragung von Wärmeenergie durch Konvektion minimiert. Zusätzlich besitzt Kieselsäure die vorteilhafte Eigenschaft Fremdmoleküle, z. B. Wasser, zu binden /Randel 2003/. Die sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit von VIP bei Normaltemperatur und Normaldrücken wird durch Evakuierung noch einmal um den Faktor vier verkleinert, sodass eine Wärmeleitfähigkeit von 0,0053 W/(mK) erreicht wird /va-Q-tec 2009/. Um das Vakuum dauerhaft zu erhalten, eignen sich aluminiumbedampfte Kunststofffolien. Die etwa 30 nm dicke Aluminiumschicht erhöht die Gasdichtheit bei gleichzeitiger Minimierung der Leitfähigkeit der Hülle. Gefüllt sind die VIP mit Platten aus pyrogener Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ ), die dabei eine molekulare Netzstruktur mit Poren von 70 nm ausbilden. Durch eine gräulichbraune Trübung werden gleichzeitig langwellige Infrarotstrahlen zurückgehalten /EMPA 2008/. Es lassen sich mit VIP Wärmeleitfähigkeiten mit einem Faktor 5 bis 10 kleiner als bei konventionellen Dämmstoffen erreichen /BFE 2003/. Dadurch resultiert durch den Einsatz von VIP eine 5 bis 10-mal geringere Dämmstärke bei gleicher Dämmwirkung /BINE 2001, 2004, 2011/.

Moderne Produktionsverfahren und neue Folientechniken, die eine Funktionstüchtigkeit über Jahrzehnte garantieren, machen die Vakuumtechnik auch für den Baubetrieb interessant. Allerdings unterliegt die Anwendung zur Wärmedämmung im Baubereich speziellen Rahmenbedingungen. Vor allem die erwartete Lebensdauer mit 50 Jahren stellt eine Herausforderung dar. Aber auch die Verarbeitung der Platten muss von geschultem Personal durchgeführt werden, da die Hülle der Elemente nicht beschädigt werden darf /vip-bau 2008/. Nach mehreren Testanwendungen wurde 2007 eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erteilt. Der Wert für die Wärmeleitfähigkeit des Produktes wurde dabei auf 0,008 W/(mK) festgelegt, worin bereits Alterungs- und Wärmebrückeneffekte am Rand der Elemente berücksichtigt sind /va-Q-tec 2009/. Die Nutzung von VIP in Gebäuden wird sich in Zukunft weiter entwickeln. Dabei werden lichtdurchlässige VIP eine Rolle spielen, die von einer transparenten Siliziumoxidschicht umhüllt und mit Aerogelen oder Nanogelen gefüllt sind /BINE 2004, 2011/.

Darüber hinaus gibt es weitere Anwendungsgebiete etwa im Bereich Logistik (Transportboxen, Tankcontainer) oder bei der Erschließung bislang ungenutzter Energievorkommen. Bei der Tiefseeölforderung führt die niedrige Temperatur zu einer starken Erhöhung der Viskosität des Öls und damit zu einer erschwerten Förderung. Durch den Einsatz von doppelwandigen Rohren, deren Hohlräume mit nanoporöser Kieselsäure gefüllt sind, wurde bereits demonstriert, dass bislang unerreichbare Öl-Vorkommen gefördert werden können. Aus rein technischer Sicht sind in den nächsten 10 Jahren kaum weitere Entwicklungssprünge zu erwarten. Bei steigendem Marktvolumen bestehen aus wirtschaftlicher Sicht jedoch beträchtliche Kostensenkungspotenziale /BFE 2003, Jopp 2003, Randel 2003, VACI 2006/.

Hinsichtlich den Umweltwirkungen von VIP stellt /BINE 2011/ fest, dass aufgrund der Ergebnisse einer Ökobilanz für unterschiedliche Dämmstoffe (Glaswolle, expandiertes

Polystyrol, VIP) die Umweltbelastungen bei der Herstellung von VIP mit denen von expandiertem Polystyrol verglichen werden können. Es wirkt sich zwar der hohe Prozessenergiebedarf (Strom) bei der Herstellung der pyrogenen Kieselsäure negativ aus, durch die deutliche bessere Dämmwirkung wird dieser Nachteil jedoch in der Anwendung kompensiert /BINE 2011/.

Im Vergleich zu konventionellen Dämmmaterialien sind VIP aufgrund der Kosten des Füllmaterials (fein strukturierte pyrogene Kieselsäure) relativ teuer. Um günstigere Füllmaterialien einzusetzen, sind jedoch nach /BINE 2011/ noch Fortschritte bei den Vakuumschichten notwendig. Eine Möglichkeit hierfür stellen spezielle Kunststoffhochbarriere laminate dar.

### **Nanoschaum zur Dämmung von Gebäuden**

Ein Chemiekonzern forscht an einem Schaumstoff, dessen Zellgröße statt wie bisher im Mikrometer- im Nanometerbereich liegen soll. Dabei wird das Ziel verfolgt, die Porengröße des Schaumstoffs so klein zu machen, dass sie der mittleren Wellenlänge eines Gasmoleküls entspricht. Damit wird die Wärmeleitung unterbrochen und Wärmedämmeigenschaften vergleichbar mit VIP erreicht. Eine Reduktion der Wärmeleitung auf bis zu 1/3 gegenüber einem herkömmlichen Dämmstoff ist möglich oder man benötigt nur 1/3 des Materials, um die gleiche Wärmedämmung zu realisieren, was gerade bei der Renovierung von Altbauten oder der Innendämmung ein wichtiger Faktor darstellt /BASF 2007/.

### **Aerogele**

Aerogele sind hochporöse Festkörper, die aus einem Netzwerk kolloider Teilchen bestehen. Im Sol-Gel-Verfahren werden Aerogele aus der Mischung von Wasser und Ausgangsstoffen zur Aerogelbildung hergestellt. Es gibt verschiedene Arten von Aerogelen z. B. (Quarz-) Silikat-, Kunststoff- oder Kohlenstoffaerogele. Die Teilchen in der Lösung bilden nach einiger Zeit ein Netzwerk, wodurch die Lösung zu einem Gel wird. Anschließend wird die Flüssigkeit entzogen, ohne eine Schrumpfung zu verursachen, und die Netzwerkstruktur bleibt erhalten. Aerogele sind sehr leicht und können Porenvolumen von bis zu 99 % aufweisen. Die Porengröße liegt dabei zwischen 3 und 20 nm. Daraus resultiert eine Oberfläche von 2.000 m<sup>2</sup> für 1 cm<sup>3</sup> Aerogel, was ungefähr 1/3 eines Fußballfeldes entspricht. Weitere Eigenschaften sind eine geringe Wärmeleitfähigkeit von ungefähr 0,02 W/(mK) und eine hohe optische Transparenz, wodurch der Einsatz von Aerogelen als transparente Wärmedämmung in Frage kommt. Geforscht wird darüber hinaus am Einsatz als Elektrodenmaterial in Brennstoffzellen, Flugzeugkatalysatoren oder Superkondensatoren /DLR 2008, Reichenauer et al. 2008/.

Aerogele können zur Isolierung bei der Öl- und Gasförderung zum Einsatz kommen. Gerade bei der Erschließung von Feldern in der Tiefsee ergeben sich spezielle Herausforderungen, wie der Transport der Kohlenwasserstoffe über lange Distanzen am Grund des Ozeans unter hohem Druck und niedrigen Temperaturen. Durch eine unzureichende Isolierung können die Kohlenwasserstoffe zu stark abkühlen und bilden Hydrate oder Wachsausscheidungen. Zum Einsatz kann hier z. B. die pipe-in-pipe Technologie (Doppelrohrsysteme) kommen. Dabei sind Rohrsysteme einsetzbar, die mit Nanogel-Technologie einen Temperaturbereich von -200 °C bis 250 °C abdecken /Cabot 2008/.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist der Einsatz bei LNG<sup>38</sup>-Systemen. Dabei reichen die Anwendungen von Transportleitungen über Speichertanks bis hin zu Transportschiffen, die mit Aerogelen effektiver isoliert werden können. Der Wärmewirkungsgrad ist dabei 2 – 4-mal höher als bei traditionell verwendeten Systemen, wodurch die Abdampfverluste bei Speicherung und Transport reduziert werden können. Zusätzlich wird durch die reduzierte Dämmdicke Material, Gewicht und Volumen eingespart /Cabot 2008/. Bei der Anwendung von Aerogelisolierungen in Verflüssigungsanlagen können die Abdampfverluste in Tieftemperaturüberleitungslinien um mehr als 50 % gegenüber konventionellem Polyurethan-Schaum reduziert werden. Um den gleichen Wärmeübergangskoeffizienten zu erreichen, müsste die konventionelle Isolierung ca. 240 % dicker ausgeführt werden. Des Weiteren können die Installationskosten im Vergleich zu Mineralwolle oder Calziumsilikat aufgrund einer schnelleren Installation reduziert werden. Nach /Aspen 2008/ liegt die Zeitersparnis bei 25 – 50 %. Durch verbesserte Dämmleistung könnten z. B. LNG-Transportschiffe zwischen 5.000 und 11.500 m<sup>3</sup> mehr Flüssiggas bei gleicher Größe einspeichern /Aspen 2008/.

### **Polycarbonat für die Automobilverschiebung**

Bei Automobilen ist eine Verschiebung aus Glas gängige Praxis, welches jedoch bei Unfällen leicht zerstört werden kann und ein hohes Gewicht besitzt. Seit vielen Jahren wird an innovativem Glasersatz aus Polycarbonat (PC) geforscht. PC hat jedoch die Eigenschaft unter UV<sup>39</sup>-Strahlung zu altern. Um diesem Prozess vorzubeugen, wird Polycarbonat mit verschiedenen nanoskaligen Weißpigmenten versetzt. Aufgrund der Nanoskaligkeit sind die Pigmente transparent und stören den Durchblick durch die Scheibe nicht. Ein weiteres Problem, die Kratzempfindlichkeit von PC, lässt sich durch bereits bewährte Beschichtungsverfahren, wie den Auftrag witterungsbeständiger Polysiloxan-Lacke, bei Formteilen, z. B. Scheinwerferstreuungsscheiben, durch eine kratzfeste Schutzschicht lösen.

Verschiebungen sind jedoch deutlich höheren, vor allem auch dynamischen Belastungen ausgesetzt. Durch den Einsatz fortschrittlicher Beschichtungstechnologien soll dieses hohe Qualitätsniveau erreicht werden. Im Fokus stand zuerst eine Nanomer-Lackierung, die nass aufgebracht wird und anorganische Partikel im Nanometerbereich enthält. Es setzte sich jedoch eine Plasma-Beschichtung durch, die eine anorganische Schicht aus einem elektromagnetisch angeregtem Gas erzeugt /Jopp 2006/. Durch den Einsatz dieses PECVD<sup>40</sup>-Verfahrens, bei dem gleichzeitig beide Scheibenseiten mit unterschiedlich abriebfesten Beschichtungen versehen werden können, wird das kostenintensive Nassbeschichten überflüssig /Möthraht et al. 2007/. Der wesentliche Vorteil der PC-Verschiebung liegt in der Gewichtseinsparung von ca. 50 % im Vergleich zu Glas. Da PC, außer in der Windschutzscheibe, überall eingesetzt werden kann, ergeben sich bis zu 20 kg Gewichtersparnis pro Pkw /Exatec 2008, McCullough 2011, Summerer 2003/. Die Substitution von Glas durch Kunst-

---

<sup>38</sup> LNG Liquefied Natural Gas

<sup>39</sup> UV Ultraviolet

<sup>40</sup> PECVD Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition

stoffe hat im Bereich der Scheinwerfer bereits vor einigen Jahren begonnen. Seit Anfang der 90er Jahre wurden Lichtstreu-scheiben aus Polycarbonat eingeführt und bereits heute werden die Scheinwerfer nahezu aller produzierten Pkw mit Streu- und Abdeckscheiben aus Polycarbonat ausgestattet. Ein weitaus größeres Gewichtseinsparpotenzial liegt jedoch in der Fensterverscheibung. Auch hier werden schon erste Anwendungen z. B. Dachfenster im Smart forfour, in Serie produziert /Klemm 2004, Möthraht et al. 2007/.

Die Einsatzmöglichkeit von Polycarbonat in der Autoverscheibung stellt nach /Dahlhoff 2011/, neben z. B. Leichtbaukomponenten im Automobilbau oder Isolierung beim Hausbau, einen wichtigen globalen Trend mit großen Wachstumschancen dar. Panoramadächer aus Polycarbonat können durch die Zugabe von Farbstoffen eingefärbt werden, wodurch ein großer Teil der Infrarot-Strahlung des Sonnenlichts herausgefiltert wird. Dadurch heizt sich der Innenraum deutlich weniger auf und die Klimaanlage benötigt weniger Energie, wodurch zusätzlich zur Gewichtsreduktion ein Vorteil generiert werden kann /McCullough 2011/.

### **Nanolacke im Automobilbereich**

Die Einsatzmöglichkeiten von Nanolacken im Automobilbereich werden schon seit einigen Jahren verfolgt. Dabei haben Automobilhersteller jedoch nicht mögliche Energieeinsparungen im Blick, sondern sehen den Nanolack als Differenzierungsmerkmal oder als eine Möglichkeit an, den Kundennutzen zu steigern /NanotechReport 2003/. Untersuchungen von /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/ lassen jedoch ein Energieeinsparpotenzial von Nanolacken gegenüber gängigen Lacksystemen, wie dem 1-/2-Komponenten-Klarlack, Wasser-Klarlack und Pulver-Klarlack, erkennen. Dabei wurde der Bilanzraum über den gesamten Lebenszyklus des Produktes Lack angesetzt. Dieser beinhaltet somit die Rohstoffgewinnung, die Grundstoffherstellung, die Lackherstellung, den Lackiervorgang (Applikation) und die Gebrauchsphase. Beim untersuchten Nanolack ist das Bindemittel, nicht wie üblich, organischer Struktur, sondern ein sog. anorganisch-organisches Hybridpolymer. Im Verarbeitungszustand liegt das Bindemittel als dünnflüssiges kolloidales System vor, dessen Kolloidpartikel einen Durchmesser von ca. 40 bis 50 nm aufweisen. Ein Vorteil dieses Nanolacks ist es, dass er sich mit in der Industrie üblichen Verfahren verarbeiten lässt. Die Ursache für die Reduktion des Energieverbrauchs beim Einsatz des Nanolacks liegt in der deutlich reduzierten benötigten Menge. Es muss daher weniger Lack hergestellt werden. Ein weiterer Vorteil liegt in der Vorbehandlung des zu lackierenden Bauteils. Bei herkömmlichen Lacken sind weitere, energieintensive Schritte nötig, die beim Nanolack weitestgehend entfallen. Zudem führt die reduzierte eingesetzte Menge auch zu einer Gewichtsreduktion des Pkw, wodurch eine zusätzliche Energieeinsparung ermöglicht wird /dpa 2009, ntcgmbh 2008, Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/.

### **Nanofüllstoffe in Autoreifen**

Eigenschaften wie Haftung, Abriebwidersand, Ein- und Weiterreißfestigkeit werden bei Gummimischungen durch den Einsatz von Füllstoffen eingestellt. Üblicherweise enthalten Reifenmischungen ca. 30 % Verstärkerfüllstoffe /Degussa 2006b/. Stand der Technik ist bereits die Nutzung von Rußpartikeln<sup>41</sup> und nanoskaliger Kieselsäure als Füllstoffe /Paschen et al. 2004/. Nach /Velte 2006/ ist es möglich durch den Einsatz nanotechnologischer Verfahren neuartige Reifenmischungen zu erzeugen. Dabei führt z. B. die große Oberfläche von Nanostrukturrußen zu erhöhten Wechselwirkungen mit dem Kautschuk und damit zu einer Erhöhung des Verstärkungseffekts im Reifen /Paschen et al. 2004/. Durch Einsatz von nanotechnologischen Verfahren in Kombination mit Nanopartikeln ist eine Reduktion des Rollwiderstandes um 15 – 25 % denkbar /Velte 2006/. Prinzipiell können auch Kohlenstoffnanoröhren als Zusatzstoffe in Reifenmischungen eingesetzt werden, wobei sich nach /Unselde 2006/ eine Rollwiderstandsreduzierung von 5 – 25 % realisieren lässt. Dadurch sind Kraftstoffeinsparungen von bis zu 4 % denkbar, da eine Reduzierung des Rollwiderstands um 30 % etwa einer Verringerung des Kraftstoffbedarfs um 5 % entspricht /König 2004/.

In 2010 wurde das Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V. für die Forschungen zu elastomeren Nanokompositen mit einem Innovationspreis ausgezeichnet. Die Forscher entwickelten nicht nur neue Füllstoffe, sondern betrachteten in einem ganzheitlichen Ansatz innovative Rezeptur- und Mischverfahren sowie Systeme der Verträglichkeitsvermittlung, die den Einsatz neuartiger Füllstoffe, wie z. B. Kohlenstoffnanoröhren, Schichtsilikate (z. B. Montmorillonit, Hydrotalkit), Silicapartikel oder Halloysite-Nanoröhren, in Elastomeren erlauben /Heinrich et al. 2010/.

### **Reibungsreduzierende Beschichtungen**

Abrieb und Verschleiß in Getrieben, Motoren, Lagern und anderen beweglichen mechanischen Systemen wird durch Festkörperkontakte von metallischen Oberflächen verursacht. Traditionell wird mit Hilfe von Schmierstoffen versucht, einen trennenden Film zu erzeugen, der den direkten Kontakt der Metalloberflächen verhindern soll. /Rewitec 2008/ entwickelte eine Nanobeschichtung, die reibende Metalloberflächen vor Abrieb und Verschleiß schützt, auch wenn kein trennender Schmierfilm aufgebaut werden kann. Die Beschichtungstechnologie basiert nicht auf einer Veränderung des Schmierstoffes, sondern auf der Modifizierung der Oberflächenstruktur von reibenden Metallteilen. Mikro- und Nano-Silikatpartikel verbinden sich unter Druck und Temperatur mit Metall-Atomen der zu beschichtenden Oberfläche und bilden eine verschleißfeste Metall-Silikatschicht, welche sogar bei Mangelschmierung über sehr gute Notlaufefigenschaften verfügt. Dadurch kann der Öl- und Kraftstoffverbrauch von Verbrennungsmotoren reduziert werden /HA 2007/. Nach /HL 2006/ wird der Kraftstoffverbrauch moderner Pkw-Motoren zu ca. 15 % von der Motorreibung bestimmt. Durch Un-

---

<sup>41</sup> Rußpartikel als Reifenfüllstoff werden in der Literatur auch als Carbon Black bzw. Industrieruße bezeichnet. Zunächst sind Rußpartikel nanometergroß, wachsen jedoch durch Agglomeration zu nanostrukturierten Aggregaten zusammen



tersuchungen nach dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) wurde gezeigt, dass eine Minderung des Kraftstoffverbrauchs bei Pkw um 11 % möglich wird /Thesenvitz et al. 2007/.

Nach /Pudenz 2011/ setzt ein großer Automobilhersteller zukünftig reibungsreduzierende Beschichtungen in der Serienfertigung von Dieselmotoren ein. Mit der Technologie des Lichtbogen-Draht-Spritzens werden Eisen-Kohlenstoffdrähte aufgeschmolzen, mit Hilfe eines Gasstroms auf die Innenwand der Zylinder aufgespritzt und dort als lamellare ultrafeine bis nanokristalline Schicht abgeschieden. Gegenüber Graugussbuchsen soll sich dadurch der mechanische Reibverlust um bis zu 50 % verringern. Darüber hinaus lässt sich das Motorgewicht gegenüber dem Vorgängermodell um 4,3 kg senken und zusätzlich 3 % Kraftstoff einsparen.

### **Nanokatalysatoren**

In Raffinerien kann sich die Nanotechnologie in verschiedenen Bereichen auf den Energieumsatz auswirken. Da die in heutigen Raffinerien eingesetzte Cracker nicht effektiv arbeiten, bleiben in den Prozessen ca. 20 % des Rohöls ungenutzt. Durch den Einsatz von nanotechnologischen Katalysatoren, die ein besseres Trennvermögen (Selektivität) aufweisen, kann z. B. die Ausbeute um 2 % erhöht werden. Des Weiteren sind Katalysatoren in der Lage, das Temperaturniveau von Raffinerieprozessen zu senken /Boeing 2003, LANL 2006/. Nach /LANL 2006/ kann davon ausgegangen werden, dass sich die Aktivität in katalytischen Raffinerieprozessen bei einem Temperaturanstieg von 10 °C verdoppeln lässt. Es wird erwartet, dass Katalysatoren aus Nanopartikeln oder anderen Nanomaterialien die Aktivität aufgrund der im Verhältnis zum Volumen großen Oberfläche um 50 bis 100 % erhöhen können. Dies würde einer Reduktion des Temperaturniveaus um 5 bis 10 °C entsprechen oder einer Reduktion der benötigten Prozessenergie zwischen 2,8 und 11,3 MJ/bbl<sup>42</sup>. Die jährliche Menge an Öl, die in den USA in verschiedenen katalytischen Raffinerieprozessen bearbeitet wird, summiert sich auf ca.  $8 \cdot 10^9$  bbl/Jahr. Aufgrund ihrer weitreichenden Verbreitung in chemischen Prozessen stellt der Einsatz von Nanokatalysatoren ein großes Potenzial dar. Allein in den USA liegt das Einsparpotenzial aufgrund niedrigerer Prozesstemperaturen bei 22 PJ bis 90 PJ pro Jahr /LANL 2006/. In Deutschland wurden in 2010 ca.  $17,38 \cdot 10^6$  t Öl in katalytischen Crackanlagen, ca.  $11,71 \cdot 10^6$  t Öl in Hydro-Crackern und  $15,87 \cdot 10^6$  t Öl in katalytischen Reformierungsanlagen bearbeitet /MWV 2010/. Durch den Einsatz von Nanokatalysatoren könnten daher in Deutschland zwischen 0,9 und 3,6 PJ eingespart werden.

Nicht nur in der Erdölverarbeitung spielen Katalysatoren eine Rolle, sondern auch bei der Herstellung chemischer Erzeugnisse. Durch die Nanostrukturierung der Katalysatoren steigt das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen und damit die Anzahl der sog. Reaktionszentren. /LANL 2006/ erwartet, dass die Nanotechnologie die Aktivität um 50 % der Differenz zwischen theoretisch erreichbarer und momentan verwendeter Aktivität steigern kann. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/ in Studien zur energetischen Auswirkung von Nanokatalysatoren bei der Styrolsynthese. Die Her-

---

<sup>42</sup> bbl Barrel, entspricht ca. 159 Liter



stellung von Styrol ist einer der zehn wichtigsten petrochemischen Prozesse, da es eine der wichtigsten Grundchemikalien der chemischen Industrie darstellt. Bei der klassischen Synthese kommt ein Katalysator auf Eisenoxidbasis zum Einsatz /MPG 2002/.



Durch den Einsatz eines Katalysators aus nanostrukturierten, mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhren, sog. Carbonnanotubes, kann dieser endotherme Prozess in einen exothermen Prozess überführt werden. Der Prozess kann mit Luft anstelle von Wasserstoff durchgeführt, die Ausbeute an Styrol gesteigert und die Betriebstemperatur um 200 °C gesenkt werden. Dadurch lässt sich der Energiebedarf von 6,36 MJ pro kg Styrol bei der klassischen Synthese auf 3,25 MJ pro kg Styrol reduzieren. Die Reduktion um 3,11 MJ pro kg setzt sich aus folgenden einzelnen Einsparungen zusammen. Durch den geänderten Reaktionstyp erfolgt eine Einsparung von 1,2 MJ/kg, durch die Änderung des Reaktionsmediums (höhere Selektivität bei gleich bleibender Umsatzrate) erfolgt eine Einsparung von 0,32 MJ/kg und die größte Einsparung mit 1,59 MJ/kg ergibt sich durch die Verringerung der Reaktionstemperatur /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/.

### Nanopartikel in der Kunststoffproduktion

Durch den Zusatz von Nanopartikeln ist es möglich, die Fließfähigkeit von Materialien zu verändern bzw. zu erhöhen. Bei Prozessverfahren wie z. B. dem Spritzgießen kann dies zu erheblichen Verbesserungen aufgrund der sich neu einstellenden rheologischen<sup>43</sup> Eigenschaften führen. Für ein teilkristallines Thermoplast wurden diese möglichen Verbesserungen untersucht. Es gelang durch Zugabe von Nanopartikeln in Polybutylenterephthalat (PBT) die Schmelzviskosität um ca. 50 % zu senken, ohne die anderen Eigenschaften des PBT (mechanische Eigenschaften, Schwingungsverhalten, Wärmebeständigkeit) merklich zu beeinflussen. Der Einsatz von Nanopartikeln führt zu mehreren Vorteilen bei der Verarbeitung mit Spritzgussmaschinen. Es ist dadurch möglich dünnwandigere Gussteile herzustellen, was wiederum zu Materialeinsparungen führt. Darüber hinaus lässt sich die Zykluszeit um bis zu 30 % senken, es sind geringere Einspritz- und Nachdrücke nötig und auch eine Reduzierung der Massentemperatur wird möglich. Insgesamt kann mit einer Energieeinsparung von 20 % gerechnet werden /BASF 2005, Eipper et al. 2006, Eipper et al. 2008, Iden 2010, Weiß et al. 2004/.

### Einsatz der Nanotechnologie in aktiven Fenstern zur Tageslichtsteuerung

Im Bereich der Fenster können Mikrospiegel zur Tageslichtlenkung, infrarotreflektierende Fensterbeschichtungen oder sog. smart windows zum Einsatz kommen. Mit Hilfe von Mikro-

---

<sup>43</sup> Rheologie ist ein wissenschaftliches Teilgebiet, dass sich mit dem Verformungs- und Fließverhalten von Stoffen beschäftigt

spiegeln kann eine erhebliche Verbesserung der Helligkeitsverteilung in Innenräumen erreicht werden. Dadurch kann der Einsatz von Kunstlicht minimiert und die Nutzung des Tageslichtes in Räumen erhöht werden. Nach /DBU 2006/ sind dabei Einsparungen des elektrischen Lichts von bis zu 20 % und eine Entlastung von Klimaanlage möglich. Die technische Umsetzung erfolgt über Mikrospiegel-Arrays, die in den Zwischenraum eines konventionellen doppeltverglasten Fensters eingebaut werden. Die Mikrospiegel, mit einer Größe von 100 mal 100  $\mu\text{m}$ , werden mit Hilfe der Dünnschichttechnologie mit Filmdicken im Nanometerbereich gefertigt. Die Ansteuerung der für das menschliche Auge unsichtbaren Spiegel erfolgt elektrisch und ist in Abhängigkeit der Lichtverhältnisse über Sensoren regelbar /INA 2008/.

Fenster haben aufgrund ihrer hohen Wärmeabstrahlung eine relativ schlechte Wärmedämmung im Vergleich zu Wänden. Der Wärmedurchgangskoeffizient eines doppelt verglasten Fensters liegt bei ca.  $3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , wobei die Wärmeabstrahlung mit rund  $2/3$  einen großen Anteil einnimmt. Mit Hilfe eines infrarotreflektierenden Films kann diese Abstrahlung verhindert werden. Es wird dabei ein 10 bis 15 nm dicker Silberfilm verwendet, der zwischen zwei dielektrischen transparenten Filmen mit Schichtdicken von ca. 15 bis 50 nm liegt. Die beiden mit geeignetem Brechungsindex ausgestatteten Filme entspiegeln die hohe Reflexion des Silberfilms im sichtbaren Bereich und bewirken somit im Idealfall eine gleiche Transmission wie bei unbeschichtetem Fensterglas. Dadurch ist eine Absenkung des Wärmedurchgangskoeffizienten auf  $1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  möglich /Wuttig et al. 2008/.

Neben dem Wärmeverlust sollte auch die Überhitzung und der damit verbundene Energiebedarf für Klimaanlage möglichst verhindert werden. Ein Lösungsansatz hierfür sind z. B. sog. smart windows. Der Begriff smart windows oder smart glazing bezieht sich auf Glasscheiben, die in Abhängigkeit von Umwelteinflüssen ihre Eigenschaft z. B. die Lichtdurchlässigkeit, ändern. Hierfür werden Materialien benötigt, deren Transparenz bzw. Farbe in Abhängigkeit von physikalischen oder chemischen Einflussgrößen reversibel geschaltet werden können /Luther 2007a/. Die technische Grundlage sind Materialien, welche durch Ionenein- bzw. -ausbau von einem transparenten Zustand in einen absorbierenden oder reflektierenden Zustand wechseln können. Es stehen dafür zwei Mechanismen zur Verfügung. Beim elektrochromen Schalten wird die zu schaltende Schicht (z. B. Wolframoxid) auf eine transparente Elektrode aufgebracht, dann folgen ein Ionenleiter und ein Ionenspeicher und abschließend eine weitere Elektrode. Durch Anlegen einer Spannung kann das Wolframoxid z. B. ein Wasserstoffion aufnehmen, wodurch eine starke Absorption im Infrarotbereich entsteht. Es wird dadurch eine bläuliche Färbung erreicht, die auch nach Abschaltung der Spannung erhalten bleibt und erst wieder durch Spannungsumkehr entfärbt wird. Beim gaschromen Schalten kommt ein katalytischer Schaltprozess zum Einsatz. Auf der gasdicht abgeschlossenen Innenseite eines Fensterzwischenraums befindet sich das schaltbare Material und wird mit einem Wasserstoffkatalysator wie z. B. Platin mit einer Schichtdicke von 5 bis 20 nm beschichtet. Der Katalysator kann in wasserstoffhaltiger Atmosphäre das  $\text{H}_2$ -Molekül in atomaren Wasserstoff aufspalten, der dann in das Wolframoxid hineindiffundiert. Durch Zugabe von Sauerstoff kann der Wasserstoff in Wasser umgewandelt werden und diffundiert wieder aus der Schicht heraus /Wuttig et al. 2008/. Für eine detaillierte Beschreibung zu aktiven Fenstern wird auf /Jäkel et al. 2013/ verwiesen.

## Antifoulingbeschichtungen in der Schifffahrt

In der Schifffahrt bezeichnet man mit Fouling die ungewollte Besiedlung von Schiffsrümpfen mit Organismen wie Muscheln, Seepocken und Algen. Die Ansammlung von pflanzlichem und tierischem Bewuchs führt zu einer Gewichtszunahme des Schiffes, zu einer erhöhten Oberflächenrauigkeit und damit zu einer Veränderung der hydrodynamischen Schiffsförmigkeit. Die damit verbundenen Auswirkungen sind eine verringerte Fahrtgeschwindigkeit oder entsprechend ein erhöhter Kraftstoffverbrauch, wenn die Geschwindigkeit gehalten werden soll. Darüber hinaus erhöht sich der Aufwand zur Schiffsreinigung. Untersuchungen von /Grüner 2007/ zeigen, dass der Leistungsaufwand nach einigen Jahren um über 40 % höher sein kann, um die gleiche Geschwindigkeit zu erreichen. Die Erhöhung der Oberflächenrauigkeit und die damit verbundene Widerstandserhöhung bedeuten einen hohen wirtschaftlichen Schaden. Nach /Kätscher et al. 1999/ ergeben sich bei einem Großcontainerschiff über einen Zeitraum von drei Jahren Mehrkosten von 840.000 Dollar. Andere Schätzungen gehen von einem jährlichen Schaden für die kommerzielle Schifffahrt von 7,5 bis 30 Milliarden Dollar aus. Hinzu kommt die damit verbundene Erhöhung der Treibhausgasemissionen /AMBIO 2008/.

Nach /LANL 2006/ kann im Gegensatz dazu durch Antifouling-Beschichtungen eine Kraftstoffersparung von 5 % realisiert werden. Bisher wurden zur Bekämpfung des Bewuchses vor allem Biozide eingesetzt. Dabei kam früher hauptsächlich eine zinnorganische Verbindung wie Tributylzinnhydrid (TBT) zum Einsatz /Afeltowicz 2006/. Anfang 2008 wurde dies aufgrund ihrer hohen Toxizität verboten. Ein 2005 gestartetes EU-Forschungsprojekt AMBIO<sup>44</sup> will dieses Problem mit Hilfe der Nanotechnologie lösen. Dabei wurde eine spezielle Beschichtung entwickelt, die das Anhaften von Organismen verhindern soll. Durch die Verwendung von Silikonanstrichen kann dies nur teilweise verhindert werden. Einen verbesserten Schutz konnte durch die Beimischung von Kohlenstoffnanoröhren erreicht werden. Die Nanoröhren stören dabei auf molekularer Ebene die Oberfläche des Anstrichs, wodurch die Haftmoleküle der Organismen sich nicht mehr wirksam anheften können. Sobald sich das Schiff bewegt, werden die Organismen abgespült. Weitere Ansätze sind unter anderem das gezielte Erzeugen einer nanostrukturierten Oberfläche mit einer veränderten Oberflächenenergie, Ladungsdichte und räumlichen Struktur. Es wird ebenfalls an bioaktiven Beschichtungen mit Hilfe von Enzymen geforscht /AMBIO 2008, McKie 2007/.

Ein weiteres, kommerzielles Produkt nutzt den Effekt der Selbstpolierung und Selbstglättung auf Basis der Nanocapsule Technology (NCT). Die Nanokapseln dienen als Bindemittel und gewährleisten einen homogenen Schichtaufbau und eine gleichmäßige Abbaurate. Sie bestehen im Kern aus einem hochreaktiven Acrylat, welches für den Selbstpoliereffekt der Beschichtung verantwortlich ist. Die Hülle besteht aus einem wasserabweisenden Acrylpolymer, welches die Wassermenge, die zum Kern vordringt, kontrolliert. Der Selbstpoliereffekt beruht auf der Reaktivität des Kerns, der bei ausreichender Wassermenge reagiert und es dadurch zur Ablösung einer Bindekapsel kommt. Die Wirkstoffe der Beschichtung sind dabei Kupferoxide und andere Biozide, die den Antifouling-Effekt unterstützen /Hempel 2008/.

---

<sup>44</sup> Advanced Nanostructured Surfaces for the Control of Biofouling

Ein weiteres Beispiel, wie Nanotechnologie zum Verhindern von Bewuchs eingesetzt werden kann, ist die Möglichkeit, den Fließpunkt einer Beschichtungspaste so einzustellen, dass er bei 5 bis 2.000 PA oberhalb der Wandschubspannung des zu schützenden Bauteils in unbewachsenem Zustand liegt. Dies kann durch die Wahl der Zusammensetzung der Paste und durch deren homogene Vermischung mit scherverdünnenden Füllstoffen geschehen. Eine Mischung einer weichen Silikonpaste mit 10 % hydrophoben Silikat-Nanopartikeln führte nach /WIPO 2004/ zu einem deutlichen Anstieg des Fließpunktes. Dadurch kann eine Selbstreinigung während der Fahrt stattfinden.

### **Nanofaserbeschichtung von Filterwerkstoffen**

Ziel des BMBF-Forschungsprojektes „Nanofaserbeschichtung für Filterwerkstoffe“ ist die Verbesserung von Filtern durch die Beschichtung mit elektrogesponnenen Nanofasern. Das Elektrosponnen stellt ein Verfahren dar, mit dem eine große Anzahl von technischen, bioabbaubaren und natürlichen Polymeren zum Einsatz kommen kann. Weiterhin lassen sich die Morphologie, der Durchmesser und die Oberflächenstruktur kontrollieren und das Einbringen von Nanopartikeln ist möglich. Eingesetzt werden können Nanofasern in Nanofiltern. Diese besitzen neben einem erhöhten Rückhaltevermögen auch eine erhöhte Effizienz in der Reinigungsleistung gegenüber konventionellen Filtern. Dadurch kann der entstehende Druckabfall verringert werden, was zu einer längeren Lebensdauer und einem reduzierten Energiebedarf führt. Der Anwendungsbereich solcher Filter liegt in der Luftfiltration in Industrieanlagen, der Abluftreinigung oder in der Zuluftfiltration von Gasturbinen. Der sog. Nanoweb-Filter wurde bereits erfolgreich industriell umgesetzt. Weitere Anwendungsbereiche dieser Filtertechnik sind die Kraftstofffilterung oder der Einsatz zum Abbau von Gefahrstoffen durch Einbringung katalytisch aktiver Substanzen in die Nanofasern /Placke 2006/.

Kommerzielle Produkte mit nanotechnologisch beschichteten Fasern sind bereits auf dem Markt verfügbar /Mahle 2011/.

Die Forschung und Entwicklung von innovativen, auf der Nanotechnologie basierten Filtermaterialien ist Bestandteil des Forschungsvorhabens „Technische Textilien für innovative Anwendungen und Produkte - NanoMatTextil“ des BMBF. Forschungsschwerpunkte sind technische Textilien für industrielle Anwendungen wie Filter und Membranen, Filtermedien zum Klimaschutz (Industriefilter, Feinstaub-, Abgas-, Wasser- und Abwasserfilter) sowie Filter und Membran-Systeme für die Verkehrs- und Umwelttechnik /BMBF 2011/.

### **Nanoklebstoff**

Heutige, vielfältig in der Industrie eingesetzte Klebstoffe härten nicht bei Raumtemperatur aus, sondern es muss zusätzliche Energie in Form von Wärme zugeführt werden, um den Klebevorgang in Gang zu setzen. Meist werden die zu verklebenden Teile dazu in einem Ofen oder einem Heißluftstrom bei ca. 180 °C behandelt. Dabei erwärmen sich auch die zu klebenden Teile, wodurch der Energiebedarf stark erhöht wird und andererseits die Fügekomponenten teilweise so stark thermisch belastet werden, dass ein Klebprozess nicht ver-

wendet werden kann und ein anderes Fügeverfahren zum Einsatz kommen muss /Werner et al. 2006/.

Mithilfe der Nanotechnologie wurde ein neuartiges Klebeverfahren entwickelt, bei dem die Klebstoffe durch Zusatz nanoskaliger Zuschläge für die Absorption elektromagnetischer Strahlung aktiviert werden. Aufgrund des kleinen Durchmessers von ca. 5 bis 25 nm verhalten sich die Nanopartikel ähnlich wie große Moleküle und nicht wie ein Festkörper. Sie besitzen für elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich von einigen Gigahertz scharfe und für jedes einzelne Nanoteilchen identische Absorptionslinien, die man durch die eingestrahlten Mikrowellen gezielt anregen kann. Dadurch kann der Klebstoff unter Beaufschlagung von Mikrowellen aushärten, da die magnetischen Teilchen zu schwingen anfangen, wenn sie einem schnell wechselnden Magnetfeld ausgesetzt sind. Dabei wird die Aktivierungswärme frei, die mit Hilfe einer Magnetspule gezielt in die Klebefuge eingebracht wird, ohne die Füge Teile dabei thermisch zu belasten /RAG 2007, Sauer et al. 2004/. Da die Wärmezufuhr im Gegensatz zu konventionellen Härtingsverfahren wie dem Anblasen mit Heißluft oder dem Anpressen einer vorgewärmten Formauflage nicht durch die meist geringe Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe begrenzt ist, lässt sich der Härtingvorgang zudem deutlich schneller durchführen /Sauer et al. 2004/. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass sich die feste Klebeverbindung durch das Anlegen der gleichen magnetischen Wechselfelder auch wieder lösen lässt. Dies kann zu deutlichen Erleichterungen z. B. beim Autorecycling führen, um den Vorgaben der Gesetzgebung nachkommen zu können /RAG 2007/.

Nach /Li et al. 2011/ kann ein Nanoklebstoff auch bei der Herstellung von Farbstoffsolarzellen eingesetzt werden. Im Vergleich zu konventionell hergestellten Zellen konnte mit dem Nanoklebstoff eine Effizienzverbesserung von ca. 25 % erreicht werden.

#### 4.4 Theoretisches Potenzial der Nanotechnologie

Basierend auf der zuvor erläuterten Detailanalyse entlang der energetischen Wertschöpfungskette wird im Folgenden das theoretische Potenzial von ausgewählten nanotechnologischen Anwendungen mit Bedeutung für die Energiewirtschaft untersucht. Im Bereich der Energieerzeugung und -wandlung (vgl. Kapitel 4.3.1) werden Antireflexschichten (Solarthermie, solarthermische Kraftwerke (CSP<sup>45</sup>), Photovoltaik), neuartige Photovoltaiktechnologien (Dünnschichtsolarzellen, Farbstoffsolarzellen, organische Solarzellen, Stapelsolarzellen und Quantenpunktsolarzellen), Brennstoffzellenheizgeräte, Brennstoffzellenfahrzeuge, das Kraftstoffadditiv Ceroxid, nanostrukturierte Membranen zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung sowie thermoelektrische Generatoren (Automobilbereich und Kraftwerke) analysiert. In der Energieverteilung und -speicherung (vgl. Kapitel 4.3.2) wird der Einsatz von Superkondensatoren in Hybridbussen und im Bereich der Energienutzung (vgl. Kapitel 4.3.3) werden LED in der Allgemeinbeleuchtung und im Automobilbereich, OLED und LED in der Allgemeinbeleuchtung, OLED Displays, ultrahochfester Beton, Dämmanwendung mit VIP, Polycarbonat für Automobilverklebung, Nanolacke im Automobilbereich (Herstellung, Applikation und Gebrauchsphase),

---

<sup>45</sup> CSP Concentrated Solar Power



Nanofüllstoffe in Autoreifen, reibungsreduzierende Beschichtungen, Nanokatalysatoren (Styrol) sowie Nanopartikel in der Kunststoffproduktion bewertet.

Für die Betrachtung des theoretischen Potenzials wird eine Marktdurchdringung der nanotechnologischen Anwendung von 100 % angenommen. Hinsichtlich der technischen Parameter wie Wirkungsgradsteigerung, Effizienz, etc. sind z. B. aktuell im Labormaßstab erreichbare Werte hinterlegt bzw. es werden Abschätzungen und Annahmen verwendet, die in 2030 erwartet werden. Das theoretische Potenzial bezieht sich auf die in Kapitel 6.1 dargestellten Annahmen des Nano-Szenarios im Jahr 2030, geht jedoch von einer vollständigen Markteinführung der jeweiligen Technologie aus. **Tabelle 4.7** fasst die daraus resultierenden Ergebnisse zusammen.

Die betrachteten 26 nanotechnologischen Anwendungen haben theoretisch das Potenzial 1.876 PJ einzusparen und zusätzliche 404 PJ zu erzeugen. Den größten Anteil an der möglichen Energieerzeugung haben dabei neue Photovoltaiktechnologien. Sie haben ein Potenzial zur zusätzlichen Produktion von über 352 PJ. Im Bereich der Energieeinsparung liegen die größten Einsparpotenziale beim Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen (630 PJ) im Verkehrsbereich, bei der Nutzung von nanostrukturierten Membranen bei der CO<sub>2</sub>-Abscheidung (408 PJ), beim Ersatz von konventionellen Leuchtmitteln in der Allgemeinbeleuchtung durch LED und OLED (207 PJ) und bei der Nutzung von so genannten Brennstoffzellenheizgeräten zur Energieversorgung im Bereich der Haushalte (164 PJ). Weitere große Einsparungen resultieren durch den Einsatz von reibungsreduzierenden Beschichtungen (163 PJ) im Verkehr und durch die Dämmung von Wohngebäuden mit VIP (120 PJ).

Wie aus **Tabelle 4.8** ersichtlich, weist der Verkehrssektor bei der Betrachtung der Sektoren das größte theoretische Potenzial auf (916 PJ) gefolgt von der Energieerzeugung und Energiewandlung mit einem Potenzial zur Energieeinsparung von 409 PJ und einem Potenzial zur zusätzlichen Energieproduktion von 404 PJ. Der Sektor Haushalte zeigt ein Potenzial zur Einsparung von 347 PJ. An letzter Stelle kommt der Sektor Industrie mit einem theoretischen Potenzial von 56 PJ.

Darüber hinaus zeigt **Tabelle 4.8** einen Vergleich zwischen dem theoretischen Potenzial der einzelnen Sektoren und einem Vergleichswert<sup>46</sup> (Mittelwert des Energieverbrauchs bzw. -einsatzes von 2001 bis 2005) gemäß /EU 2006/ und /BMWi 2012/. Es wird deutlich, dass die Nanotechnologie das theoretische Potenzial hat, im Verkehrsbereich über 34 % an Energie einzusparen. Im Sektor der Energieerzeugung könnte durch nanotechnologische Anwendungen bzw. damit verbundenen Verbesserungen ca. 18,6 % der Stromproduktion in Deutschland abgedeckt werden.

Um ein besseres Bild über die möglichen Auswirkungen der Nanotechnologie auf den deutschen Energiesektor und über zukünftig mögliche Energieeinsparungen zu bekommen,

---

<sup>46</sup> Nach /EU 2006/ „Zur Berechnung eines jährlichen Durchschnittsverbrauchs verwenden die Mitgliedsstaaten den jährlichen inländischen Endenergieverbrauch aller von dieser Richtlinie erfassten Energieverbraucher in den letzten fünf Jahren vor Umsetzung dieser Richtlinie, für die amtliche Daten vorliegen. Dieser Endenergieverbrauch entspricht der Energiemenge, die während des Fünfjahreszeitraums an Endkunden verteilt oder verkauft wurde und zwar ohne Bereinigung nach Gradtagen, Struktur- oder Produktionsänderungen“.



werden in Kapitel 6.1 die Berechnungen von Szenarien- und Sensitivitätsanalysen basierend auf dem dargestellten theoretischen Potenzial beschrieben.

**Tabelle 4.7:** Theoretisches Potenzial von nanobasierten Anwendungen entlang der energetischen Wertschöpfungskette (Basis 2030)

Anwendungen		Theoretisches Potenzial		
		Energieerzeugung	Energie-wandlung, -speicherung und -verteilung	Energie-nutzung
		zusätzliche Energieproduktion [PJ]	Energieeinsparung [PJ]	
Antireflexschichten bei der Solarenergienutzung	Solarthermie	2,9		
	Solarthermische Kraftwerke	0,8		
	Photovoltaik	0,7		
Neuartige Photovoltaiktechnologien	Dünnschichtsolarzellen	195,1		
	Farbstoffsolarzellen	81,1		
	Organische Solarzellen	29,5		
	Stapel Solarzellen	24,1		
	Quantenpunkt-solarzellen	22,3		
Brennstoffzellenheizgeräte			164,5	
Brennstoffzellenfahrzeuge			630,0	
Kraftstoffadditiv Ceroxid			62,6	
Nanostrukturierte Membran zur CO <sub>2</sub> -Abscheidung			408,6	
Thermoelektrische Generatoren	Auto Kraftwerk	47,4		2,1
Superkondensatoren in Hybridbussen				2,8
<i>LED im Automobilbereich</i>				5,0
OLED und LED in der Allgemeinbeleuchtung				206,7
OLED Displays				33,7
Ultrahochfester Beton				17,9
Dämmanwendung mit VIP				119,6
Polycarbonat für Automobilverschiebung				1,6
Nanolacke im Automobilbereich	Herstellung und Applikation			1,0
	Gebrauchsphase			0,2
Nanofüllstoffe in Autoreifen				49,2
Reibungsreduzierende Beschichtungen				163,0
Nanokatalysatoren (Styrol)				7,4
Nanopartikel in der Kunststoffproduktion				0,4
<b>Summe</b>		<b>404</b>	<b>1.268</b>	<b>608</b>

**Tabelle 4.8:** Vergleich des theoretischen Potenzials der Nanotechnologie mit Vergleichswerten

Sektor	Theoretisches Potenzial		Vergleichswert 2001 - 2005 <sup>46</sup> (siehe /EU 2006/ und /BMWi 2012/)
	[PJ]	[%]	[PJ]
Zusätzliche Energieproduktion	404	18,6	2.171 <sup>47</sup>
Energieeinsparung	Erzeugung / Wandlung	409	5.429 <sup>48</sup>
	Industrie	56	2.485 <sup>49</sup>
	GHD	148	1.498 <sup>49</sup>
	Haushalte	347	2.697 <sup>49</sup>
	Verkehr	916	2.635 <sup>49</sup>

<sup>47</sup> Mittelwert der Jahre 2001 bis 2005 der Bruttostromerzeugung (siehe /BMWi 2012/)

<sup>48</sup> Mittelwert der Jahre 2001 bis 2005 des Einsatzes von Energieträgern zur Stromerzeugung (siehe /BMWi 2012/)

<sup>49</sup> Mittelwert der Jahre 2001 bis 2005 des Endenergieverbrauchs des entsprechenden Sektors (siehe /BMWi 2012/)

## 5 Beschreibung biotechnologischer Anwendungen

Die Möglichkeiten und Herausforderungen der Biotechnologie sind bisher nicht umfassend untersucht und abgeschätzt worden (siehe Kapitel 3.3.2). In Kapitel 5.3 werden mögliche Einsatzgebiete der Biotechnologie mit dem Fokus auf die Energiewirtschaft näher beschrieben und im Detail analysiert. Vorab erfolgt die Definition und Einordnung der Biotechnologie sowie eine Beschreibung der wissenschaftlichen und technischen Grundlagen (siehe Kapitel 5.2).

### 5.1 Begriffsbestimmung und Einordnung von Biotechnologie

Die moderne Biotechnologie zählt ebenso wie die Nanotechnologie zu den Schlüsselfeldern zukünftiger Innovationen mit großer industrieller Bedeutung. Kennzeichnend für moderne biotechnologische Prozesse ist die integrierte Anwendung unterschiedlicher natur- und ingenieurwissenschaftlicher Disziplinen von der Mikrobiologie und Biochemie bis zur Verfahrens- und Elektrotechnik. Das Spektrum der Anwendungsmöglichkeiten und das wirtschaftliche Potenzial der Biotechnologie reichen von Medizin und Pharmazie über Lebensmitteltechnik, Chemie und Landwirtschaft hin zum Umweltschutz und der Gewinnung neuer Verbindungen sowie Energie aus nachwachsenden Rohstoffen.

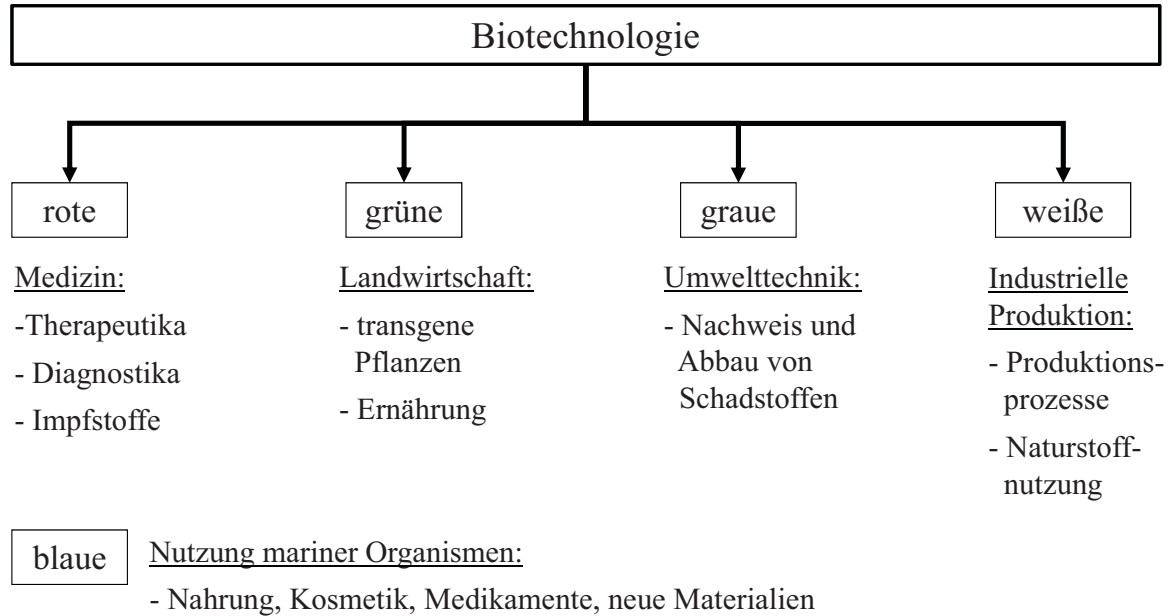
Mit dem Einsatz biotechnologischer Methoden ist unter anderem die Erwartung verbunden, die Effizienz von Produktions- und FuE-Prozessen<sup>50</sup> zu erhöhen. Darüber hinaus eröffnen sich Möglichkeiten der Entwicklung völlig neuartiger Produkte, z. B. Biomaterialien oder auch biopharmazeutischer Produkte zur Heilung bisher nicht behandelbarer Krankheiten.

Bei der Nutzung der Biotechnologie wird üblicherweise in vier bzw. in fünf Bereiche unterschieden (vgl. **Abbildung 5.1**). Die rote Biotechnologie beschäftigt sich mit dem Anwendungsbereich der Medizin und die grüne Biotechnologie hat ihren Schwerpunkt im Bereich der Landwirtschaft und Ernährung. Anwendungen der grauen Biotechnologie beschäftigen sich mit Themen der Umwelttechnik, wohingegen unter der weißen Biotechnologie<sup>51</sup> Produkte und Prozesse der industriellen Produktion verstanden werden. Eine neue Kategorie wird als blaue Biotechnologie bezeichnet. Dabei handelt es sich um eine Vielzahl von unterschiedlichen Anwendungen, welche die Nutzung von marinen Organismen verbindet /Braun et al. 2006/. Zur Abgrenzung der relevanten biotechnologischen Verfahren wird häufig auf die OECD Definition verwiesen: “The application of science and technology to living organisms, as well as parts, products and models thereof, to alter living or non-living materials for the production of knowledge, goods and services” /OECD 2005/.

---

<sup>50</sup> FuE Forschung und Entwicklung

<sup>51</sup> auch industrielle Biotechnologie



**Abbildung 5.1:** Einteilung der Biotechnologie /Braun et al. 2006/

Darüber hinaus definiert /OECD 2005/ ein biotechnologisches Produkt als “a good or service, the development of which requires the use of one or more biotechnology techniques per list-based and single definitions. It includes knowledge products (technical know-how) generated from biotechnology R&D”. Ein biotechnologischer Prozess ist definiert als “a production or other (e.g. environmental) process using one or more biotechnology techniques or products” /OECD 2005/. Beispiele für biotechnologische Verfahren, Produkte und Prozesse sind in **Tabelle 5.1** zusammengefasst.

**Tabelle 5.1:** Ausgewählte Beispiele für biotechnologische Verfahren, Produkte und Prozesse /OECD 2005/

Biotechnologische Verfahren	Produkte / Anwendungen	Produkte und Endanwendungen
Entwicklung von genetisch verbesserten oder modifizierten Mikroben oder Pilzen zur Herstellung von Enzymen	Herstellung von Enzymen die selektiv Lignin abbauen und Holzzellen während des Holzaufschlusses (Pulping) aufbrechen (weiße Biotechnologie)	Enzyme für den Einsatz als Aufheller und Reinigungszusatz in Reinigungsmitteln
Entwicklung von genetisch verbesserten Organismen zur Enzymherstellung	Enzyme die Getreidereste in Zucker umwandeln, die dann zur Ethanolherstellung verwendet werden können (weiße Biotechnologie)	Enzyme für den Einsatz beim Bleichen bei der Papierherstellung
Nutzung von DNA-Technologien zum Transfer von Genen von einer Spezies zu einer anderen Spezies	Entwicklung von schädlingsresistenten Baumwollpflanzen und Sojabohnen die ein Gen zur Produktion eines Gifts gegen den <i>Bacillus thuringiensis</i> enthalten (grüne Biotechnologie)	Ethanol für den Einsatz im Verkehrswesen

Die Ursprünge der Biotechnologie sind weit vor der Geburt Christi zu datieren (vgl. auch **Tabelle 5.2**). Archäologen gehen davon aus, dass die Bierbrauerei bereits vor 7000 Jahren bekannt war. Diese praktizierte Biotechnologie, nach /Heiden et al. 2001/ empirische Biotechnologie genannt, basiert auf dem zufälligen Kontakt von Menschen mit Mikroorganismen, die für die Nahrungsmittelherstellung wichtig waren. Aus diesen Erfahrungen entwickelten sich erste Verfahren zur Sauerteigherstellung, zur alkoholischen Gärung oder auch zur Käseverarbeitung. Im Mittelalter wurden die großen Qualitätsschwankungen der so erzeugten Produkte durch zielgerichtetes Arbeiten, besonders durch die Alchemisten, reduziert. Damit wurden die empirischen Erkenntnisse in erste industrielle Techniken überführt und die Ergebnisse dieser biotechnologischen Prozesse waren dadurch reproduzierbar. Aufgrund der Erkenntnisse der Naturwissenschaften zu Beginn des 19. Jahrhunderts kam es zum Übergang zur klassischen Biotechnologie. Durch die steigende Nachfrage nach hochwertigen Lebensmitteln und der industriellen Revolution erfolgten z. B. die Überführung von Verfahren zur Milchsäureproduktion (Lebensmittelkonservierung) oder zur Backhefeherstellung (Brotproduktion) in großindustrielle Verfahren. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts erfolgte die Erarbeitung als auch die Optimierung weiterer biotechnologischer Verfahren und durch den 2. Weltkrieg wurde der Weg zur modernen Biotechnologie beschritten.

**Tabelle 5.2:** Historie der Biotechnologie (nach /Scheper 1998/ in /Heiden et al. 2001/)

Zeitalter	Biotechnologisches Verfahren
Empirische Biotechnologie	
Ca. 7000 vor Christus	Bierbrauerei
Bis zur Zeitwende	Sauerteigherstellung Alkoholische Gärung Essigherstellung Käseverarbeitung
Mittelalter	Erste industrielle Techniken: - Ethanolgewinnung - Ledergerberei - Technische Essigherstellung
Übergang zur Klassischen Biotechnologie	
19. Jahrhundert	Milchsäureproduktion Abwasserreinigung Backhefeherstellung
1915/16	Produktion von: - Butanol - Aceton - Glycerin
1920	Zitronensäureherstellung
Moderne Biotechnologie	
2. Weltkrieg	Antibiotikaherstellung
Ab Mitte der 70er Jahre	Gentechnik

Als der entscheidende Schritt zur modernen Biotechnologie kann das gentechnische Experiment von Stanley Cohen und Herbert Boyer angesehen werden, denen 1973 der Einbau von fremder DNA in ein Plasmid gelang /Heiden et al. 2001/. Nach /Lippold 2011a/ erfolgte die Prägung des Begriffes Biotechnologie im Jahr 1919 relativ spät durch den ungarischen

schen Ingenieur Karl Ereky. Die Fortschritte in der Gentechnik wie z. B. das Klonen rückte in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts in den Mittelpunkt der Öffentlichkeit mit dem Schaf Dolly. In weitaus einfacherer Form wurde dieser Vorgang bereits 1902 durch den Biologen Hans Spemann durchgeführt. Er teilte einen Molchembryo in zwei Zellen, aus denen zwei identische Lebewesen entstanden. Trotz dieser sehr frühen Ursprünge wurde der Großteil des theoretischen Wissens der modernen Biotechnologie im späten 20. Jahrhundert gelegt. An die „Theorie der spontanen Erzeugung von Lebewesen“ wurde bis ins Jahr 1668 geglaubt, bis Francesco Redi sie widerlegte. Erst 200 Jahre später wurden die Grundlagen der klassischen Vererbungslehre durch Gregor Mendel formuliert. Bis zum Beginn der Molekulargenetik und der Entdeckung sowie strukturellen Charakterisierung der DNS durch James Watson und Francis Crick, verging nach Mendel noch fast ein Jahrhundert. Damit waren die theoretischen Grundlagen der modernen Biotechnologie bekannt, die als Basis für die praktische Anwendung und kommerzielle Nutzung der Biotechnologie dienen. Als Geburtsstunde der Biotechnologie wird oft das Jahr 1977 angegeben, da in diesem Jahr zum ersten Mal ein menschliches Gen geklont wurde und die genetische Herstellung des menschlichen Hormons Somatostatin durch ein Bakterium gelang /Lippold 2011a/.

Die Biotechnologiebranche in Deutschland ist seit Mitte der 1990er Jahre stark gewachsen und zu einem wichtigen Innovationstreiber der Chemie- und Pharmaindustrie geworden. Die Umsätze der deutschen Biotechnologiebranche stiegen von unter 300 Mio. Euro im Jahr 1996 auf über 2 Mrd. Euro in 2010. Gleichzeitig vervierfachte sich die Zahl der Beschäftigten von unter 4.000 auf 15.000. Aufgrund des starken Wachstums in den letzten 15 Jahren gehört Deutschland zu einer der führenden Nationen bei der Nutzung der Biotechnologie. So sind z. B. die Pharmabranche oder die chemische Industrie ohne neue Wirkstoffe und Herstellungswege, die auf der Biotechnologie basieren, kaum noch vorstellbar. Am gesamten Umsatz der chemisch-pharmazeutischen Industrie hat die Biotechnologie einen Anteil von mehr als 11 %. Dabei hat die Biotechnologie ihre technischen und wirtschaftlichen Grenzen noch nicht erreicht. So wird davon ausgegangen, dass Unternehmen der chemisch-pharmazeutischen Industrie, der Lebensmittelbranche und der Landwirtschaft weitere steigende Anteile am Umsatz durch die Biotechnologie erwirtschaften. Der Schwerpunkt der Unternehmen beschäftigt sich mit der roten oder medizinischen Biotechnologie (45 %). Mit großem Abstand folgen die weiße Biotechnologie (10 %) und die grüne Biotechnologie (5 %). Die weiße Biotechnologie wird langfristig jedoch stark an Bedeutung gewinnen. Viele neue Produktionsprozesse der weißen Biotechnologie können zukünftig weite Teile der heutigen Herstellungsprozesse ersetzen und in vielen Fällen kann Biomasse als Rohstoff eingesetzt werden /Rakau 2011/.

### **5.1.1 Rote Biotechnologie**

Unter der roten Biotechnologie werden nach /Müller et al. 2005/ alle human- und veterinärmedizinischen Anwendungen verstanden und es werden die entsprechenden Produkte z. B. Therapeutika, Impfstoffe, Diagnostika sowie die in diesen Bereichen anwendbaren Plattformtechnologien eingeschlossen. Es wird dabei zwischen den Produktarten Diagnostika (dienen



dem Nachweis von Krankheiten) und Wirkstoffe (dienen zur Heilung von Krankheiten bzw. versuchen Symptome zu bekämpfen) unterschieden. Nach /Perlitz 2004/ eröffnet vor allem die Entwicklung von Arzneimitteln und Diagnostika dem Pharmabereich ungeahnte Möglichkeiten. Durch den Einsatz der Biotechnologie lässt sich die Entdeckung neuer Arzneimittel beschleunigen da z. B. die Bioinformatik eine gezielte Auswahl der Prüfsubstanzen ermöglicht. Die rote Biotechnologie behandelt medizinische Anwendungen von der Diagnostik bis zur Therapie. Sie konzentriert sich auf die Entwicklung neuartiger Medikamente, um Krankheiten oder genetisch bedingte Defekte zu heilen. Einer der Forschungsansätze ist z. B. die Bekämpfung von Krebserkrankungen durch gezielte Eingriffe in die Steuerungsmechanismen des Tumorwachstums. Ein weiteres Einsatzgebiet ist der gezielte Einsatz von Medikamenten mit sogenannten Drug-Delivery-Systemen. Auch die Regeneration von körperlichen Schäden soll durch die rote Biotechnologie ermöglicht werden. Mit Hilfe des Tissue Engineering wird z. B. Gewebe gezüchtet, das sich zur Transplantation eignet. Auch bei der Diagnose können biotechnologische Verfahren dazu verwendet werden, Krankheiten oder Gendefekte zu erkennen /Lippold 2011b/.

### 5.1.2 Grüne Biotechnologie

Nach /Müller et al. 2005/ sind die Ergebnisse der grünen Biotechnologie mit den Ergebnissen der seit Jahrhunderten praktizierten Züchtungsverfahren vergleichbar. Dieser Prozess kann jedoch durch neue gentechnische Methoden stark beschleunigt werden. Kerntechniken sind die Herstellung von Protoplasten<sup>52</sup> und die Regeneration ganzer Pflanzen.

Bei der klassischen Züchtung kann die Kombination der Gene nicht exakt kontrolliert werden. Hier eröffnet die Gentechnik neue Wege. Wissenschaftler haben die Möglichkeit, Pflanzen mit nützlichen Genen gezielt auszustatten, so dass diese z. B. resistent gegen Schädlinge oder Pilze werden und andererseits können unerwünschte Gene unwirksam gemacht werden. 2003 wurde in Deutschland erstmalig ein Wein aus gentechnisch veränderten Reben hergestellt, welche widerstandsfähig gegen Pilzbefall waren. Bisher setzten Winzer hier auf chemische Spritzmittel. Weltweit sind große Flächen durch giftige Stoffe verunreinigt, die einen industriellen Ursprung aufweisen. Durch den Einsatz gentechnisch veränderter Pflanzen könnte z. B. der Verbrauch von Pflanzenschutzmitteln weltweit drastisch reduziert werden. Auch die gezielte gentechnische Veränderung von Pflanzen für extreme Umweltbedingungen ist ein Forschungsbereich der grünen Biotechnologie.

Gentechnisch veränderte Pflanzen können je nach Ziel der Veränderung in Pflanzen der ersten, der zweiten oder der dritten Generation eingeteilt werden. Bei Pflanzen der ersten Generation wurden mit dem Ziel, die agronomischen Eigenschaften der Pflanze zu verbessern, ein oder zwei Pflanzengene verändert. Diese genetische Veränderung hatte jedoch nicht die Verbesserung der Produktqualität zum Ziel. Beispiele hierfür sind Pflanzen mit einer erhöhten Widerstandsfähigkeit gegen Schädlinge, Herbizide oder Trockenheit und es wurden überwiegend Raps, Mais, Soja und Baumwolle gentechnisch verändert. Bei gentechnisch

---

<sup>52</sup> Pflanzenzellen ohne Zellwand

veränderten Pflanzen der zweiten Generation wurden Veränderungen an mehreren Genen vorgenommen mit dem Ziel, bestehende Stoffwechselwege zu modifizieren und somit neue Nahrungsmiteleigenschaften zu erhalten. Als Beispiele können Pflanzen mit gesundheitsfördernden Inhaltsstoffen sog. „Functional Food“ wie z. B. Raps- und Sojasorten mit gesünderer Ölzusammensetzung genannt werden. Als dritte Generation werden Pflanzen bezeichnet, die als Produktionsstätten für nicht-pflanzliche Produkte dienen und unter dem Stichwort „Molecular Farming“ geführt werden. Hierfür werden transgene Pflanzen entwickelt und angebaut, die dazu dienen, hochwertige pharmazeutische Wirkstoffe oder Diagnostika zu gewinnen. Es wird bei dieser Generation von gentechnisch veränderten Pflanzen davon ausgegangen, dass damit eine erhebliche Kosteneinsparung im Vergleich zu der konventionell durchgeführten Produktion in Mikroorganismen oder Säugetieren ermöglicht wird. Nach /BK-Biopro 2010/ bietet die grüne Gentechnik aus wissenschaftlicher Sicht ein großes Potenzial, da Pflanzen damit als Lieferanten von Impfstoffen oder Nährstoffen genutzt werden können, die sie unter normalen Umständen nicht produzieren.

Viele Länder setzen die grüne Biotechnologie dazu ein, um eine preiswerte und sichere Versorgung mit landwirtschaftlichen Gütern zu sichern, da biotechnisch gezüchtete oder gentechnisch veränderte Pflanzen häufig einen höheren Flächenertrag erbringen und gegenüber Schädlingen oder extremen Wetterbedingungen unempfindlicher sind. Weltweit ist die grüne Biotechnologie auf dem Vormarsch. In Deutschland ist und bleibt sie jedoch sehr umstritten /Rakau 2011/.

### 5.1.3 Graue Biotechnologie

Unter dem Begriff der grauen Biotechnologie werden alle Einsatzgebiete im Bereich des Umweltschutzes und der nachsorgenden Bioverfahrenstechnik zusammengefasst und sie spielt eine wichtige Rolle bei der Lokalisierung sowie der Beseitigung von Umweltbelastungen. Beispiele sind die Bodensanierung, Abwasser- und Abluftbehandlungen, Abfallverwertung, Wertstoffgewinnung oder das Biomonitoring /Müller et al. 2005/. Die graue Biotechnologie hat ihren Ursprung in der Suche nach biotechnologischen Verfahren zum Abbau von Schadstoffen, nachdem sie in die Umwelt gelangt sind, bzw. zur Verhinderung, dass Schadstoffe aus industriellen Prozessen in die Umwelt gelangen /Braun et al. 2006/.

### 5.1.4 Weiße Biotechnologie

Der Schwerpunkt der weißen Biotechnologie liegt auf der Herstellung von Produkten (Bulk- und Feinchemikalien, Lebensmittel, Lebensmittelzusatzstoffe, Futtermitteladditive, Agrar- und Pharmavorprodukte, technische Enzyme oder Biokraftstoffe) mit biotechnischen Verfahren. Beispiele für Produkte der weißen Biotechnologie sind in **Tabelle 5.3** dargestellt. Um neue kostengünstigere Produktionsverfahren zu entwickeln, werden im Rahmen der weißen Biotechnologie Mikroorganismen bzw. Zellen höherer Organismen oder deren Bestandteile (Enzyme) als Basis für die industrielle Produktion verwendet. Sie kann branchenübergreifend eingesetzt werden und besitzt eine wachsende Bedeutung für die chemische Industrie aber

auch für neue Verfahren und Produkte in anderen Branchen wie z. B. der Lebensmittel-, Kosmetik-, Textil- oder Papierindustrie. Durch die weiße Biotechnologie wird die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen als Basis der industriellen Produktion und zur Energieerzeugung als auch die Steigerung einer nachhaltigen industriellen Produktion ermöglicht /Müller et al. 2005/.

**Tabelle 5.3:** Produkte der weißen Biotechnologie /Müller et al. 2005/

Fermentative Prozesse			Biokatalyse und Biotransformation	
Aminosäuren	Säuren	Lösungsmittel	Grundchemikalien	Aminosäuren
Biomasse	Enzyme	Lebensmittel	Antibiotika	Zwischenprodukte
Genussmittel	Antibiotika	Andere Wirkstoffe	Spezialprodukte	Lebensmittel
Biopolymere	Vitamine	Lipide	Wirkstoffvorstufen	
Futtermittel	Kosmetik			

Nach /Braun et al. 2006/ hat die weiße Biotechnologie im Vergleich zur grauen Biotechnologie das Ziel, dass bei industriellen Produktionsprozessen gar keine Schadstoffe entstehen. Dies soll durch neue biotechnologische Verfahren, z. B. der Biokatalyse oder der Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen (stoffliche und energetische Nutzung), erfolgen. Nach /Perlitz 2007/ soll die weiße Biotechnologie „erdölabhängige chemische Prozesse durch Mikroorganismen in Zellfabriken (sog. Bioreaktoren oder Fermentern) ersetzen und so vom Erdöl unabhängiger machen“. Aufgrund der Tatsache, dass sich die weiße Biotechnologie auf ressourcenschonende, energiesparende und abfallvermeidende industrielle Herstellungs- und Produktionsprozesse konzentriert, ist die Akzeptanz in der Öffentlichkeit gut und sie ist selten der öffentlichen Kritik ausgesetzt wie z. B. die rote oder die grüne Biotechnologie. Bis 2015 wird mit einer jährlichen Umsatzzunahme von 10 % gerechnet, wobei laut /Perlitz 2007/ das größte Potenzial in der Feinchemie ermöglicht wird. Etwa die Hälfte der Umsätze soll dort mittelfristig auf biotechnologische Prozesse entfallen.

### 5.1.5 Blaue Biotechnologie

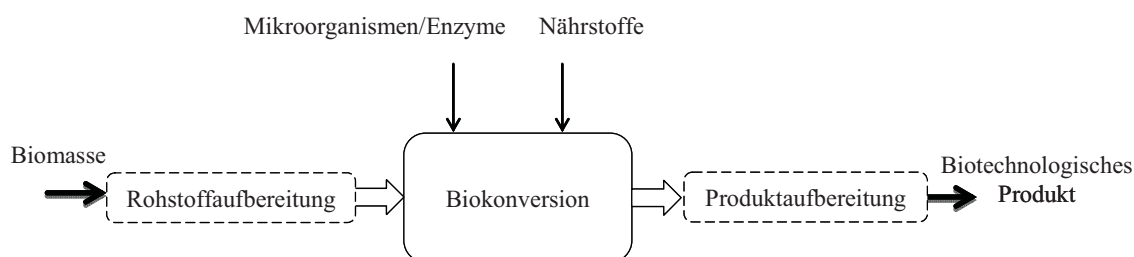
Unter dem Begriff der blauen Biotechnologie werden nach /Müller et al. 2005/ marine Produkte und Verfahren zusammengefasst. Sie spielt jedoch in Deutschland noch eine untergeordnete Rolle, hat jedoch ein großes wirtschaftliches Potenzial. Möglichkeiten sind z. B. die Isolierung von Wirkstoffen aus Schwämmen oder Algen, die Gewinnung von Substanzen als Antifouling-Beschichtung (vgl. auch Kapitel 4.3.3) in der Schifffahrt oder unter Wasser aushärtende Klebstoffe aus Muscheln, die für Kapselmaterial in der pharmazeutischen Produktion eingesetzt werden könnten. Die blaue Biotechnologie setzt ihren Schwerpunkt auf die technische Verwendung von Prozessen und Organismen der marinen Biologie /Lippold 2011b/. So werden beispielsweise Bakterien, die in großen Tiefen und unter extremen Bedingungen leben, als mögliche Wirkstoffquelle für neue Medikamente angesehen.

## 5.2 Wissenschaftliche und technische Grundlagen von Biotechnologie

Für die Betrachtung der Auswirkungen der Biotechnologie auf die Energiewirtschaft wird der Schwerpunkt der weiteren Untersuchungen auf Anwendungen und Potenziale der weißen Biotechnologie gelegt. Dies ist darin begründet, dass die aktuell identifizierten biotechnologischen Anwendungen im Bereich der weißen Biotechnologie mit den größten Auswirkungen auf die energetische Wertschöpfungskette verbunden sind. Aufgrund des Querschnittcharakters der Biotechnologie ist jedoch eine klare Abgrenzung und Zuordnung der unterschiedlichen Anwendungen zu den oben genannten Einteilungen der Biotechnologie nicht immer möglich bzw. sinnvoll.

Biotechnologische Verfahren der weißen Biotechnologie lassen sich nach /Braun et al. 2006/ z. B. in den Einsatz der Biokatalyse und der Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen untergliedern. Dabei ist die Biokatalyse ein gutes Beispiel für den Querschnittscharakter der Biotechnologie, da diese sowohl in der roten, der grünen, der blauen, der grauen und schwerpunktmäßig jedoch in der weißen Biotechnologie angewendet wird. Der Begriff der Biokatalyse steht dabei zusammenfassend für „Stoffumwandlungen durch Enzyme und vereint zahlreiche verschiedene Reaktionen mit spezifischen Katalysatoren. Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der Biokatalyse zielen auf die Optimierung oder Generierung von (z. B. biotechnischen oder bisher chemischen) Reaktionen und Prozessen. Vision ist die Entwicklung einer Toolbox, mit deren Hilfe sich maßgeschneiderte Enzyme generieren lassen. Für die industrielle Produktion liegt das Potenzial der Biokatalyse in der Entwicklung neuer Prozesse mit hochspezifischen Stoffumwandlungen, die sowohl energie- und ressourcensparend arbeiten als auch möglichst keine, nicht weiter verwendbaren Abfallstoffe produzieren.“ /Braun et al. 2006/.

Der biotechnologische Prozess zur Umwandlung von Biomasse besteht im Wesentlichen aus drei Schritten: der Aufbereitung des Rohstoffes, der Biokonversion und der Produktaufbereitung (vgl. **Abbildung 5.2**).



**Abbildung 5.2:** Schematische Darstellung eines biotechnologischen Prozesses zur Umwandlung von Biomasse (eigene Darstellung nach /Nidetzky et al. 2010/)

Unter der Aufbereitung des Rohstoffes wird z. B. der Aufschluss der benötigten Stoffbestandteile verstanden. Bereits bei diesem ersten Schritt kann eine erste Stoffumwandlung, wie z. B. eine enzymatische Zerlegung, erfolgen. Die eigentliche Biokonversion (Stoffumwandlung) erfolgt dann jedoch meist unter Zugabe von Nährstoffen in einem Bioreaktor bzw. Fermenter, da dort optimale Reaktionsbedingungen geschaffen werden können. Fermentation und Biokatalyse stellen die bedeutendsten Stoffumwandlungen dar. Als Fermentation

(oder Gärung) werden Energiestoffwechsel bezeichnet, die anaerob ablaufen und auf den vergärenden Eigenschaften von Mikroorganismen beruhen. Biokatalyse beschreibt allgemein eine biochemische Reaktion, die in Gegenwart biologischer Katalysatoren, den Enzymen, ablaufen /Bannwarth et al. 2007, Thieman et al. 2007/.

Die weiße Biotechnologie nutzt nachwachsende Rohstoffe aus dem Bereich der Landwirtschaft sowie petrochemisch hergestellte Substrate, um mit Hilfe von Enzymen und Mikroorganismen Bioprodukte herzustellen. Im Grundsatz nutzen alle Bereiche der Biotechnologie die gleichen molekularbiologischen, molekulargenetischen und biotechnologischen Verfahren und Methoden mit dem Ziel, biologische Systeme (Algen, Pflanzen, Mikroorganismen) so zu optimieren, damit hohe Synergien bestehen.

Enzyme sind Biokatalysatoren, da sie in Entsprechung zu chemischen Katalysatoren Reaktionen beschleunigen. Dies erfolgt dadurch, dass sie die Aktivierungsenergie, die benötigt wird, um eine chemische Bindung aufzubrechen, herabsetzen. Daher laufen enzymatische Reaktionen im Vergleich zu chemischen Reaktionen in der Regel bei niedrigeren Temperaturen und Drücken ab, d. h. insgesamt bei mildereren Reaktionsbedingungen. Darüber hinaus haben Enzyme die Eigenschaft, dass sie hochselektiv reagieren, d. h., ein Enzym katalysiert oft nur eine ganz bestimmte Reaktion, wodurch störende Nebenreaktionen vermieden werden können /Müller et al. 2005/.

Enzyme kommen in allen lebenden Organismen vor und sind dafür verantwortlich, dass die elementarsten Lebensprozesse funktionieren. In der Forschung sind ca. 3.000 Enzyme bekannt und davon werden nach /Perlitz 2007/ ca. 150 kommerziell genutzt. Ein Schwerpunkt mit ca. 40 verwendeten Enzymen liegt in der Lebensmittelindustrie.

Die Einsatzmöglichkeiten von Enzymen in der industriellen Produktion lassen sich in die drei Bereiche Enzyme zur Produktion von Ausgangsstoffen (z. B. Ethanolherstellung), Enzyme als Bestandteil des Produktionsprozesses bzw. als Katalysator von Stoffumwandlungen sowie Enzyme als Produkt des Produktionsprozesses, die für verschiedene Einsatzzwecke verwendet werden, einteilen /Braun et al. 2006/.

Darüber hinaus verwendet die weiße Biotechnologie Mikroorganismen oder deren Bestandteile, um damit biotechnologische Produkte zu erzeugen oder chemische Reaktionen durchzuführen. „Mikroorganismen umfassen eine große und vielfältige Gruppe mikroskopisch kleiner Organismen, die als einzelne Zellen oder Zellansammlungen leben. Die mikrobiellen Zellen sind von Membranen umgeben, was eine Grundvoraussetzung für Leben ist. Nur durch die Kompartimentierung können die chemischen Komponenten des Lebens ausreichend konzentriert vorliegen, um alle notwendigen chemischen Reaktionen zu ermöglichen. Zellen sind dabei kein geschlossenes System, sondern kommunizieren mit der Umgebung und tauschen Stoffe aus“ /BMBF 2007/.

Für den industriellen Einsatz werden Mikroorganismen bevorzugt, die sowohl in ausreichender Menge als auch mit geringem finanziellem Aufwand gezüchtet und eingesetzt werden können. Mikroorganismen verfügen über eine große Vielfalt an physiologischen Fähigkeiten. So können sie verschiedenste chemische Stoffe wie z. B. Kohlenmonoxid, Methan, Sulfate, Schwefel, Nitrate oder toxische Verbindungen „verstoffwechseln“ /BMBF 2007/. Um als Biokatalysatoren eingesetzt zu werden, benötigen viele Enzyme zusätzliche chemi-



sche Komponenten, sog. Cofaktoren. Bei einem typischen biotechnologischen Prozess werden die Rohstoffe in einem geschlossenen Reaktor unter Zufuhr von Energie zu einem oder mehreren Produkten umgesetzt. Es können damit auch neue Produkte hergestellt werden, die bisher mit chemischen Prozessen nicht synthetisiert werden konnten.

Eine andere Vision könnte für zukünftige biotechnologische Produktionsverfahren darin bestehen, lebende Zellen vollständig als Reaktionssystem zu umgehen. Im Rahmen der Miniaturisierung mit der Mikrosystemtechnik und der Nanotechnologie bewegen sich die Ingenieurwissenschaften zunehmend in Größenmaßstäben, in denen Molekularbiologen arbeiten. Daher ist auch eine Verschmelzung der Zellbiologie mit dem Ingenieurwesen zu einer „Biosystemtechnik, die biologische Stoff- und Energieumwandlungsprozesse zellfrei nachahmt und zur biotechnologischen Produktion nutzt“, denkbar /BMBF 2008/.

Durch den Einsatz von maßgeschneiderten Mikroorganismen und technisch optimierten Biokatalysatoren kann die Herstellung und Gewinnung von Biokraftstoffen und industriellen Produkten auch aus Agrarabfällen zukünftig wirtschaftlich gelingen. Dabei wird der synthetischen Biotechnologie ein großes Potenzial zugesprochen. Hiefür werden Erkenntnisse aus der systembiologischen Forschung und den Ingenieurwissenschaften mit dem Ziel angewendet, komplexe biologische Systeme zu vereinfachen und sie auf die grundlegendsten Systemkomponenten zu reduzieren. Weitere zukünftige Ansätze sind die Konstruktion von biometrischen Systemen<sup>53</sup> oder die systemweite Reprogrammierung von zellulären Prozessen, z. B. durch Generierung von neuen Stoffwechselwegen für nicht natürlich vorkommende Produkte /BioÖkonomieRat 2010/.

Die Herstellung von Enzymen im großtechnischen Maßstab erfolgt in der Regel durch Mikroorganismen in geschlossenen Systemen, den Bioreaktoren oder Fermentern. Dabei ist der Bioreaktor das Kernstück einer biotechnologischen Produktionsanlage und er kann ein Fassungsvermögen von bis zu 1,5 Mio. Liter aufweisen. Die eingesetzten Reaktoren gewährleisten eine genaue Prozesskontrolle sowie Prozessführung und es werden nach /BMBF 2007/ drei unterschiedliche Verfahren eingesetzt:

1. „Das diskontinuierliche Verfahren (Batch- oder Chargenverfahren), bei dem der Reaktionsraum zu Beginn mit dem gesamten Ausgangsmaterial und den Mikroorganismen gefüllt wird. Der Tank wird nach Beendigung der Reaktion geleert und das Produkt gereinigt.“
2. „Das kontinuierliche Verfahren, bei dem dem Reaktor ständig die Ausgangsstoffe zugeführt und ein Reaktionsgemisch entnommen werden. Ein Fließgleichgewicht zwischen Durchflussrate und Wachstumsgeschwindigkeit der Mikroorganismen muss sich dabei einstellen.“
3. „[...] die semi-kontinuierliche Produktion, bei der in bestimmten Intervallen Fermentationsbrühe aus dem Reaktionsraum abgezogen und durch neues Medium ersetzt wird oder lediglich neues Medium zugegeben wird.“

---

<sup>53</sup> die Natur nachahmende Systeme



Ein sehr wichtiger Punkt beim Betrieb von Bioreaktoren ist die Sicherstellung einer homogenen Durchmischung des gesamten Fermentationsguts und bei aeroben Prozessen zusätzlich die Versorgung mit Sauerstoff. Bei einem Rührreaktor kann die Durchmischung mit dem Einsatz von Rührwerken, Pumpen oder Turbinen erfolgen. Bei Membranreaktoren wird das Produkt durch eine Membran vom Katalysator getrennt und es erfolgt daher keine homogene Mischung aus Medium und Zellen bzw. Enzymen. Bei Hohlfaserreaktoren strömt das Medium durch Hohlfasern, auf deren Oberfläche die Katalysatoren immobilisiert sind. Durch Füllungen mit Trägermaterial aus Glas oder Cellulose wird bei Festbettreaktoren eine Oberflächenvergrößerung erzeugt. Vorteile von immobilen Katalysatoren sind z. B. eine erhöhte Katalysatorstabilität, eine Verlängerung der Lebensdauer, eine mögliche Mehrfachverwendung, eine oft einfachere Produktreinigung oder auch eine bessere Produktqualität.

Als „Upstream-Processing“ werden die Aufbereitung der Substratlösung und die vorbereitenden Maßnahmen für die Fermentation bezeichnet. Schritte, die notwendig sind, das Produkt aus der Fermentationslösung bis zum abschließend gereinigten Produkt abzutrennen, werden „Downstream-Processing“ (Reinigung und Aufbereitung der biotechnologischen Produkte) genannt. Werden Mikroorganismen eingesetzt, die das erzeugte Produkt in das Medium absondern, so gestaltet sich die Aufreinigung wie z. B. bei Penicillin einfach. Die Gewinnung des Produkts wird bedeutend schwieriger, wenn Zellen oder Mikroorganismen zuerst aufgeschlossen und das Produkt von den restlichen Inhalten getrennt werden muss. Für die Übertragung von biotechnologischen Prozessen aus dem Labormaßstab hin zu großtechnischen Anlagen sind nach /BMBF 2007/ umfassende Kenntnisse der Verfahrenstechnik notwendig und sie stellt einen komplizierten Schritt in der industriellen Biotechnologie dar. Dabei sind vor allem die Durchmischung und Belüftung der Reaktoren problematisch.

Auch /Hoppenheidt et al. 2005/ fassen spezifische Vor- und Nachteile der Biotechnologie und die damit verbundenen Chancen zusammen (vgl. **Tabelle 5.4**). Es ist ersichtlich, dass gerade in den deutlich milderen Prozessbedingungen die Vorteile biotechnologischer Prozesse liegen. Nachteilig kann sich jedoch z. B. die notwendige Betriebsweise als auch die Reaktionsgeschwindigkeit auswirken.

Nach /Pytlik 2009/ ist das Downstream Processing kostspielig und für bis zu 80 % der Herstellungskosten verantwortlich. Nimmt z. B. die Produktausbeute um das Zehnfache zu, so verschieben sich die Anteile des Verhältnisses Herstellungs- und Aufreinigungskosten von 55:45 auf 30:70. Die Herstellungskosten entwickeln sich zu den Ausbeuten umgekehrt proportional, was für die Kosten des Downstream Processing jedoch nicht gilt.

Für die Markteinführung von biotechnologischen Verfahren ist es wichtig, dass diese effizient und kostengünstig durchgeführt werden, was nach /CHB-Biopros 2010/ eine der großen Herausforderungen darstellt, die bewältigt werden müssen. „Die biotechnologischen Prozesse, die Zellfabriken, die maßgeschneiderten Biokatalysatoren aber auch Aufbereitungsverfahren, die wir dort einsetzen, müssen so effizient sein, dass die Biotechnologie konkurrenzfähig wird“ /CHB-Biopros 2010/. Ein Vergleich von biotechnologischen und petrochemischen Prozessen gestaltet sich oft schwierig, da petrochemische Prozesse groß angelegt und biotechnologische Herstellungsverfahren sich zum Teil noch im Labor- oder Pilotmaßstab befinden. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Biotechnologie in Bereiche kommen wird,

wo sie konkurrenzfähig zu petrochemischen Prozessen, vor allem bei hochpreisigen Produkten, sein wird. Ein wichtiger Schritt in der Vergangenheit, aber auch zukünftig, wird in systembiologischen Strategien zu Optimierung der Produktionsstämme gesehen. Ein idealer Produktionsstamm muss herausragende Produktionseigenschaften haben, im Bereich der Massenkunststoffe muss er eine sehr hohe Produktivität aufweisen, er muss möglichst effizient den Rohstoff in das gewünschte Produkt umwandeln, er muss hohe Produktkonzentrationen bereitstellen, er muss genetisch stabil sein, damit die Prozessführung reproduzierbar ist, und darüber hinaus sollte er eine große Zahl an unterschiedlichen Rohstoffen akzeptieren und geringe Ansprüche an seine Nährstoffe haben, damit er gut in Bioraffineriekonzepte integriert werden kann /CHB-Biopro 2010/.

**Tabelle 5.4:** Spezifische Vor- und Nachteile und Chancen der Biotechnologie /Hoppenheidt et al. 2005/

Vorteile	Nachteile	Chancen
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Verwendung erneuerbarer Rohstoffe</li> <li>– Milde und umweltfreundliche Prozessbedingungen (Wasser als Lösungsmittel, Umgebungstemperaturen und -drücke, nahezu neutraler pH-Wert)</li> <li>– Hohe Selektivität der Bio-transformation und einiger Fermentationen speziell für stereospezifische Produkte</li> <li>– CO<sub>2</sub>-neutrale Produktion</li> <li>– Niedriger Energieverbrauch</li> <li>– Leichte Abfallentsorgung</li> <li>– Einstufige Herstellung komplexer Moleküle, für die oft kein oder nur ein mehrstufiges chemisches Verfahren verfügbar ist</li> <li>– Zugang zu Biochemikalien die nicht durch chemische Reaktion zugänglich sind</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Schwierige Anpassung an integrierte chemische Produktion</li> <li>– Große Reaktorvolumina notwendig (vor allem bei der Fermentation)</li> <li>– Niedrige Reaktionsgeschwindigkeit</li> <li>– Empfindlichkeit biochemischer Reaktionen bezüglich Hitze, extremer pH-Werte und aggressiven Chemikalien</li> <li>– Gewährleistung monoseptischer Reaktionsbedingungen schwierig</li> <li>– Hohe Kosten und begrenzte kommerzielle Verfügbarkeit einiger Enzyme</li> <li>– Oft komplexe Reinigungsschritte</li> </ul>	<p><b>Existierende Produkte</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Niedrige Produktionskosten durch <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Hohe Selektivität</li> <li>○ Einfache Produktionsprozesse für komplexe Moleküle</li> <li>○ Niedrigere Rohstoffkosten</li> <li>○ Niedrigere Entsorgungskosten</li> <li>○ Erneuerbare Rohstoffe</li> </ul> </li> <li>– Bessere Qualität mit reineren Produkten</li> <li>– Geringere Umweltbelastungen</li> </ul> <p>Neue Produkte für bestehende und neue Anwendungen Verknüpfung von Landwirtschaft und Stoff- / Energieproduktion (Nutzung einheimischer Rohstoffe)</p>

Bereits /Nusser et al. 2007/ nennt die Optimierung von Organismen und Enzymen hinsichtlich des Einsatzes in industriellen Produktionsprozessen als wichtigen branchenübergreifenden Forschungsschwerpunkt, welcher sich in folgende Themen untergliedern lässt:

- Steigerung der katalytischen Aktivität der Organismen bzw. Enzyme
- Erschließung von Enzymen, die nicht hydrolytische Reaktionen katalysieren
- Erschließung neuer Standard-Produktorganismen
- Steigerung der Robustheit von Biokatalysatoren gegenüber Extrembedingungen industrieller Produktionsverfahren
- Vereinfachung und Optimierung der Abtrennung von Reaktionsprodukten

- Senkung der Produktionskosten für industriell einsetzbare Enzyme
- Verstärkung der Verfügbarkeit von industriellen Enzymen
- Beschleunigung der Verfügbarkeit von Biokatalysatoren

### 5.3 Biotechnologische Anwendungen und Produkte mit Auswirkungen auf die Energiewirtschaft

Bei den Einsatzmöglichkeiten der Biotechnologie kann in die Nutzung biologischer (nachwachsender) Rohstoffe und in die Nutzung von Enzymen und Mikroorganismen zur gezielten Prozesssteuerung unterschieden werden.

Im Rahmen der Identifikation der Einsatzmöglichkeiten und der systematischen Analyse der Auswirkungen von Basisinnovationen auf die Energiewirtschaft (vgl. Kapitel 2.1 und 2.2) werden im Folgenden biotechnologische Anwendungen mit Relevanz für die Energiewirtschaft detailliert erläutert. Diese Ergebnisse dienen als Grundlage für die in Kapitel 6.2 beschriebenen Szenarien- und Sensitivitätsanalysen.

Bei der Nutzung biologischer Rohstoffe werden Biokunststoffe, die Biogas- und Biokraftstoffproduktion aus Mikroalgen, Tenside, die Erzeugung von Wasserstoff aus Algen sowie die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe beschrieben.

#### 5.3.1 Nutzung biologischer (nachwachsender) Rohstoffe

Nach /Braun et al. 2006/ wird der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen als Energieträger und Quelle einer biomassebasierten Wirtschaft als wachsendes Potenzial angesehen. Einsatzmöglichkeiten von nachwachsenden Rohstoffen als Energieträger und Biomaterial sind in **Tabelle 5.5** dargestellt. Es wird jedoch entscheidend sein, dass nachwachsende Rohstoffe nicht nur als Energieträger oder Kraftstoff genutzt, sondern dass sie in der gesamten Produktions- und Wertschöpfungskette eingesetzt werden /Braun et al. 2006/.

**Tabelle 5.5:** Energieträger und Biomaterial aus nachwachsenden Rohstoffen /Braun et al. 2006/

Biomasse	Umwandlungsprozess	Brennstoff
lignozellulosehaltig (Holz, Gräser, Stroh, Getreidepflanzen)	Direktverbrennung Vergasung	Brennholz Holzgas
ölhaltig (Sonnenblumen, Soja, Raps)	Pflanzenölverarbeitung	Biodiesel (Fettsäuremethylester)
zucker-, stärkehaltig (Weizen, Roggen, Mais, Kartoffeln, Zuckerrüben)	alkoholische Gärung	Bioethanol
vergärbare organische Material (Energiepflanzen, Bioabfall, Klärschlamm)	anaerobe Gärung	Biogas

#### Biokunststoffe

Die Kunststoffproduktion in Deutschland benötigt ca. 5 % des gesamten Erdölverbrauchs. Dies ist im Vergleich zum Verkehrssektor mit fast 90 % zwar sehr gering, jedoch lohnt es sich

für die Kunststoffindustrie, aufgrund der Abhängigkeit vom Erdölmarkt, nach Alternativen zu suchen /Bächtle 2009/. Biokunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe bieten die Möglichkeit der Schonung fossiler Energieträger. Bei einer energetischen Verwertung am Ende des Lebenszyklus haben sie den Vorteil, dass sie weitgehend CO<sub>2</sub> neutral verbrennen.

Der Begriff Biokunststoff wird in der Literatur unterschiedlich benutzt. Der Branchenverband der industriellen Hersteller, Verarbeiter und Anwender von Biokunststoffen und biologisch abbaubaren Werkstoffen (BAW) sowie daraus hergestellter Produkte in Europa (siehe /EUBP 2010/) definiert Biokunststoffe als

- Kunststoffe, die auf Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt werden oder
- biologisch abbaubare Kunststoffe, welche alle Kriterien von wissenschaftlich anerkannten Normen zum Nachweis der biologischen Abbaubarkeit und Kompostierbarkeit von Kunststoff(product)en erfüllen; in Europa EN 13432 / EN 14995

Während sich die zweite Klasse durch die biologische Abbaubarkeit definiert, ist bei der ersten Klasse die biologische Abbaubarkeit keine Voraussetzung jedoch der Einsatz biogener Rohstoffe. Da für die biologische Abbaubarkeit nicht der Rohstoff sondern die molekulare Struktur des Kunststoffes entscheidend ist, können biologisch abbaubare Polymere sowohl auf Basis biogener als auch petrochemischer Rohstoffe hergestellt werden, wodurch auch die Mischung von petrochemischen Polymeren und Biopolymeren, sog. Blendsysteme, möglich ist /EUBP 2010/.

Die Herstellung des Ausgangsgranulats kann sich je nach Biokunststoff unterscheiden. Es können zur Herstellung natürliche oder modifizierte Polymere verwendet werden, bzw. biobasierte Monomere hergestellt werden, die anschließend polymerisiert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von Biopolymeren ist die Biosynthese durch Mikroorganismen. Nach /Shen et al. 2009/ liegt der Schwerpunkt bei der Herstellung von Biopolymeren auf der Verwendung oder der Modifikation von natürlichen Polymeren bzw. auf der Polymerisation biobasierter Monomere. Die bedeutendsten Biokunststoffe sind Thermoplastische Stärke (TPS), Zellulosepolymere, Polymilchsäure (PLA) und Polyhydroxylalkanoate (PHA). Vorteilhaft für die Herstellung von Biokunststoffen ist, dass in der Regel nur geringfügige Modifikationen an den Maschinen zur Herstellung petrochemischer Kunststoffe vorgenommen werden müssen, um Granulat zum gewünschten Biokunststoff zu verarbeiten /EUBP 2010/.

Nach /Bächtle 2009/ kann festgestellt werden, dass biotechnologische Prozesse in der Kunststoffindustrie an Bedeutung gewinnen und die Produktionskapazitäten sowie der Markt für Biokunststoffe wachsen. Dennoch befindet sich die Branche in der Startphase und der Preis stellt einen entscheidenden Parameter für den Erfolg von Biokunststoffen dar. Auch der Anteil von Biokunststoffen am gesamten Kunststoffmarkt ist bisher verschwindend gering.

Auch /Oertel 2007/ geht davon aus, dass das Potenzial von nachwachsenden Rohstoffen zur Nutzung als strukturbestimmendes Matrixpolymer oder als eigenschaftsverändernde Blend- und Füllstoffkomponenten für biopolymertypische Einsatzfelder noch nicht ausgeschöpft ist.

Das technische Substitutionspotenzial von biobasierten Kunststoffen nach /Shen et al. 2009, Wolf et al. 2005/ ist in **Tabelle 5.6** zusammengefasst. Es zeigt sich, dass es petrochemische Kunststoffe wie ABS und PVC gibt, die nur in sehr geringem Umfang durch Biokunststoffe ersetzt werden können. Andere petrochemische Kunststoffe wie PP, HDPE, PET und PA sind im Gegensatz dazu, je nach Studie, zu teilweise über 50 % durch biobasierte Kunststoffe ersetzbar. Stark unterschiedlich schätzen die beiden Studien das Substitutionspotenzial für PP und HDPE ein. Jedoch auch das jeweils geringere Potenzial (siehe /Shen et al. 2009/) liegt noch immer bei 38 %. Bei den Biokunststoffen spielt vor allem PHA eine bedeutende Rolle, da es, mit Ausnahme von PA, alle hier betrachteten petrochemischen Kunststoffe prinzipiell ersetzen könnte. Nach /Shen et al. 2009/ wäre aus technischer Sicht ein deutlich höherer Marktanteil für Biokunststoffe denkbar. Für eine positive Entwicklung ist ein konkurrenzfähiges Preisniveau der Biokunststoffe gegenüber den petrochemischen Kunststoffen notwendig. Darüber hinaus ist neben der Wirtschaftlichkeit eine eventuelle Nutzungskonkurrenz nachwachsender Rohstoffe und landwirtschaftlicher Anbauflächen zu berücksichtigen /Shen et al. 2009/.

**Tabelle 5.6:** Technisches Substitutionspotenzial ausgewählter Biokunststoffe /Shen et al. 2009, Wolf et al. 2005/

Substitution [%]	Biobasierter Kunststoff							
	Stärkepolymere	PLA	Andere Polyester	PHA	Bio-PUR	Bio-PA	Zellulosefolien	Gesamt
LDPE	8 10	0	0	20 20	0	0		28 30
PP	8 10	10 10	20	10 20	0	0	10	38 60
PVC	0	0	0	10 10	0	0	10	10 20
HDPE	8 10	10 10	0	20 30	0	0		38 50
PS	10 8	10 10	0	20 20	0	0	10	40 48
PET	0	20 10	30	10 10	0	0	15	45 50
PUR	10	0	0	10	30	0		50
PA	0	10	30	0	0	30		70
ABS	0	0	0	10	0	0		10

Nach /Wolf et al. 2005/ kann thermoplastische Stärke bei der Herstellung von Reifen herkömmliche Füllstoffe wie Industrieruß ersetzen. Bezogen auf das Gewicht ist eine Substitution von 50 % technisch denkbar. Durch den Einsatz von thermoplastischen Reifenfüllern kann der Rollwiderstand reduziert werden, wodurch ein geringerer Kraftstoffverbrauch als auch entsprechend geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen während der Nutzungsphase der Reifen resultieren (vgl. auch Kapitel 4.3.3). Bei der Nutzung einer 40 %igen Substitution von herkömmlichen Reifenfüllern durch thermoplastische Reifenfüller können insgesamt 9,5 g CO<sub>2</sub>/km eingespart werden /Wolf et al. 2005/.



## Nutzung von Mikroalgen zur Biogas- und Biokraftstoffproduktion

Die Massenkultivierung von Mikroalgen bietet eine zukünftige Alternative zur Biomasseproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen für die energetische Nutzung. Die Mikroalgenbiomasse kann z. B. zur Erzeugung von Biogas oder zur Herstellung von Biodiesel oder Bioethanol genutzt werden. Biologisch gesehen sind Mikroalgen Ein- oder Wenigzeller und es existieren ca. 40.000 beschriebene Süß- bzw. Salzwasser-algenarten. Wissenschaftlich sehr gut erforscht sind die Algenarten *Chlorella vulgaris* und das Cyanobakterium *Spirulina platensis*. Zur Algenproduktion werden Sonnenlicht, CO<sub>2</sub>, Wasser und Nährstoffe benötigt. Nach der Algenernte muss die feuchte Algenbiomasse (Frischmasse) getrocknet und aufbereitet werden (Trockenmasse). Die Rückführung der dabei anfallenden Nährstoffe und des Wassers in den Prozess ist möglich.

Bei der stofflichen Nutzung werden verschiedene Wertstoffe, wie z. B. Vitamine für die Nahrungsmittelindustrie, extrahiert. Die Restmasse bzw. das Algenkonzentrat kann anschließend weiter aufbereitet und bei der Biomasseraffination zur Biogaserzeugung eingesetzt werden /Ackermann 2007, Ripplinger 2008a, 2008b/. Durch die hohe Produktivität von Mikroalgen im Vergleich zu anderen Energiepflanzen sind sie für die Energieproduktion besonders geeignet. Die hohe Produktivität resultiert aus der Tatsache, dass bei Algen alle Zellen gleichmäßig an der Biomasseproduktion beteiligt sind, wohingegen bei Landpflanzen z. B. nur die Blätter Photosynthese betreiben. Durch neue Methoden und Technologien der Biotechnologie, neuen optischen Techniken zur Steuerung des Lichteintrags sowie durch mikrostrukturelle Gestaltung der Reaktoren sind jeweils eine Steigerung der Produktivität um 10 % möglich /Ackermann 2007/. Ein großer Vorteil von Mikroalgen zur Energieerzeugung liegt in ihren spezifischen Eigenschaften. Der Hauptvorteil ist ihre hohe Produktivität, aber auch durch ihren relativ hohen Öl- und Proteingehalt heben sie sich von anderen Pflanzen ab. Eine Übersicht für ausgewählte Pflanzen und deren Eigenschaften im Vergleich zu Mikroalgen ist in **Tabelle 5.7** dargestellt.

**Tabelle 5.7:** Richtwerte zum Biomassertrag, Ölgehalt und möglicher CO<sub>2</sub>-Fixierung für ausgewählte Pflanzen im Vergleich zu Mikroalgen /Griehl et al. 2011/

	Ertrag in Tonnen pro ha*a			Temporäre CO <sub>2</sub> -Fixierung
	Trockensubstanz	Protein	Öl	
Mais	7 -18	0,8 - 2	0,2	
Sojabohne	6 – 7	1,8 – 2,5	0,5	
Raps	3 - 4	0,6 – 1,3	1,2	6,7
Ölpalme	2 - 3	0,2	6	
Miscanthus	15 – 25			56
Mikroalgen	30 - 550	15 – 70	47 – 141	400

Bei der Mikroalgenkultivierung wird zwischen offenen und geschlossenen Anlagen unterschieden. Bei sogenannten offenen Anlagen werden in offenen Becken, auch Raceway oder Ponds genannt, mit einer Tiefe von 10 bis 20 cm eine Suspension aus Algen und Nährlösung mithilfe von Propellern oder Schaufelrädern durchmischt. Diese Art der Algenkultivierung ist weit verbreitet, jedoch ist die Produktivität auf 8 bis 12 g/m<sup>2</sup> pro Tag beschränkt.



Die Kultivierung in geschlossenen Anlagen hat den Vorteil, dass damit ein kontrollierbares Kultivierungssystem vorliegt. Der Wasserbedarf ist in einem geschlossenen System aufgrund von geringeren Verdunstungsverlusten niedriger, es besteht mehr oder weniger keine Abhängigkeit von Wetterschwankungen, wodurch eine kontinuierliche Produktion ermöglicht wird /Ackermann 2007/.

Bei den geschlossenen Systemen kommen vor allem drei unterschiedliche Arten zum Einsatz. Die Folien-, Flachplatten und Röhrenreaktoren, welche sich in Aufbau, Betrieb und Leistung unterscheiden. Die kostengünstigste Variante stellen die Folienreaktoren dar. Dabei werden schlauchförmige Folien V-förmig neben- und hintereinander auf ein Modul aufgehängt. Die Luft- und CO<sub>2</sub>-Versorgung erfolgt über eine Ringleitung. Flachplatten- oder Flat Panel-Airlift (FPA)-Reaktoren sind miteinander verbundene, wenige cm flache Kammern, in der die Algensuspension verteilt ist. Aktuelle FPA-Reaktoren fassen ca. 165 l und werden aus PET hergestellt. Ein statischer Mischer sorgt für eine homogene Durchmischung der Algensuspension. Ein dritter Reaktortyp ist der Röhrenreaktor. Dieser besteht aus Röhren von einigen cm Durchmesser, die mehrere km lang sein können und horizontal oder vertikal angeordnet sind. Ein Nachteil der Röhrenreaktoren ist der relativ große Energieaufwand für die Umwälzung der Biomasse /Ackermann 2007, Lamparter 2010, Ripplinger 2008a, 2008b/.

Bisher werden Mikroalgen zur Energieerzeugung in Deutschland nicht im industriellen Maßstab eingesetzt, es bestehen jedoch zahlreiche Anlagen zu Forschungszwecken. So wird in Bergheim-Niederaussem eine Mikroalgenproduktionsanlage mit Folienreaktoren betrieben, bei der das CO<sub>2</sub> aus einem Kraftwerk verwendet wird /RWE 2008/. Im Rahmen des Netzwerks Technologien zur Erschließung der Ressource Mikroalgen (TERM) werden in Hamburg Technologien zur industriellen Nutzung von Mikroalgen mit Flachbettreaktoren untersucht. Es geht dabei um die technische Optimierung der Lichtnutzung, der Wachstumstemperatur oder des Aufwachsens der Algen an der Reaktoroberfläche, aber auch um wirtschaftliche Aspekte wie die Reduzierung der Anlagenbaukosten oder des Energieeinsatzes für den Algenbetrieb /Bauer 2009, Griehl et al. 2011/. Eine der größten Algenproduktionsanlagen in Europa befindet sich in Klötze, Sachsen-Anhalt, die bereits seit 2002 Algen des Stammes *Chlorella vulgaris* in Röhrenreaktoren erzeugt /Putz 2009/.

## **Tenside**

Hinsichtlich der Produktionsmenge stellen Tenside in der chemischen Industrie die bedeutendste Stoffgruppe dar, welche in relevantem Umfang bereits auf nachwachsenden Rohstoffen basiert. Tenside werden sowohl aus oleochemischen (NaWaRo-Basis) Grundstoffen als auch auf Basis petrochemischer Stoffe hergestellt. Nach /Oertel 2007/ lag der Anteil im Jahr 2007 bei ca. 50 %. Als Rohstoffe für Tenside auf Basis von NaWaRos werden pflanzliche Fette und Öle oder niedermolekulare Kohlenhydrate verwendet. Zu den Vorteilen von auf dieser Basis hergestellten Tensiden und den daraus produzierten Wasch- und Reinigungsmitteln gehört eine relativ schnelle und biologisch vollständige Abbaubarkeit im Abwasser. Darüber hinaus sind sie im Regelfall hautverträglicher als erdölbasierte Produkte.

Nach /Oertel 2007/ werden in Deutschland jährlich ca. 430.000 t pflanzliche Öle verwendet, um daraus Tenside herzustellen. Dabei entfallen ca. 23 % auf die Herstellung von Wasch- und Reinigungsmitteln und ca. 13 % auf andere Tenside wie z. B. Pharmazeutika, Kosmetikprodukte, Textilmittel, etc. Weitere Anwendungsbereiche sind die Kunststoff oder die Lack- und Farbstoffproduktion. Ein erheblicher Anteil der in Deutschland erzeugten Tenside wird exportiert und der Inlandsverbrauch liegt bei ca. 250.000 t im Jahr.

### **Wasserstofferzeugung mit Algen**

Traditionell wird Wasserstoff durch Reformationsverfahren und Elektrolyse hergestellt. So werden bei der Dampfreformation leichte Kohlenwasserstoffe (z. B. Erdgas, Naphtha oder Flüssiggas) zu wasserstoffreichem Synthesegas aufgespalten. Die Wasserstoffproduktion erfolgt dabei in zwei Stufen. Bei Temperaturen von ca. 900 °C werden Kohlenwasserstoffe und Wasserdampf zu Wasserstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid umgewandelt. Im zweiten Schritt reagiert das Kohlenmonoxid mit Wasserdampf zu Kohlendioxid und Wasserstoff. Beim Elektrolyseverfahren wird Wasser durch Zugabe einer Flüssigkeit (Säure oder Base) in einen Elektrolyten umgewandelt. Setzt man den Elektrolyten unter Strom, so zersetzt sich das Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff. Der Wasserstoff sammelt sich an der Anode, der Sauerstoff an der Kathode /IWR 2005, Linde 2010/.

Bei der biotechnologischen Wasserstoffherstellung werden Algen oder Cyanobakterien eingesetzt, die die Fähigkeit besitzen, Protonen und Elektronen aus Wasser zu lösen, diese in den Chloroplasten neu zu kombinieren und dadurch molekularen Wasserstoff zu erzeugen. Bei diesem Prozess werden zwei Stufen durchlaufen. In der ersten Stufe wachsen die Zellen aerob, um ausreichend Biomasse zu produzieren. Im zweiten Prozessschritt wird der Sauerstoff durch ein mit Schwefel angereichertes Medium ersetzt, um einen anaeroben Prozess zu garantieren. Darüber hinaus ist der Schwefel für die Aminosäureproduktion notwendig, welche die Algen für den Ablauf des Prozesses benötigen. Damit die Pflanzen auch unter ungünstigen Lichtbedingungen genügend Photonen absorbieren können, bilden sie große lichtabsorbierende Flächen. Bei hoher Bestrahlung reagieren die Algen dann jedoch, indem sie die eingefangenen Photonen in Lumineszenz oder Wärme umwandeln und nicht weiter in Wasserstoff. Durch regulierbare Lichtintensitäten bei Bioreaktoren kann dieses Problem jedoch gelöst werden. Theoretisch ist bei diesem Prozess ein Wirkungsgrad von 10 bis 16 % möglich. Basierend auf Versuchen lässt sich berechnen, dass ein Bioreaktor mit einer Plattenoberfläche von 1.000 m<sup>2</sup> pro Tag ca. 1,39 kg H<sub>2</sub> (15.568 l unter Normalbedingungen) produzieren kann. Die Ausbeute lässt sich durch eine Erhöhung der Lichtintensität deutlich steigern. So wäre nach /Hankamer et al. 2007/ beim Erreichen der oberen Photonen ausbeute von 10,6 % eine Ausbeute von 82.523 l/Tag denkbar. Beim Aufbau der Biomasse wird CO<sub>2</sub> gebunden und die anfallende Biomasse kann nach dem Prozess zu Biogas weiterverarbeitet werden, welches z. B. in einem BHKW verstromt oder durch Reformierung in weiteren Wasserstoff umgewandelt werden kann. Es wird weiter daran geforscht, die Lichtintensität von 2 auf 10 % erhöhen zu können /Hankamer et al. 2007/.

Nach /Happe et al. 2006/ lässt sich Wasserstoff auch durch die Mikroalgen *Chlamydomonas reinhardtii* erzeugen. Diese wandeln unter normalen Bedingungen mittels Photosynthese Licht in Biomasse. Unter Schwefelmangel kann die Zelle die aus dem Sonnenlicht gebundene Energie nicht mehr vollständig verwerten und wandelt diese in Wasserstoff um. Für diesen Wasserstoffmetabolismus ist das Enzym Hydrogenase verantwortlich. Je nach Stoffwechselfunktion kann dieses sauerstoffempfindliche Enzym Wasserstoff aufnehmen oder abgeben /Happe et al. 2006/. Die Wasserstoffproduktion läuft in zwei Schritten ab. Im ersten Schritt, der Photosynthese, wird Wasser in Sauerstoff und gespaltenen Wasserstoff umgewandelt. Im zweiten Schritt erfolgt mit Hilfe der Hydrogenasen die Wasserstoffbildung aus den im ersten Schritt entstandenen Protonen und Elektronen /Gutthann et al. 2005/. Eine Wasserstoffproduktion in zellulären Systemen kann in einem zweiphasigen Anlagenschema erfolgen, der Wachstums- und der Wasserstoffproduktionsphase. Dabei bietet die Wachstumsphase die Möglichkeit einer Selbstentschwefelung der Algen, in dem zu Beginn nur die für das Wachstum der Algenkultur notwendige Menge an Schwefel eingebracht wird /Happe et al. 2006/.

Um Algen zu kultivieren, können unterschiedliche Reaktorsysteme eingesetzt werden. Aufgrund der hohen Biomassekonzentration und einer hohen photosynthetischen Effizienz stellt der Flachbettreaktor nach /Müllner 2008/ eine vielversprechende Möglichkeit dar. Der Lichteintrag kann durch die Nutzung des natürlichen Tageslichts oder durch künstliche Beleuchtung erfolgen, wobei jedoch der dafür zusätzlich notwendige Energiebedarf berücksichtigt werden muss. Um eine optimale Beleuchtung der Algen im Reaktor zu gewährleisten, ist darüber hinaus eine Umwälzung der Algenkulturen notwendig und es existieren bereits Reaktoren, bei denen durch entsprechende Konstruktion die Umwälzung ohne zusätzlichen Energiebedarf gewährleistet werden kann.

Bei einer energetischen Betrachtung der Wasserstofferzeugung durch Algen stellt der Energiebedarf für die Beleuchtung als auch für die notwendige Umwälzung die größten Aufwendungen dar. Daher ist die Optimierung, sprich die Erhöhung der Wasserstoffproduktionsrate ein wichtiges Ziel, um eine positive Energiebilanz zu erreichen. Die Wasserstoffproduktionsrate der Grünalge liegt bei 5 bis 10 ml<sub>H<sub>2</sub></sub>/(I<sub>Susp.</sub>·h). Langfristig wird davon ausgegangen, dass etwa die 10-fache Produktionsmenge erreicht werden kann. Für eine Energiebilanz kann auch die Verwertung der produzierten Algenbiomasse interessant sein. Der Energieinhalt von Grünalgen beträgt 24 MJ/kg Trockenmasse bei einer 10-fach höheren Biomasseerzeugung als z. B. die Energiepflanze *Miscanthus* /Happe et al. 2006, Subitec 2010/. /Rosner et al. 2010/ nennen als maximale Produktionsrate für die Herstellung von Wasserstoff durch die Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii* 5 ml<sub>H<sub>2</sub></sub>/(I<sub>Susp.</sub>·h) und gehen davon aus, dass diese um den Faktor 100 erhöht werden muss, um konkurrenzfähige Wasserstofferzeugungskosten realisieren zu können. Darüber hinaus vergleichen /Rosner et al. 2010/ ökologische Kennwerte für Bioreaktoren (Labormaßstab) aus Glas und Kunststoff mit dem Ergebnis, dass sich keine signifikanten Unterschiede ergeben, jedoch Kunststoffreaktoren einen deutlich geringeren Preis aufweisen.

Auch andere Wasserstofferzeugungstechnologien (Erdgasreformation, Wind-Elektrolyse, PV-Elektrolyse, Netzstrom-Elektrolyse, Biomasse Vergasung, Bio-/Klärgasre-

formierung) werden hinsichtlich des kumulierten Energiebedarfs, den CO<sub>2</sub>-Emissionen, den Treibhausgasemissionen und weiteren Umweltfaktoren wie Versauerungspotential, Eutrophierungspotenzial und Flächeninanspruchnahme mit einer optimierten photobiologischen Wasserstofferzeugung (Produktionsrate von 200 ml<sub>H<sub>2</sub></sub>/(I<sub>Susp.</sub>\*h)) verglichen. Es kann festgestellt werden, dass unter ökologischen Gesichtspunkten die optimierte photobiologische Wasserstofferzeugung zu anderen regenerativen Erzeugungsverfahren in Wettbewerb treten kann. Im Vergleich zur Erdgasreformation weist die optimierte photobiologische Wasserstofferzeugung, mit Ausnahme der Flächeninanspruchnahme, in allen betrachteten Kategorien Vorteile auf. Beim Vergleich der Wasserstofferzeugungskosten kann die photobiologische Erzeugung unter optimalen Bedingungen mit der Elektrolyse aus Wind konkurrieren und liegt (bei einer sehr großen Bandbreite) im optimalen Fall bei ca. 0,25 €/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>, im Mittel bei über 0,5 €/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> und damit um den Faktor 5 höher als die Dampfreformation /Rosner et al. 2010/.

Der Arbeitskreis „Algenbiotechnologie“ der DECHEMA geht davon aus, dass Algen ein hohes Zukunftspotenzial aufweisen, jedoch muss für eine wirtschaftliche Umsetzung noch weiter geforscht und optimiert werden. Es wird hier die Möglichkeit gesehen, Algen zur Bindung von CO<sub>2</sub> aus industriellen Emissionen zu nutzen. Es geht dabei einerseits um die Produktion von Wertstoffen als auch um eine effektive energetische Nutzung der Algen. Seit 2008 wird eine Pilotanlage zur Kultivierung von Algen unter Verwendung von industriellem CO<sub>2</sub> betrieben. Es kommt dabei ein sog. Flat-Panel-Airlift-Photobioreaktor (FPA-Reaktor) mit einem Volumen von 180 Litern zum Einsatz. Dieser Reaktortyp erlaubt die Aufzucht der Algen in einem geschlossenen Bioreaktor und es kann damit eine optimale Kontrolle des Wachstumsprozesses gewährleistet werden. Phototrophe Algen produzieren dabei Fettsäuren, Proteine, Farbstoffe, Öle und Polysaccharide. Prinzipiell haben entsprechende Bioreaktoren das Problem, das darin Zonen mit unterschiedlicher Lichtintensität entstehen. Wenn in den äußeren Schichten die Lichteinstrahlung hoch ist, stoppen die Algen die Photosynthese und im Inneren verhindern die Algen selbst eine notwendige Versorgung mit Licht. Optimale Lichtbedingungen herrschen daher nur in einer sehr dünnen mittleren Schicht. Um dieses Problem und die damit verbundene geringe Produktivität zu lösen, sind im FPA-Reaktor statische Mischer integriert, die aufsteigende Gasblasen so ablenken, damit sich eine kreisförmige Strömung entwickelt. Auch eine sterile Produktion innerhalb des Reaktors ist möglich, was gerade in der Pharma- und Kosmetikindustrie gefordert wird. Nach der Produktion der Algen werden die entsprechenden hochwertigen Wertstoffe extrahiert und die Algenbiomasse anschließend zur Biogasproduktion verwendet. Das dabei entstehende Biogas wird erneut in den Bioreaktor integriert. Seit Anfang 2010 besteht eine Pilotanlage, die zusätzlich an ein erdgasbetriebenes Blockheizkraftwerk eines Stadtwerkes gekoppelt ist /AP-Biopro 2011/.

### **Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe**

Nach /Oertel 2007/ wird die Möglichkeit einer verstärkten Nutzung nachwachsender Rohstoffe nicht nur vor dem Hintergrund einer zunehmenden Verknappung von fossilen Energieträgern diskutiert. Vielmehr rückt „die Vision einer nachhaltig schadstoffarmen und ressourcenschonenden Versorgung mit Grundchemikalien und daraus hergestellten Produkten verstärkt

ins Blickfeld“. Die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen zeichnet sich durch eine große Vielfalt aus und ist mit einer hohen Komplexität seitens möglicher Bereitstellungspfade verbunden. Als nachwachsende Rohstoffe (NaWaRo) wird Biomasse pflanzlicher oder tierischer Herkunft verstanden, die nicht als Nahrungs- oder Futtermittel, sondern als chemische oder technische Rohstoffe bzw. zur Energiegewinnung genutzt werden. Nachwachsende Rohstoffe stellen, eine nachhaltige Nutzung vorausgesetzt, einen prinzipiell unbegrenzt zur Verfügung stehenden Rohstoff dar, der teilweise auch in Deutschland angebaut werden kann. Somit könnte die Importabhängigkeit von fossilen Energieträgern zukünftig reduziert werden. Wird Biomasse stofflich genutzt, so kommt zusätzlich der Vorteil der Synthesevorleistung der Natur und die biologische Abbaubarkeit dazu /Oertel 2007/. Nachwachsende Rohstoffe werden in der chemischen Industrie durch chemische als auch fermentative Konversion genutzt und es werden z. B. Fein- und Spezialchemikalien, Pharmaprodukte, Struktur- und Funktionspolymere, Polymerhilfsstoffe, Lack- und Textilhilfsstoffe oder Papieradditive und Papierhilfsstoffe hergestellt. Schwerpunktmäßig werden dazu Kohlenhydrate (Stärke, Zucker, Cellulose) sowie Fette und Öle verwendet.

Hinsichtlich der Umweltauswirkungen durch die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen zeigen sich nach /Oertel 2007/ tendenziell Vorteile für nachwachsende Rohstoffe bei den Umweltauswirkungen, beim Aufwand an nicht-erneuerbaren Energien und beim Treibhauseffekt.

### **5.3.2 Nutzung von Mikroorganismen und Enzymen zur gezielten Prozesssteuerung**

Bei der gezielten Nutzung von Mikroorganismen und Enzymen zur Prozesssteuerung werden der Einsatz von Enzymen in Wasch- und Reinigungsmitteln, Einsatzmöglichkeiten in der Textilindustrie, die anerobe industrielle Abwasserbehandlung, der Enzymeinsatz in der Metallreinigung, die Herstellung von Bulk- und Plattformchemikalien sowie die Produktion von Riboflavin, Cephalexin und Acrylamid betrachtet. Weiter können Enzyme in der Bohrlochfertigung, in der Futtermittelindustrie oder in der Leder- Papier- und Zellstoffverarbeitung genutzt werden. Innovative biotechnologische Anwendungen ermöglichen des Weiteren die Methanolherstellung oder die Stromproduktion durch mikrobielle Brennstoffzellen.

#### **Einsatz von Enzymen in Wasch- und Reinigungsmitteln**

Bei Waschmitteln werden schon seit Beginn des 20. Jahrhunderts Enzyme eingesetzt. Zu Beginn wurden diese aus Schlachttieren gewonnen. Seit den 60er Jahren werden sie durch kultivierte Bakterien hergestellt. Bereits im Jahr 1968 enthielten ca. 80 % der Waschmittel Enzyme /Braun et al. 2006/. In den 90er Jahren stieg der Anteil in Deutschland auf ca. 90 %, weltweit waren es 2002 ca. 60 % /Hoppenheidt et al. 2005/. Nach /Perlitz 2007/ werden in Deutschland pro Jahr ca. 630.000 t Waschmittel verbraucht, was ca. 8 kg pro Einwohner entspricht. Bei klassischen Waschmitteln benötigen die eingesetzten Bleichmittel noch Temperaturen von ca. 90 °C, um aktiv zu werden, Im Gegensatz dazu entfalten Waschmittel mit Enzymen bereits bei 50 bis 60 °C ihre optimale Leistung /Perlitz 2007/. Bereits seit 2006 wird



an waschaktiven Enzymen geforscht, die eine optimale Arbeitstemperatur von unter 30 °C ermöglichen sollen /Braun et al. 2006/.

### **Einsatzmöglichkeiten in der Textilbearbeitung**

In der Textilindustrie werden nach /Gaisser et al. 2002/ überwiegend Verfahren angewendet, die auf nasschemischen Prozessen basieren, welche oft mit einem hohen Energie- und Stoffverbrauch sowie dem Einsatz von Chemikalien verbunden sind. Die Textilindustrie in Europa steht durch die asiatische Konkurrenz unter einem starken Wettbewerbsdruck hinsichtlich der Kosten und des Preises. Damit erhöht sich der Bedarf an Rationalisierungsmaßnahmen und ressourcenschonender Entwicklungen. Biotechnologische Prozesse bieten die Möglichkeit, diese Ansprüche zu erfüllen. Beispielsweise wird bei der Aufbereitung von Baumwolle traditionell eine heiße Alkalilösung eingesetzt. Durch den Einsatz von Enzymen bei der Reinigung der Fasern kann nach /Perlitz 2007/ etwa ein Fünftel der Kosten eingespart werden. Gerade im Bereich der technischen Textilien, z. B. bei Dämmstoffen, Verpackungen und Schutzbekleidung, wird ein großes Innovationspotenzial gesehen. Technische Textilien haben einen Anteil von ca. 40 % an der gesamten Textilherstellung. In diesem Bereich werden verstärkt Einsatzmöglichkeiten von Enzymen sowie hohe Wachstumsraten erwartet /Perlitz 2007/.

Nach /Nusser et al. 2007/ können biotechnologische Verfahren in den folgenden Bereichen der Textilindustrie eingesetzt werden:

- Bereitstellung von Faserrohstoffen
- Analytik und Qualitätskontrolle
- Aufbereitung und Veredelung
- Bereitstellung von Prozesshilfsstoffen
- Entwicklung „intelligenter“ Textilien
- Umweltschutz durch biotechnologische End-of-Pipe-Verfahren

Im Hinblick auf die Auswirkungen auf die Energiewirtschaft stellt der Themenbereich der Aufbereitung und Veredelung einen Schwerpunkt dar. Mögliche Anwendungsfälle werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

### **Reinigungsprozesse**

Reinigungsprozesse gehören zur Vorbehandlung von Textilien und sie hängen von den eingesetzten Textilrohstoffen ab.

Unter dem Begriff Carbonisur wird die chemische Entfernung von Pflanzenresten (Vegetabilien) aus Wolle verstanden. Die Verschmutzung der Wolle mit Pflanzenresten ist auf die Schafhaltung bzw. auf Weidebedingungen zurückzuführen. Hauptbestandteile der Verschmutzungen sind klettenförmige Pflanzen, Heu, Stroh und Gräser. Durch Kämmen und Krempeln können einige dieser Verunreinigungen mechanisch entfernt werden. Andere sind jedoch sehr feinfasrig und können bei der Verarbeitung zu Verdickungen im Faden oder zu



Fadenrissen führen. Bei der Carbonisur wird die Wolle mit einem 6 bis 8 % Schwefelsäurebad behandelt, getrocknet und anschließend bei Temperaturen von über 100 °C „gebrannt“. Durch den Flüssigkeitsverlust kommt es zu einer Dehydrierung (Verkohlung) der Cellulose und die Pflanzenreste werden durch Walzen verkleinert und anschließend ausgeklopft. Danach wird die Wolle neutralisiert und gewaschen. Beim biologischen Prozess zur Entfernung von Pflanzenresten wird das Lignin mikrobiell abgebaut. Die dafür zum Einsatz kommenden Mikroorganismen, sogenannte Basidiomyceten, garantieren durch Ihre Lebensweise einen effektiven Abbau des Lignins. Bei diesem Prozess kommt es zur „Weißfäule“, d. h. der Umwandlung von Lignin zu weißgefärbten Cellulosefibrillen /Schuh et al. 2003/. Es kann daher bei der Carbonisur auf den Einsatz der Säure verzichtet werden.

Das Entbasten von Seide hat zum Ziel, den Seidenschleim zu entfernen /Ring 2010/. Beim biotechnologischen Verfahren, dem enzymatischen Entbasten von Seide wird die Ware bei 55 bis 65 °C 30 bis 60 min. in einer Enzymlösung mit alkalischen Proteasen leicht bewegt. Bei Seide stellt das enzymatische Verfahren bereits den Stand der Technik dar, da es im Vergleich zum konventionellen Verfahren, bei dem die Seide in heißer Lauge abgekocht wird, eine geringere Abwasserbelastung und durch mildere Reaktionsbedingungen einen geringeren Energieverbrauch aufweist /Gaisser et al. 2002, Ring 2010/.

Unter „Scouring“ wird das Abkochen von Baumwolle verstanden. Dieser Prozessschritt bei der Bearbeitung von Baumwolle weist den größten Energie- und Wasserbedarf auf. Scouring bezeichnet dabei das Entfernen von Faserbegleitstoffen wie z. B. Zellwandresten aus Fetten, Wachsen, Pektinen oder Proteinen. Für diesen Vorgang sind hohe Temperaturen und stark alkalische Bedingungen notwendig /Gaisser et al. 2002/. Das konventionelle Scouring erfolgt in drei Schritten. In der ersten Phase wird die Baumwolle bei 100 °C ca. 40 min. abgekocht. Die sich dadurch ablösenden Faserbegleitstoffe werden in zwei darauffolgenden Spülvorgängen herausgelöst und entfernt. Dabei erfolgen der erste Spülgang bei Temperaturen von 95 °C (10 min.) und der zweite Spülgang bei 50 °C (20 min.) Der Strombedarf dieser drei Prozessschritte liegt nach einer Lebenszyklusanalyse („von der Wiege bis zur Bahre“) bei 300 kWh/t abgekochter Baumwolle (Trockengewicht) /Nielsen et al. 2009/. Eine Alternative zur herkömmlichen Entfernung dieser Fremd- und Begleitstoffe stellt das „Bioscouring“, ein enzymatisches Verfahren mit Pektinasen, welches bei milderen Reaktionsbedingungen abläuft, dar (Gaisser et al. 2002). Dieses erfolgt im Vergleich zum konventionellen Scouring in einem Prozessschritt. Dabei wird die Baumwolle 60 min. bei 60 °C behandelt. Der Strombedarf dieses Verfahrens ist bei einer Lebenszyklusbetrachtung um 50 % im Vergleich zum konventionellen Scouring geringer und beträgt 150 kWh/t abgekochter Baumwolle (Trockengewicht) /Nielsen et al. 2009/.

Bei der Herstellung von Geweben aus Fasern werden die Fäden in Webrichtung großen Zugspannungen ausgesetzt. Um Fadenrisse und damit Produktionsunterbrechungen zu vermeiden, werden die Fäden mit einer stärkenden Hülle, der Schlichte, umgeben, die später wieder entfernt werden muss, da diese Chemikalien einerseits im Endprodukt nicht erlaubt sind und andererseits das Färben der Fäden gestört wird. Je nach eingesetzter Schlichte werden unterschiedliche Verfahren verwendet. Werden Stärkeschichten benutzt, so kann ein enzymatisches Verfahren zum Entschlichten zum Einsatz kommen. Bei wasserlöslichen

Schlichten kann das Gewebe gewaschen und für alle eingesetzten Schlichten kann ein oxidatives Entschlichtungsverfahren eingesetzt werden. Das biotechnologische Verfahren zum Entschlichten entspricht bereits dem Stand der Technik /Schönberger et al. 2003/. Nach /Braun et al. 2006/ wird dieses Verfahren zu über 80 % in der europäischen Textilindustrie zum Entschlichten eingesetzt. Dabei werden nicht wasserlösliche Stärken oder Stärkederivate durch den Einsatz von Enzymen (Amylasen) katalysiert. Nach /Schönberger et al. 2003/ lässt sich das enzymatische Entschlichten mit anderen auf Enzymen basierenden Verfahrensschritten wie z. B. dem enzymatischen Abkochen oder Bleichen verbinden. Interessant ist dabei ein Ansatz, bei dem die Stärke beim Entschlichten abgebaut und in Gluconsäure und in Wasserstoffperoxid zum Bleichen umgesetzt wird.

### **Entfernung von Bleichmittelresten**

Baumwollfasern enthalten Baumwollfette und -wachse, Ligninreste, Proteine, Pektine und Mineralstoffe. Je nach Herkunftsgebiet liegt die Eigenfarbe der Baumwolle zwischen weiß, gelb oder braun. Das Ziel bei der Verarbeitung von Baumwolle ist jedoch eine einheitliche weiße Farbe und daher müssen vor allem andersfarbige Baumwollen in einer Vorbehandlung gebleicht werden, um auch Ligninreste, welche ebenfalls Färbungen verursachen, zu entfernen. Neben auftretenden Faserschäden ist eine nachgeschaltete Entfernung der Bleichmittelreste notwendig, um die Qualität der weiter folgenden Behandlungsschritte wie Färben zu garantieren. Nach /BMBF 2007/ und /Nielsen et al. 2009/ erfolgt der zur Vorbereitung von Textilien zur anschließenden Färbung notwendige Prozess der Bleichung überwiegend mit Wasserstoffperoxid. Um die Qualität der nachfolgenden Behandlungsschritte wie dem Färben zu gewährleisten, muss die Bleiche wieder vollständig aus dem Textilmaterial entfernt werden. Dies erfolgt beim konventionellen Verfahren durch mehrmalige Waschvorgänge bei 80 bis 95 °C. Darüber hinaus werden weitere Chemikalien zugegeben, um die vollständige Entfernung des Bleichmittels zu gewährleisten.

Als alternatives Verfahren kann die enzymatische Entfernung der Bleichmittelreste mit Katalasen und Peroxidasen angesehen werden /Gaisser et al. 2002/. Die Entfernung des Wasserstoffperoxids mit dem Enzym Katalase erfolgt im Gegensatz zur konventionellen Entfernung bei geringeren Temperaturen und einer kürzeren Prozessdauer. Dadurch kann eine Reduktion der eingesetzten Menge an Kühl- und Prozesswasser sowie an Prozessenergie realisiert werden /BMBF 2007/.

Im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse vergleicht /Nielsen et al. 2009/ das herkömmliche mit dem konventionellen Verfahren zur Entfernung von Bleichmittelresten. Dabei erfolgt der herkömmliche Prozess zur Entfernung von Bleichmittelresten für eine helle Färbung der Baumwolle in einem heißen und zwei kalten Spülgängen. Der heiße Spülgang wird bei Temperaturen von 65 bis 80 °C für eine Dauer von ca. 10 min. durchgeführt. An diesen schließen sich zwei ca. 5-minütige kalte Spülgänge an. Im dritten Spülgang wird zur pH-Neutralisierung Säureacetat hinzugefügt und die Färbung der Baumwolle erfolgt dann im Anschluss in einem neuen Bad.

Im Gegensatz dazu erfolgt die enzymatische Entfernung der Bleichmittelreste in einem kalten Spülvorgang (10 min.) und einer anschließenden Entfernung des Wasserstoffper-

oxids. Die enzymatische Entfernung des Wasserstoffperoxids benötigt 25 Minuten und erlaubt eine Weiterverwendung des Bades für die nachfolgende Färbung. Im Vergleich zum herkömmlichen Verfahren kann dadurch eine Stromeinsparung von 33 kWh/t entbleichter Baumwolle (Trockengewicht) erzielt werden. Die enzymatische Entfernung von Bleichmittelresten unter Einsatz von Katalase und Peroxidasen hat nach /Gaisser et al. 2002/ und /Nusser et al. 2007/ die Praxisreife erlangt und wird in der industriellen Textilarbeit eingesetzt. In 2010 wurden nach /DESTATIS 2011/ knapp 333.000 t Baumwolle importiert. Geht man davon aus, dass ca. 40 % davon gereinigt werden müssen und dabei ausschließlich der biotechnologische Reinigungsprozess zum Einsatz kommt, so können dadurch ca. 15,8 PJ eingespart werden. In Bezug zum Energieverbrauch der Industrie im Jahr 2005 entspricht dies 0,65 % und führt zu CO<sub>2</sub>-Einsparungen in der Größenordnung von ca. 2,7 Mio. t.

### **Erzeugung des „Stone-washed“ Effekts**

Eine weitere Anwendung stellt das Bio-Stoning dar. Beim traditionellen Verfahren werden Bimssteine eingesetzt, um den Farbstoff bei Jeansstoff teilweise zu entfernen. In Europa werden jährlich ca. 70 Mio. Jeans verkauft. Nach /Braun et al. 2006/ werden aus Kostengründen in der industriellen Praxis eine Kombination aus traditionellem und biotechnologischem Herstellungsverfahren eingesetzt. Pro Jeans kommen beim traditionellen Verfahren ca. 600 g Bimssteinmaterial zum Einsatz, welches anschließend als Abfall entsorgt werden muss. Dabei wird der Stoff so lange in Waschmaschinen mit Bimssteinmaterial behandelt, bis die äußerste Schicht des Garns zum Teil abgetragen und der ungefärbte Teil sichtbar wird. Neben der entstehenden Abfallmenge ist dieses Verfahren wasser- und energieintensiv /BMBF 2008/. Darüber hinaus kann es durch die Steine zur starken Beanspruchung des Jeansmaterials kommen.

Der Einsatz des Enzyms Cellulase stellt einen alternativen Herstellungsprozess dar. Dabei bewirken die Enzyme einen Abbau der Zelluloseketten der Baumwollfaser und erzeugen einen Riss in der Faser, an dem die Färbung durch die Mechanik der Maschinen abgetragen werden kann. Durch dieses Verfahren kann sowohl der Energie- als auch der Wasserverbrauch reduziert werden /BMBF 2008/.

Eine Lebenszyklusanalyse (siehe /OECD 1998/), welche die Gewinnung des Bimssteins, die Produktion der Cellulasen, den Transport als auch die Prozesse umfasst, kommt zu dem Ergebnis, dass beim Einsatz eines kombinierten Verfahrens eine Energieeinsparung von 30 % und beim Verfahren, welches nur mit Cellulasen durchgeführt wird, eine Energieeinsparung von 40 % ermöglicht wird. Nach /DBU 2004/ ist es durch den Einsatz von Enzymen möglich, das gleiche Ergebnis zu erhalten und gleichzeitig die Kosten für Wasser, Luft und Abfall um 54 % zu senken. Schadstoffe im Abwasser können zu 97 % und Luftschadstoffe zu 86 % reduziert werden. Nach /Gaisser et al. 2002/ wird das enzymatische Verfahren als Kombination teilweise eingesetzt und es wird an Enzym-Mix-Präparaten geforscht, welche die Verfahrensschritte Entschlichtung und Biostoning in einem kombinierten Verfahrensschritt ermöglichen.

Nach /Braun et al. 2006/ beläuft sich der Weltmarkt für Enzyme in der Textilindustrie auf ca. 125 Mio. € bei einer jährlichen erwarteten Wachstumsrate von 3 %.

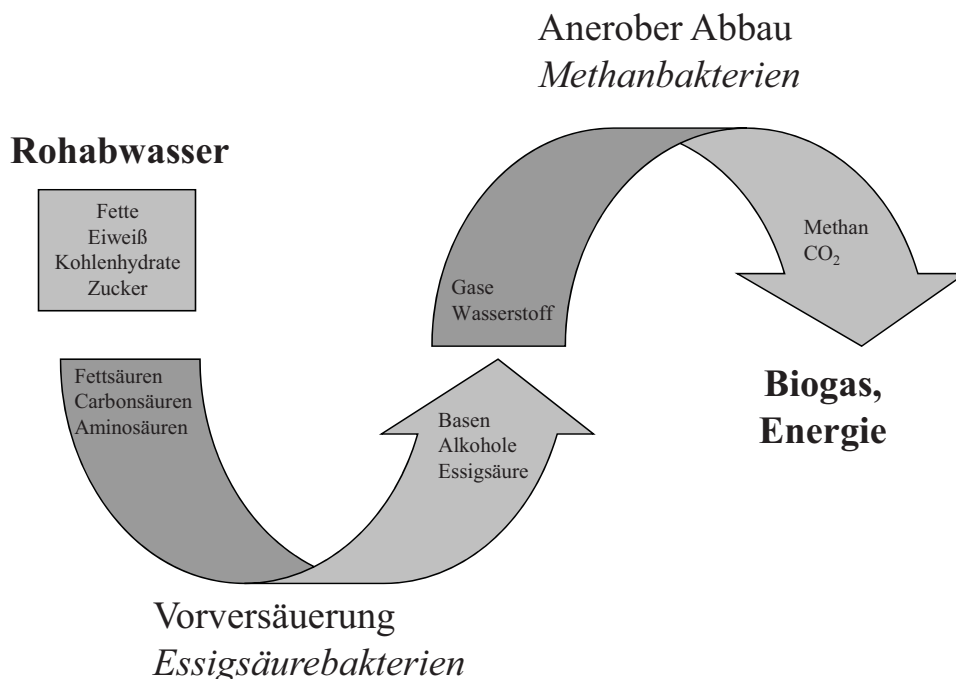
### **Anaerobe industrielle Abwasserbehandlung**

In der Industrie verfügen einige Unternehmen, die Abwässer mit einer sehr hohen Schmutzfracht produzieren, über eigene industrielle Abwasserbehandlungsanlagen. Traditionell besteht eine Kläranlage aus drei Stufen. Der mechanischen Reinigung der Abwässer, der biologischen Reinigung, wobei die verbliebenen Schadstoffe durch Mikroorganismen abgebaut werden und der chemischen Reinigung, die meist durch Oxidations- oder Fällungsreaktionen durchgeführt wird. Dabei ist der bisherige Stand der Technik eine aerobe Abwasserreinigung. Das heißt die anfallenden Klärstoffe werden von Mikroorganismen verarbeitet, die zur Umwandlung Sauerstoff benötigen. Um die Versorgung mit Sauerstoff zu gewährleisten, ist eine ständige Durchmischung des Belebungsbeckens notwendig. Ein neuer Ansatz der Abwasserbehandlung setzt einen anaeroben Bakterienstamm ein. Da diese Mikroorganismen keinen Sauerstoff zur Umsetzung der Klärstoffe benötigen, kann die aufwändige Umwälzung des Belebungsbeckens entfallen. Die Mikrobenstämme sind auf Pellets immobilisiert, welche durch das zulaufende Abwasser in der Schwebelage gehalten werden. Für den anaeroben Abbau werden hydrolysierende, versäuernde und methanogene Bakterien eingesetzt. Dabei verläuft der Prozess nach den folgenden Schritten (vgl. auch **Abbildung 5.3**):

- Bei der Hydrolyse werden unlösliche Substanzen in wasserlösliche Substanzen hydrolytisch aufgespalten.
- Im Rahmen der Versäuerung werden größere Moleküle in organische Säuren, Alkohole, Wasserstoff und CO<sub>2</sub> umgesetzt.
- In der acetogenen Phase werden die organischen Säuren zu Essigsäure, Wasserstoff und CO<sub>2</sub> umgewandelt.
- In der abschließenden methanogenen Phase werden Essigsäure und kohlenstoffhaltige Substanzen zu Methan und CO<sub>2</sub> umgesetzt.

Hauptprodukt des anaeroben Klärprozesses ist dabei Methan /Rossmath 2009/. Eine Umstellung der Abwasserreinigung auf einen anaeroben Abbau hat neben der Reduktion der Aufwendungen zur Belüftung des Belebungsbeckens den Vorteil, dass einige Stoffe wie z. B. Perchlorethylen oder Nitroaromate abgebaut werden können, die bei einer aeroben Umsetzung durch eine zusätzliche chemische Nachreinigung entfernt werden müssen. Darüber hinaus werden kohlenstoffhaltige Klärstoffe anstatt zu CO<sub>2</sub> zu 95 % in Methan umgesetzt, welches z. B. in einem BHKW zur Energie- und Wärmeversorgung eingesetzt werden kann. Zusätzlich kann die anfallende Menge an Klärschlamm signifikant reduziert werden.

Nach /dena 2008/ sinken die Betriebskosten des betrachteten Klärwerks einerseits durch die Stromeinsparung von ca. 70 % sowie andererseits durch die Reduktion an notwendigen Chemikalien. Die Investition ermöglicht, unter Beachtung der Erlöse aus Strom- und Wärmegutschriften, eine Kapitalrendite von über 30 %. /Austermann-Haun 2008/ schätzt, dass in Deutschland ca. 10 % der industriellen Kläranlagen auf die Anaerobtechnik umgestellt sind.



**Abbildung 5.3:** Prozessablauf der Umwandlung von Rohabwasser in Biogas /Rossmait 2009/

### Enzymeinsatz in der Metallreinigung

Die Entfettung von metallischen Teilen stellt in der metallverarbeitenden Industrie einen wichtigen Prozessschritt dar, welcher überwiegend durch den Einsatz von lösemittelhaltigen Kaltreinigern durchgeführt wird. Die eingesetzten Reiniger sind oft gesundheitsschädlich und enthalten umweltgefährdende flüchtige organische Verbindungen (VOC). Die Verunreinigungen bestehen in der Regel aus Ölen und Fetten, die aus organischen Ölen oder mineralischen Kohlenwasserstoffverbindungen bestehen. Die organischen Öle bestehen chemisch gesehen aus Fettsäuretriglyceride. Als alternative Möglichkeit der Entfettung und damit dem Ersatz von lösemittelhaltigen Reinigern kann eine biologische Entfettung auf Basis von Mikroorganismen angewendet werden. Dadurch können einerseits die ansonsten eingesetzten Reiniger ersetzt werden und darüber hinaus ergibt sich durch den Einsatz der Mikroorganismen eine längere Standzeit des Arbeitsmittels bei konstanter Reinigungsleistung.

Bei der biologischen Entfettung werden die Öle und Fette durch Tenside vom Metall gelöst und anschließend durch Mikroorganismen abgebaut. Dabei dienen die Tenside als Lösungsvermittler und sie erhöhen die Bioverfügbarkeit der Verunreinigungen für die Mikroorganismen. Der Reinigungsprozess wird bei einer Temperatur des biologischen Reinigungsmediums von ca. 40 °C durchgeführt. Da keine lösungsmittelhaltigen Substanzen eingesetzt werden müssen und die Verunreinigungen ökologisch abgebaut werden, unterliegt dieser Prozess nicht dem Bundesimmissionsschutzgesetz, da die Entfernung von Lösemitteldämpfen entfällt. Auch die Entsorgung der Restflüssigkeiten kann durch Einleitung in die örtliche Kanalisation, unter Beachtung der örtlichen behördlichen Einleitungsbestimmungen, erfolgen /BIC 2009a, 2009b/.



## Herstellung von Bulkchemikalien

Bereits im Jahr 2006 werden umfassende Untersuchungen im Rahmen des BREW Projektes<sup>54</sup> (siehe /BREW 2006/) zu den biotechnologischen Möglichkeiten durchgeführt, Bulkchemikalien herzustellen. Es werden unterschiedliche biotechnologische und petrochemische Herstellungsverfahren nach einem im Rahmen des Projektes entwickelten Ansatz untersucht und bewertet. Dabei wird als funktionelle Einheit eine Tonne der organischen Chemikalien verwendet. Die biotechnologischen Verfahren werden dabei gemäß einem aktuellen und einem erwartenden technischen Stand mit dem aktuellen technischen Stand der petrochemischen Herstellungsverfahren verglichen. Für ausgewählte petrochemische Produkte und ihre biotechnologischen Substitutionsprodukte sind die Ergebnisse in **Abbildung 5.8** bis **Abbildung 5.7** zusammengefasst. Eine detaillierte Untersuchung wird für die in **Tabelle 5.8** dargestellten petrochemischen Produkte und ihre biotechnologischen Substitutionsprodukte durchgeführt.

**Tabelle 5.8:** Ausgewählte petrochemische Produkte und ihre biotechnologischen Substitutionsprodukte

Petrochemisches Produkt	Biotechnologisches Produkt
Adipinsäure	Adipinsäure
Butanol	Butanol (ABE-Prozess)
Malelinsäureanhydrid	Bernsteinsäure
Ethylacetat	Ethyllactat

Zur Herstellung von Adipinsäure vergleicht /BREW 2006/ drei biotechnologische Prozesse. Der erste Prozess (Bio 1) stellt ein Verfahren nach heutigem Stand der Technik und die zwei weiteren Verfahren (Bio 2 und 3) stellen einen zukünftige Verfahren zu Herstellung von Adipinsäure dar. Hinsichtlich des Energieverbrauchs sind bei der Herstellung von Adipinsäure nur bei einem biotechnologischen Prozess auf Basis von Stärke bzw. Lignocellulose Gesamtenergieeinsparungen im Vergleich zur petrochemischen Herstellung möglich. Biotechnologische Verfahren auf Basis von Zuckerrohr führen nur beim nichtenergetischen Energieverbrauch zu Einsparungen (vgl. **Abbildung 5.4**). Der Vergleich der Treibhausgasemissionen („von der Wiege bis zur Bahre“) der Herstellungsverfahren von Adipinsäure (vgl. **Abbildung 5.5**) spiegelt ebenfalls das Bild beim Vergleich des Energieverbrauchs wider. Nicht alle biotechnologischen Herstellungsverfahren weisen dabei Vorteile gegenüber den petrochemischen Vergleichsprozessen auf und die Unterschiede bei den biotechnologischen Verfahren sind teilweise beträchtlich.

<sup>54</sup> Medium and Long-term Opportunities and Risks of the Biotechnological Production of Bulk Chemicals from Renewable Resources - The Potential of White Biotechnology



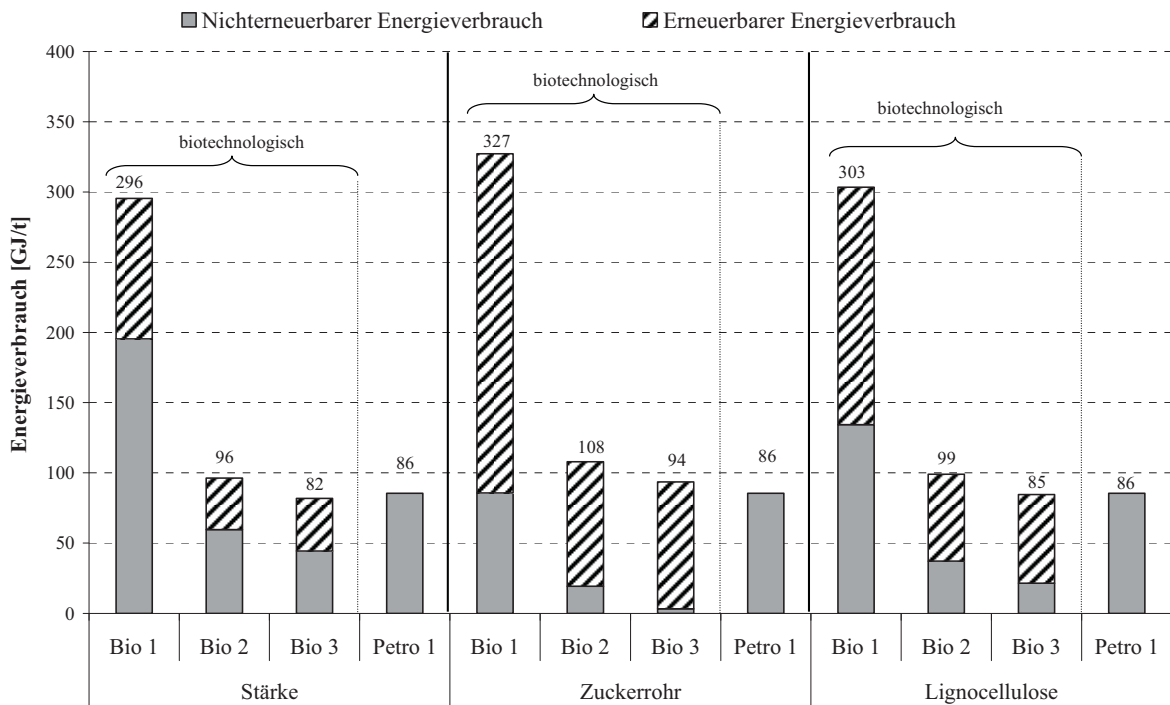


Abbildung 5.4: Energieverbrauch für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Adipinsäure /BREW 2006/

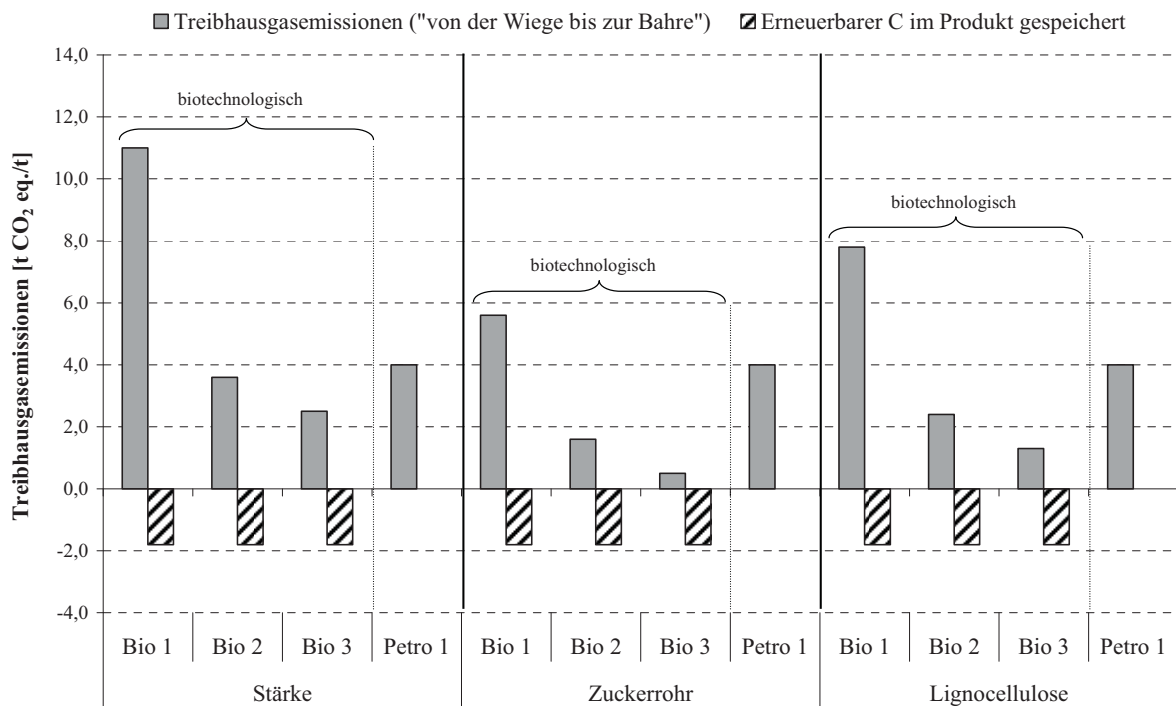


Abbildung 5.5: Treibhausgasemissionen für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Adipinsäure /BREW 2006/

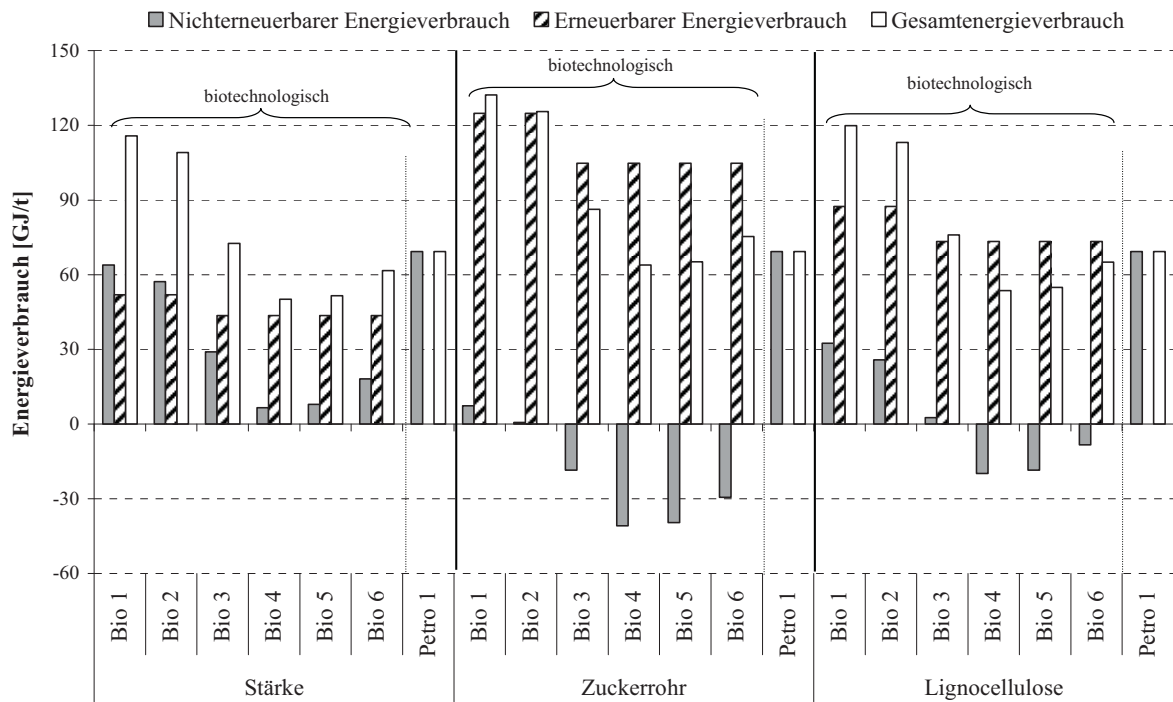
Eine weitere Bulkchemikalie, deren Herstellungsprozesse im Rahmen des BREW-Projektes untersucht wird, ist Butanol. Als biotechnologisches Herstellungsverfahren wird der sog. ABE-Prozess bzw. ABE-Fermentation verwendet. Dieser ist nach den dabei entstehenden Produkten Aceton, Butanol und Ethanol benannt. Der Prozess wird bereits in der ers-

ten Hälfte des 20. Jahrhunderts in großtechnischem Maßstab eingesetzt, jedoch in den 1980ern eingestellt, da die petrochemische Produktion auf Basis von Erdöl kostengünstiger durchgeführt werden konnte. Bereits damals wurde der ABE-Prozess vor allem mithilfe des Bakteriums *Clostridium acetobutylicum* durchgeführt /BREW 2006/. Nach /Bettien et al. 2008/ zeichnet sich jedoch ein zunehmendes internationales Interesse der Industrie zur Weiterentwicklung der ABE-Fermentation ab. Neue Forschungsergebnisse zeigen, dass es möglich ist, die Produktpalette der ABE-Fermentation auf die Seite des Butanols zu verschieben (siehe /Dürre 2007/ in /Bettien et al. 2008/). Auch nach /Goho 2008/ wird daran geforscht, das Verfahren mithilfe anderer Bakterienstämme wirtschaftlicher umzusetzen.

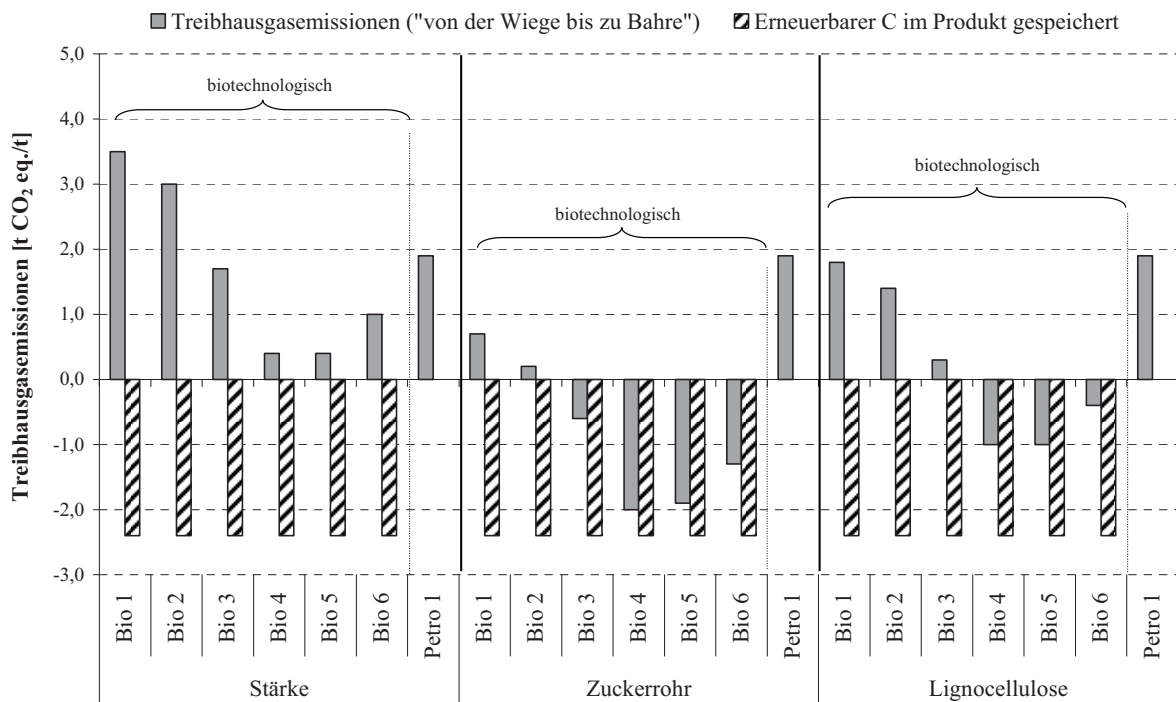
Der Prozess unter Einsatz des Bakteriums *Clostridium acetobutylicum* erfolgt in zwei Stufen. Während des exponentiellen Bakterienwachstums, der Acidogenese, werden Acetate, Carbonsäureester, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid gebildet. In der zweiten Phase, der Solventogenese, werden aus den Ausgangsstoffen der ersten Phase Aceton, Butanol und Ethanol gebildet. Um den Prozess zu verbessern, zielen Forschungen im Bereich des Metabolic Engineering darauf ab, eine höhere Produktivität, eine höhere Konzentration im Fermenter sowie eine bessere Ausnutzung der Rohstoffe zu erreichen. Darüber hinaus ist ein Ziel, die Bandbreite der verwendbaren Rohstoffe zu erhöhen und eine selektiv steuerbare Produktion der einzelnen Chemikalien zu erreichen /Lee et al. 2008/.

Bei der Betrachtung von biotechnologischen und petrochemischen Verfahren zur Herstellung von Butanol zeigt sich, dass bei allen eingesetzten Rohstoffen mindestens zwei biotechnologische Prozesse einen geringeren Gesamtenergieverbrauch aufweisen, als der petrochemische Vergleichsprozess (vgl. **Abbildung 5.6**). Doch auch hier ist eine große Bandbreite bei den biotechnologischen Herstellungsprozessen erkennbar. Beim Vergleich der Treibhausgasemissionen für die Herstellung von Butanol zeigt sich, dass die Treibhausgasemissionen („von der Wiege bis zur Bahre“) nur bei der Verwendung von Stärke als Rohstoffbasis für einige biotechnologische Verfahren höher ausfallen, als für den petrochemischen Vergleichsprozess. Bei der Verwendung von Zuckerrohr oder Lignocellulose weisen alle biotechnologischen Herstellungsverfahren geringere Emissionen auf (vgl. **Abbildung 5.7**).

Abschließend zeigen die Ergebnisse der LCA hinsichtlich des Gesamtenergieverbrauchs für die betrachteten Bulkchemikalien, dass bei den biotechnologischen Herstellungsverfahren sehr große Unterschiede auftreten. So gibt es biotechnologische Verfahren, die einen deutlich größeren Gesamtenergieverbrauch aufweisen, als der bzw. die petrochemischen Vergleichsprozesse. Ein ähnliches Bild ergibt sich auch für die Betrachtung der Treibhausgasemissionen („von der Wiege bis zur Bahre“).



**Abbildung 5.6:** Energieverbrauch für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Butanol /BREW 2006/



**Abbildung 5.7:** Treibhausgasemissionen für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Butanol /BREW 2006/

Bernsteinsäure wird nur in geringen Mengen petrochemisch hergestellt. Für Europa nennt /BREW 2006/ eine jährliche Produktionsmenge von 16.000 t. Daher ist das Marktpotenzial für eine direkte Substitution der petrochemisch hergestellten Bernsteinsäure durch ein biotechnologisches Herstellungsverfahren eher gering. Die Bedeutung der Bernsteinsäure,

wie auch von Ethyllactat, liegt in ihrem Potenzial, andere petrochemische Produkte zu ersetzen (indirekte Substitution) oder wie im Falle der Bernsteinsäure als Zwischenprodukt für die Herstellung von 1,4 Butandiol, Tetrahydrofuran oder auch Polyester Verwendung zu finden. Daher wird Bernsteinsäure als Ersatz für Malelinsäureanhydrid eingesetzt, da damit hauptsächlich die oben genannten Produkte hergestellt werden. Gewöhnlich wird Bernsteinsäure durch katalytische Hydrierung von petrochemischen Derivaten wie Maleinsäure produziert. Fermentativ kann Bernsteinsäure in einer gemischt-sauren Fermentation aus Kohlenhydraten hergestellt werden. Organismen, die zur Herstellung von Bernsteinsäure eingesetzt werden können, sind z. B. *Aerobiospirillum succiniproducens* und *Actinobacillus succinogenes*. Eine vielversprechende Möglichkeit stellt auch *Escherichia coli* (E-coli) dar, da hier nicht nur ein Herstellungspfad zur Herstellung von Bernsteinsäure verwendet wird, sondern insgesamt sechs biosynthetische Pfade. Um wirtschaftlich wettbewerbsfähig zu sein, müssen nach Aussage der Autoren der Studie jedoch die Herstellungskosten deutlich reduziert werden. Um dies zu erreichen, müssen die Produktivität und Ausbeute erhöht, ein günstiges Fermentationssubstrat entwickelt, der benötigte Neutralisationsprozess optimiert und das Herstellungsverfahren in eine großtechnische Anlage überführt werden /BREW 2006/. Nach /Grimm et al. 2011/ ging Anfang 2010 eine erste biotechnologische Produktionsanlage für Bernsteinsäure in Betrieb, die auf Basis von optimierten E-coli Stämmen fermentativ Bernsteinsäure mit einer jährlichen Kapazität von 2.000 Tonnen herstellt. Die Inbetriebnahme von weiteren Anlagen war für 2012 geplant.

**Abbildung 5.8** vergleicht den Energieverbrauch zur Herstellung von Bernsteinsäure für unterschiedliche Herstellungsverfahren. Es zeigt sich, dass durch biotechnologische Verfahren in fünf von sechs im Rahmen der Lebenszyklusanalyse (LCA) untersuchten Herstellungsprozessen eine Energieeinsparung realisiert wird.

Neben dem Energieverbrauch stellt **Abbildung 5.9** die Treibhausgasemissionen der unterschiedlichen Herstellungsprozesse gegenüber. Hier ergibt sich ein ähnlich positives Bild wie beim Gesamtenergieverbrauch. Die gesamten Treibhausgasemissionen („von der Wiege bis zur Bahre“) der biotechnologischen Verfahren fallen durchweg geringer aus als bei den petrochemischen Vergleichsprozessen. Die negativen Werte entsprechen Gutschriften, für den in der Pflanze gespeicherten Kohlenstoff.

Zur biotechnologischen Herstellung von Ethyllactat (biotechnologisch) zur Substitution von Ethylacetat (petrochemisch) werden die durch Pervaporation<sup>55</sup> unterstützte Veresterung von Lactidsäure auf einem Dextrosubstrat oder die Prozessfolge der Fermentation zu Lactidsäure, der Konversion zu Lactid und der Konversion zu Ethyllactat mit Bioethanol genannt /BREW 2006/.

---

<sup>55</sup> Technisches Membranverfahren zur Reinigung von Flüssigkeitsgemischen

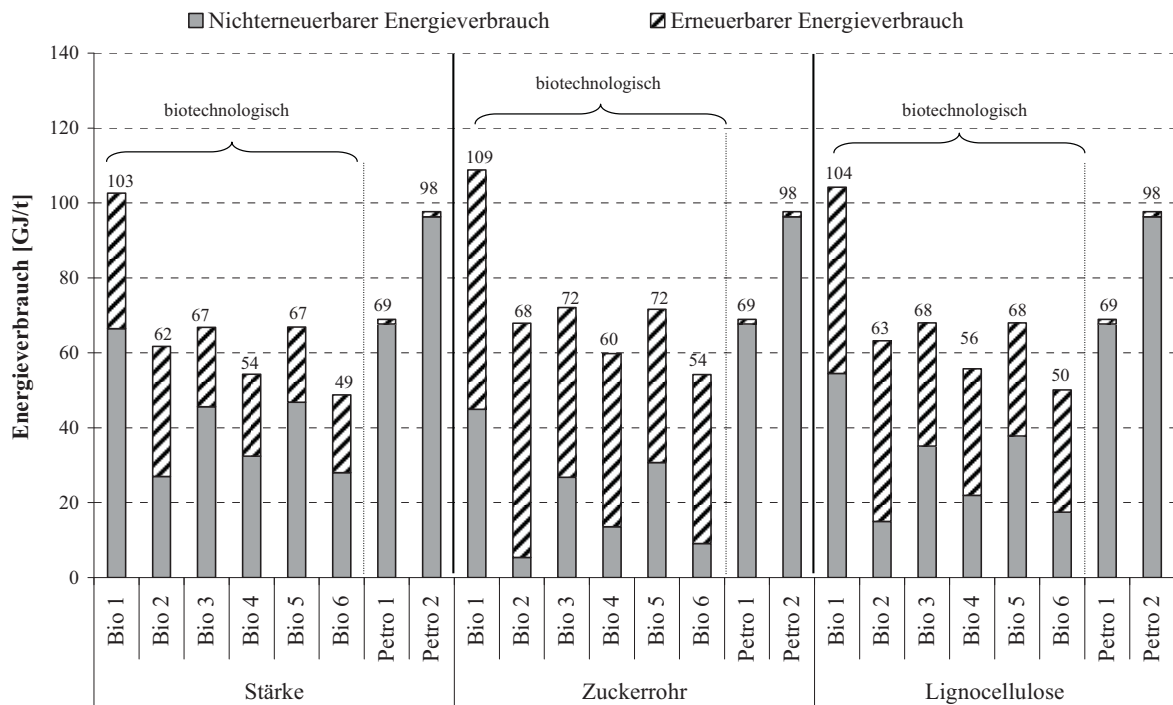


Abbildung 5.8: Energieverbrauch für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Maleinsäureanhydrid (petrochemisch) / Bernsteinsäure (biotechnologisch) / BREW 2006/

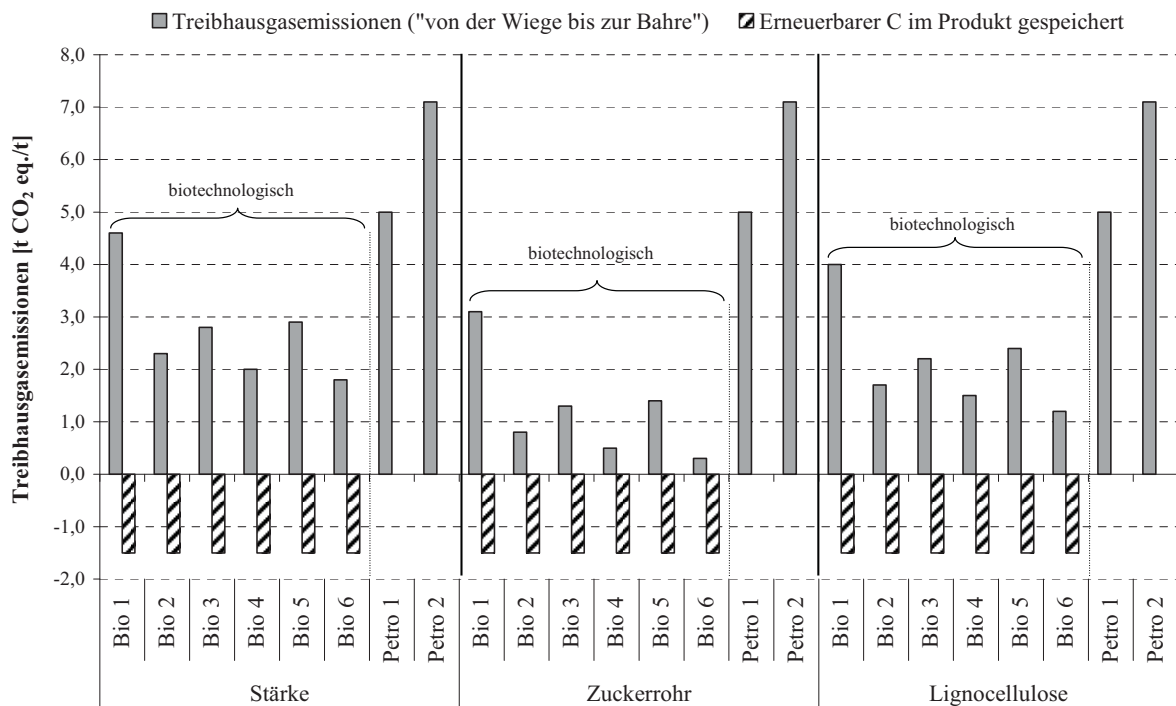
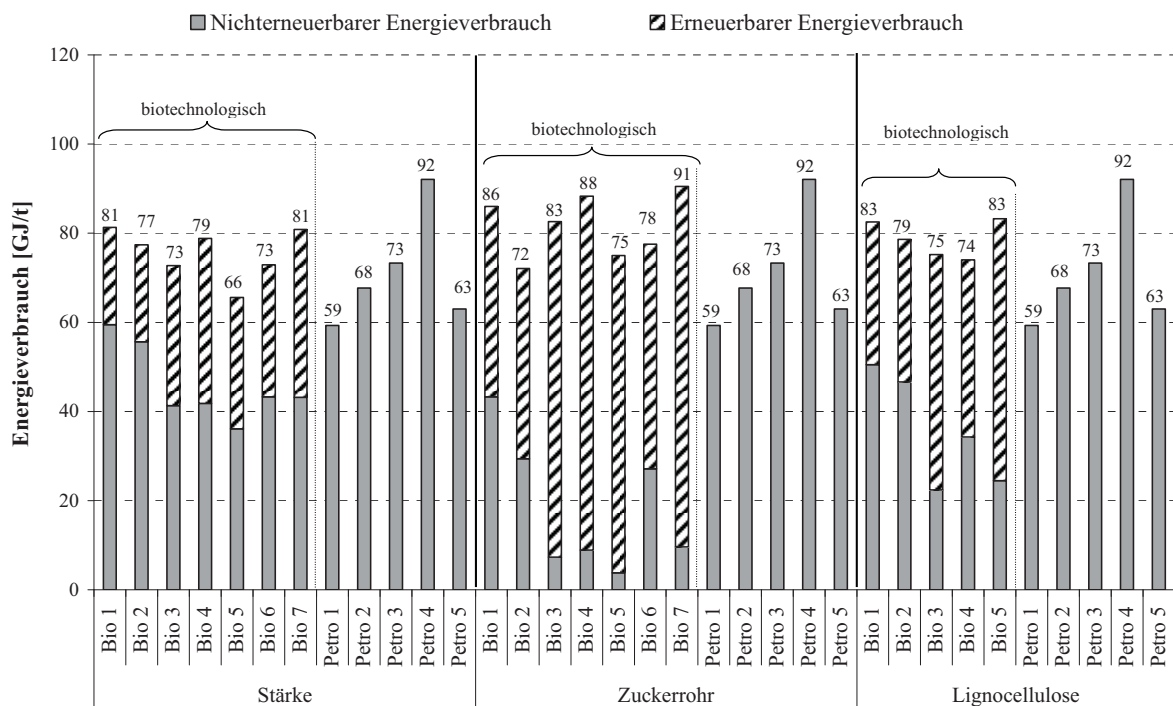


Abbildung 5.9: Treibhausgasemissionen für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Maleinsäureanhydrid (petrochemisch) / Bernsteinsäure (biotechnologisch) / BREW 2006/

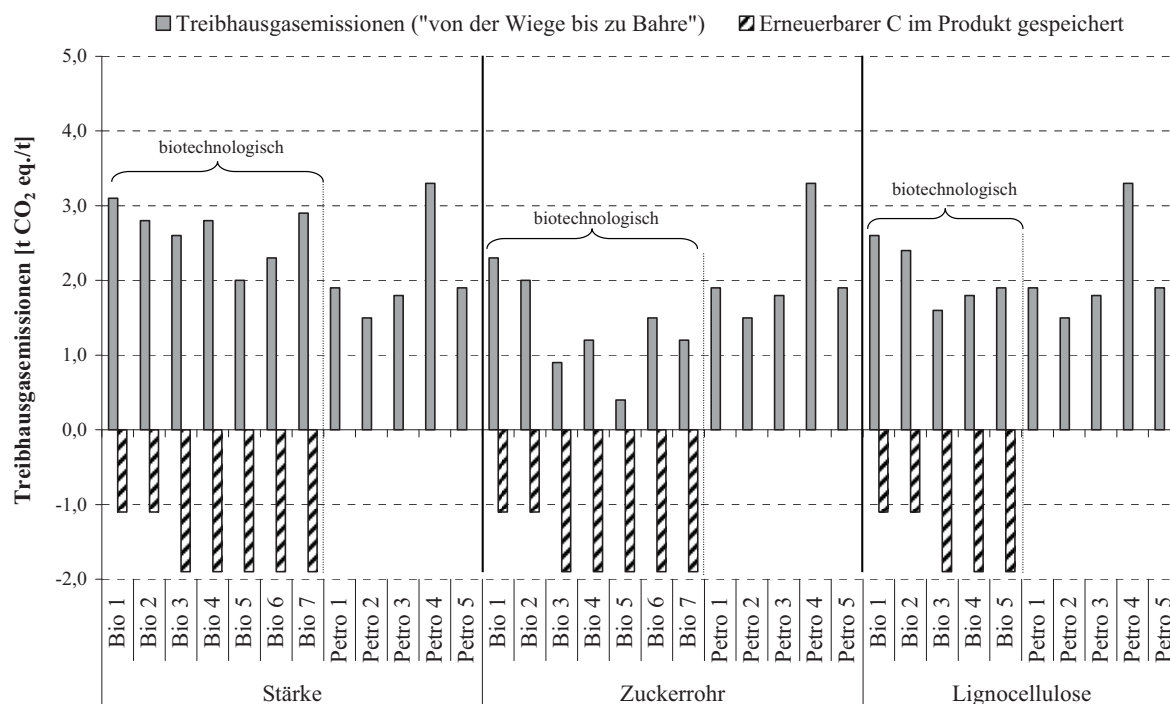
Beim Vergleich der LCA- Ergebnisse zu den unterschiedlichen Herstellungsverfahren von Ethylacetat muss festgestellt werden, dass keines der beschriebenen biotechnologischen

Verfahren einen geringeren Gesamtenergieverbrauch aufweisen kann, auch wenn die Unterschiede gering ausfallen (vgl. **Abbildung 5.10**). Beim Vergleich der Treibhausgasemissionen (vgl. **Abbildung 5.11**) für unterschiedliche Herstellungsverfahren für Ethylacetat / Ethyllactat ändert sich das Ergebnis im Vergleich zur Untersuchung des Energieverbrauchs. Hinsichtlich den Treibhausgasemissionen („von der Wiege bis zur Bahre“) gibt es einige biotechnologische Herstellungsverfahren auf Basis von Zuckerrohr, die eine Einsparung im Vergleich zu konventionellen Herstellungsprozessen aufweisen. Bei den Herstellungsverfahren auf Basis von Stärke und Lignocellulose gibt es jedoch petrochemische Prozesse, die zu geringeren Treibhausgasemissionen führen. Auch hier wird erneut deutlich, dass sich nicht nur die biotechnologischen Prozesse, sondern auch die petrochemischen Vergleichsprozesse teilweise stark unterscheiden.



**Abbildung 5.10:** Energieverbrauch für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Ethylacetat (petrochemisch) / Ethyllactat (biotechnologisch) /BREW 2006/





**Abbildung 5.11:** Treibhausgasemissionen für unterschiedliche Herstellungsverfahren von Ethylacetat (petrochemisch) / Ethyllactat (biotechnologisch) /BREW 2006/

### Herstellung von Plattformchemikalien

/Grimm et al. 2011/ sieht eine besondere Bedeutung der weißen Biotechnologie in der Bereitstellung von sogenannten Plattformchemikalien, aus denen sich ein ganzer Produktstammbaum von Industriechemikalien ableiten lässt. Aufgrund ihrer Bedeutung untersucht /Grimm et al. 2011/ 26 Plattformchemikalien, die ein besonderes Substitutionspotenzial für erdölbasierte Stoffe aufweisen (siehe **Tabelle A.17** im Anhang). Von den 26 untersuchten Chemikalien werden 11 als sehr bedeutend, 11 als durchschnittlich und 4 als weniger bedeutend bzw. als Chemikalien mit schwacher Entwicklungsdynamik definiert.

Betrachtet man die Chemikalien mit großer zukünftiger Entwicklungsdynamik, so gehen /Grimm et al. 2011/ davon aus, dass Wachstumsraten im Jahr 2020 im Vergleich zu 2008 von 16 bis über 90 % denkbar sind. Der Schwerpunkt der Anwendungsmöglichkeiten wird in der Chemie und Pharmazie, der Gesundheits-, Bau- und Automobilwirtschaft sowie in der Lederindustrie gesehen. Beim Stand der biotechnologischen Herstellungsverfahren lässt sich feststellen, dass es im Vergleich zu den konventionellen Herstellungsverfahren eine Vielzahl an unterschiedlichen Herstellungsmöglichkeiten gibt. Dabei stellt die Studie für 8 der 11 bedeutenden Plattformchemikalien dar, dass es bereits Herstellungsanlagen in der industriellen Umsetzung gibt und bei 2 weiteren erste Pilotanlagen realisiert sind. Nur die Herstellung von Tetrahydrofuran befindet sich im Labormaßstab. Dies darf jedoch nicht darüber hinweg täuschen, dass heute die wenigsten Plattformchemikalien biotechnologisch hergestellt werden. Als Ausnahmen nennen die Autoren solche Produkte, welche traditionell aus biogenen Rohstoffen hergestellt werden, wie z. B. Fette, Öle, Proteine, Aminosäuren oder Biokunststoffe.

Die biotechnologischen Produktionsvolumina der untersuchten Plattformchemikalien sind eher gering, auch wenn gerade bei den in **Tabelle A.18** im Anhang beschriebenen Chemikalien eine starke Entwicklungsdynamik der biotechnologischen Herstellungsweise erkennbar ist.

### Riboflavin (Vitamin B<sub>2</sub>)

Die Herstellung von Vitamin B<sub>2</sub> wird in vielen Veröffentlichungen und Untersuchungen als Paradebeispiel für den Einsatz der Biotechnologie dargestellt (siehe /Braun et al. 2006, Hoppenheidt et al. 2005, OECD 2001/). Vitamin B<sub>2</sub> ist einerseits ein wichtiger Nahrungsmittelzusatz, wird aber auch als Farbstoff (E101) und in der Futtermittelherstellung verwendet. Der bisherige Prozess zur Herstellung wurde in den 50er Jahren entwickelt. Ausgangsstoff zur Herstellung war Glukose und es folgen sechs Umwandlungsstufen. Der jüngste chemische Prozess beinhaltete die Umwandlung von Glukose zu Ribose mithilfe der Fermentation. Die Ribose wurde anschließend mit 3,4 Xylidin zu Ribitylxylidin umgesetzt. Anschließend wurde das Ribitylxylidin in einen Azofarbstoff umgewandelt, um dann unter Zugabe von Barbitursäure zu Riboflavin zu reagieren. Seit 1990 wurde der chemische Herstellungsprozess eingestellt und durch Fermentation ersetzt. Dabei kommen Hefen oder Pilze in ausschließlich biotechnologischen Prozessverfahren zum Einsatz. Der biotechnologische Prozess erzeugt das Riboflavin in nur einem Prozessschritt aus Glukose. Hier wird z. B. der genetisch modifizierte Stamm des *Bacillus subtilis* eingesetzt. **Tabelle 5.9** stellt die Ergebnisse der LCA für den chemischen und biotechnologischen Prozess hinsichtlich dem Einsatz von Rohstoffen, Energie und Emissionen dar /OECD 2001/.

**Tabelle 5.9:** Vergleich der chemischen und biotechnologischen Herstellung von Vitamin B<sub>2</sub> /OECD 2001/

Art des Prozesses	Chemisch [%]	Biotechnologisch [%]
Rohstoffeinsatz	100	150
Nicht nachwachsende Rohstoffe	100	25
Energie	100	100
Flüchtige organische Verbindungen	100	50
Wasseremissionen	100	33

Es zeigt sich, dass hinsichtlich der notwendigen Energie beide Prozesse keinen Unterschied aufweisen, der biotechnologische einen um 50 % höheren Rohstoffeinsatz aufweist, jedoch der Anteil an nicht-erneuerbaren Rohstoffen nur 1/4 des chemischen Prozesses umfasst und auch bei den Emissionen deutliche Einsparungen durch den biotechnologischen Prozess ermöglicht werden. Hinsichtlich der Gesamtkosten des Prozesses kann eine Einsparung von 50 % erreicht werden und die notwendigen Investitionskosten für den biotechnologischen Prozess entsprechen in etwa denen des chemischen Prozesses /OECD 2001/.

/Hoppenheidt et al. 2005/ vergleichen im Rahmen von Lebenszyklusanalysen ebenfalls detailliert zwei biotechnologische Herstellungsverfahren (Herstellungsverfahren von BASF, Herstellungsverfahren von DSM Nutritional Products) für Vitamin B<sub>2</sub> mit entspre-

chend chemischen Prozessen. Für das erste Herstellungsverfahren kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass der kumulierte Energieaufwand (KEA) zur Herstellung von 1 t Vitamin B<sub>2</sub> für den biotechnologischen Prozess bei 917 GJ liegt. Im Vergleich dazu benötigt der chemische Herstellungsprozess 973 GJ. Der KEA fällt somit beim biotechnologischen Herstellungsverfahren um 6 % geringer aus. Für die Herstellung nach dem zweiten biotechnologischen Verfahren kommt die Studie zu einem KEA von 590 GJ für den chemischen Prozess und auf 391 GJ für das biotechnologische Herstellungsverfahren. Es kann in diesem Vergleich somit festgestellt werden, dass der KEA für die Produktion von 1 t Vitamin B<sub>2</sub>-96 % und 167 kg Vitamin B<sub>2</sub>-98% beim biotechnologischen Prozess um 34 % geringer ausfällt. Aufgrund von verschiedenen Rahmenbedingungen bei der Bilanzierung können die beiden biotechnologischen Prozesse nach /Hoppenheidt et al. 2005/ nicht miteinander verglichen werden. Neben dem KEA müssen jedoch auch weitere Umweltauswirkungen betrachtet werden. So kommt die Untersuchung zu dem Ergebnis, dass auch bei anderen Umweltfaktoren durch den biotechnologischen Herstellungsprozess Vorteile umgesetzt werden können. Nachteilig fällt die Beurteilung jedoch im Bereich der aquatischen Eutrophierung aus, da es hier zu deutlich höheren Umweltbelastungen beim biotechnologischen Prozess kommt.

### Antibiotikum Cephalexin

Die  $\beta$ -Lactam Gruppe ist eine der Hauptklassen von Antibiotika und enthält z. B. Cephalosporin C, was gegen gramnegative Bakterienstämme eingesetzt werden kann, die resistent gegen  $\beta$ -Lactamase sind. Es ist dabei weniger toxisch als Penicillin, hat jedoch im Hinblick auf den klinischen Einsatz einige Nachteile, weshalb halb-synthetische Antibiotika auf Basis von Cephalosporin C entwickelt wurden. Ein Beispiel dafür ist Cephalexin. In den Jahren 1975 bis 1985 wurde Cephalexin mithilfe eines zehn-stufigen chemischen Prozesses hergestellt, bei dem z. B. pro kg Endprodukt 30 bis 40 kg Abfall erzeugt wurden. Ab 1985 gelang es, durch die Einführung von Recycling, das Verhältnis zwischen Produkt und Abfall nach umfangreichen Forschungsanstrengungen auf 1:15 zu reduzieren. 1995 erfolgte die Einführung eines sechs-stufigen Prozesses, bei dem Cephalexin aus Benzaldehyd und Penicillin gewonnen werden konnte. Dabei wurden in drei der sechs Stufen erstmalig biokatalytische Prozesse angewendet und die entstehende Abfallmenge konnte auf 10 kg pro kg Produkt reduziert werden.

**Tabelle 5.10** vergleicht für ausgewählte Stoffe die beiden Prozesse. Die anfallende Abfallmenge konnte bei jedem Verbesserungsschritt deutlich verringert und zusätzlich konnte auch die Toxizität des entstehenden Abfalls reduziert werden. Auch bei diesem Vergleich wird deutlich, dass der biokatalytische Herstellungsprozess nicht bei allen betrachteten Bereichen Vorteile im Vergleich zum konventionellen Herstellungsverfahren aufweist. So wird hier z. B. deutlich mehr Wasser benötigt. Betrachtet man den Energieverbrauch als Ergebnis der LCA, so kann in Summe festgestellt werden, dass durch die Umstellung auf einen katalytischen Prozess Energie eingespart werden kann /OECD 2001/.

**Tabelle 5.10:** Vergleich der konventionellen und biokatalytischen Herstellung von Cephalexin /OECD 2001/

Art des Prozesses	Einheit	Konventionell	Biokatalytisch
Abfall	kg/kg Cephalexin	50 (1970) auf 15 (1995)	10 (1995) auf 5 (2000)
Anorganische Stoffe	kg/kg	0,5	0,5
Organische Stoffe	kg/kg	1,0	0,2
Lösungsmittel (nicht halogenhaltig)	kg/kg	1,7	0,3
Lösungsmittel (halogenhaltig)	kg/kg	0,9	0
Elektrizität	%	100	150
Dampf	%	100	40
Wasser	%	100	300
Flüssiger Stickstoff	%	100	0

### Acrylamid

Acrylamid besteht aus zwei funktionalen Gruppen der Vinyl- und Aminogruppe. Es ist eine Chemikalie mit großer Bedeutung für die chemische Industrie, da sie für die Herstellung einer Vielzahl von chemischen Derivaten, sowohl Mono- als auch Polymere, eingesetzt werden kann. Bei den traditionellen Herstellungsverfahren wird in einem katalytischen Prozess Acrylnitril unter Einsatz eines Kupferkatalysators, welcher periodisch reaktiviert werden muss, hydrolysiert. Um die Polymerisation der Ausgangsstoffe als auch der Produkte zu verhindern, müssen zusätzlich Polymerisationshemmer eingesetzt werden. Nach Anreicherung der Lösung und Wiederverwertung des ungenutzten Acrylnitrils erfolgt als letzter Produktionsschritt eine Deionisation, um die Acrylamidlösung von Salzionen zu reinigen. Bei der Herstellung fallen eine Vielzahl von Nebenprodukten, wie z. B. Ammoniumsulfat in zum Teil großen Mengen an.

Beim enzymatischen Prozess werden wiederverwertbare immobilisierte Zellen eingesetzt. Es ist im Gegensatz zum katalytischen Prozess keine Anreicherung und Entfärbung notwendig. Der auf Enzymen basierte Prozess besteht aus den vier Teilprozessen Enzymproduktion, Immobilisierung der Enzyme, Reaktion und Entfernung des Katalysators. Durch genetische Veränderungen, die Verwendung neuer Mikroorganismen und Fortschritten bei der Fermentation konnte die Aktivität der verwendeten Enzyme verbessert werden. So konnte die Kapazität bei der Verwendung des Mikrobenstamms N-774 mit 4.000 t/Jahr bei einer Acrylamidkonzentration von 20 % auf eine Kapazität von 20.000 t/Jahr bei einer Konzentration von 50 % durch den Einsatz des Mikrobenstamms J-1 deutlich gesteigert werden. Durch diese hohe Konzentration und eine fünffach höhere Aktivität wird keine Nachbehandlung mehr benötigt /OECD 2001/.

**Tabelle 5.11** stellt als Ergebnis der LCA den Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen für den traditionellen und enzymatischen Prozess zusammen. Es werden dabei auch die Ergebnisse für einen optimierten enzymatischen Herstellungsprozess dargestellt. Es zeigt sich, dass erst die Weiterentwicklung des enzymatischen Herstellungsverfahrens in allen betrachteten Punkten Vorteile gegenüber dem traditionellen katalytischen Herstellungsverfahren aufweist. Neben den Einsparungen an Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen kann die Ab-

fallproduktion beim enzymatischen Prozess verringert werden, da die Nachbehandlungsschritte entfallen und die Toxizität des entstehenden Abfalls deutlich verringert wurde. Durch den Entfall der Nachbehandlungsschritte (Anreicherung und Säuberung) konnte zusätzlich die Produktionskapazität und somit die Wirtschaftlichkeit des Herstellungsprozesses erhöht werden /OECD 2001/.

**Tabelle 5.11:** Vergleich der Herstellungsverfahren zur Acrylamidproduktion /OECD 2001/

Art des Prozesses	katalytisch	enzymatisch (alt)	enzymatisch (neu)
Energieverbrauch [MJ/kg]			
Dampf	1,6	2,8	0,3
Elektrizität	0,3	0,5	0,1
Rohstoffe	3,1	3,1	3,1
CO <sub>2</sub> -Emissionen [kg/kg]			
Dampf	1,25	2	0,2
Elektrizität	0,25	0,25	0,1
Rohstoffe	2,3	2,3	2,3

Nach (Gaisser et al. 2002) wurden in Deutschland ca. 30.000 t Acrylamid biotechnologisch hergestellt. Es wird angenommen, dass durch den enzymatischen Prozess im Vergleich zum katalytischen Prozess 1,5 MJ/kg an Energie (1,3 MJ/kg Dampf, 0,2 MJ/kg Strom) eingespart werden kann /Gaisser et al. 2002/. Durch diese Prozessänderung können in Deutschland im Jahr ca. 45 TJ eingespart werden, wenn bei allen Produktionslinien der biotechnologische Prozess zum Einsatz kommt. Hinsichtlich den daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen sind Einsparungen von über 3.500 t pro Jahr möglich.

### Einsatz von Enzymen in der Bohrlochfertigung

Um die Bohrköpfe zu schmieren als auch die Bohrung offen zu halten, werden z. B. bei Erdölbohrungen entsprechende Bohrflüssigkeiten eingesetzt. Bei tiefen Bohrungen werden aufgrund der Wärmeentwicklung ölbasierte Flüssigkeiten verwendet, die teuer und auch wenig umweltverträglich sind. Durch den Einsatz der Bohrlochflüssigkeiten wird am Bohrlochrand ein so genannter Filterkuchen abgelagert, der das Austreten der Flüssigkeit minimiert und verhindert, dass Feststoffe aus der Wand in die Bohrung gelangen. Bevor eine Ölforderung beginnt, muss dieser Filterkuchen jedoch entfernt werden, da er die Strömungseigenschaften negativ beeinflusst. Die Entfernung des Filterkuchens erfolgt mit sogenannten „breakern“, welche die Ablagerungen an der Bohrungswand lösen. Um die notwendigen Eigenschaften der Bohrflüssigkeit bereitzustellen, werden oft Polymere eingesetzt. Diese werden durch den Einsatz der „breaker“ ebenfalls zerstört. Traditionell werden als „breaker“ Säuren (z. B. Salzsäure) oder Oxidationsmittel (z. B. Natriumperborat) verwendet. Für tiefe Bohrungen können diese Stoffe jedoch nicht effektiv eingesetzt werden, da sie nur auf kurzen Strecken wirksam sind. Darüber hinaus reagieren sie unspezifisch, d. h., sie reagieren mit allen Materialien, die oxidiert werden können oder säurelöslich sind, wodurch es auch zu Korrosion an Rohren und Einschaltungen kommen kann. Durch bei der Korrosion freigesetzte Eisenionen kann es zur Verschlackung des Öls kommen.



Als Alternative können als „breaker“ auch Enzyme eingesetzt werden. Diese brechen den Filterkuchen in kleine Fragmente und hydrolysieren die Polymere. Da die Enzyme speziell entwickelt werden können, reagieren sie sehr spezifisch und bauen dadurch auch nur die vorgesehenen Stoffe ab. Aufgrund einer vergleichsweise langsamen Reaktionsgeschwindigkeit kann das Material gleichmäßig abgepumpt werden. Für teilweise in Bohrflüssigkeiten eingesetzte Carbonate kann ein zweifacher enzymatischer Prozess eingesetzt werden. In einem ersten Schritt werden die organischen Polymere entfernt und in einem zweiten Schritt wird durch ein weiteres Enzym eine schwache Säure erzeugt, welche das Carbonat löst. Da die Enzyme beim Prozess nicht verbraucht werden, können sie über die gesamte Bohrlochlänge verwendet werden.

Neben einem deutlich geringeren Rohstoffeinsatz (Enzyme werden im Prozess im Gegensatz zu den Säuren bzw. Oxidationsmitteln nicht verbraucht) entstehen keine Umweltbelastungen in Form von pH-Wertveränderungen des Bodens und es kommt nicht zum Absterben von Mikroorganismen. Darüber hinaus ist der Einsatz der Enzyme ökonomisch sinnvoller, da Korrosion von Material und Rohren bei diesem Verfahren nicht auftreten /OECD 2001/.

### **Biotechnologische Aufbereitung von Hühnerfedern für die Futtermittelindustrie**

In der deutschen Geflügelproduktion werden jährlich ca. 800.000 t Geflügel produziert, wobei große Mengen an Abfall und ca. 20.000 t Federn anfallen. Da nur ein geringer Anteil dieser Federn zu Bettfedern weiterverarbeitet wird, muss der Großteil umweltgerecht entsorgt werden. Dabei ist ein Haupteinsatzbereich die Futtermittelindustrie. Dort dienen die zu Federmehl verarbeiteten Federn als Ballaststoff. Der Hauptbestandteil der Federn sind Keratine, komplexe Mischungen aus unlöslichen Proteinen. Diese  $\beta$ -Keratine weisen eine geringe Elastizität jedoch eine hohe mechanische Stabilität auf und sind äußerst fest und unlöslich. Das Federkeratin ist reich an Serin, Glutamat und Valin /Brodersen et al. 2003/.

Damit die Federn in der Futtermittelindustrie eingesetzt werden können, muss die Verfügbarkeit der Proteine durch Aufbrechen der Disulfidbrücken verbessert werden. Dies kann durch Dampfhydrolyse oder durch Extrudierung geschehen. Bei der chemischen Hydrolyse werden Drücke von bis zu 6,9 bar benötigt. Um höherwertige Aminosäuren und Futtermittelzusätze aus Federn zu gewinnen, kann eine chemische Hydrolyse mit Salzsäure oder Natronlauge zum Einsatz kommen. Dabei führt die Hydrolyse jedoch zu einem breiten Produktspektrum, wodurch eine aufwändige Nachbearbeitung notwendig wird. Es entstehen dabei auch unerwünschte Nebenprodukte, wie z. B. kanzerogene Chlorverbindungen und die resultierende Salzfracht ist umweltbelastend. Bei der Hydrolyse mit Natronlauge kann es zum Teilabbau der freigesetzten Aminosäuren kommen, wodurch eine minderwertige Futtermittelqualität erzeugt wird.

Im biotechnologischen Verfahren werden Bakterien eingesetzt, welche die Keratine in leicht verdauliche Peptide und Aminosäuren spalten. Da die Mikroorganismen spezifisch reagieren, entstehen weniger Nebenprodukte und es sind aufgrund der biologischen Fermentation keine hohen Drücke und Temperaturen notwendig. Im Hinblick auf hygienische Anfor-



derungen werden hauptsächlich thermophile Bakterien für den biotechnologischen Prozess eingesetzt. Der Prozess kann bei ca. 70 °C durchgeführt werden und der Abbau erfolgt dann entweder durch extrem thermophile Bakterien oder mit thermostabilen Enzymen.

Die kosten- und aufwandsintensive Nachbehandlung kann beim biotechnologischen Prozess entfallen und die bei der Fermentation entstehenden Abfallprodukte sind biologisch abbaubar. Neben den energetischen Vorteilen kann durch den biotechnologischen Prozess auch die Qualität der Futtermittelzusätze gesteigert werden /Brodersen et al. 2003/.

### **Einsatz von Enzymen in der Lederbearbeitung**

Tierische Häute und Felle wurden schon in der Vorgeschichte der Zivilisation zum Teil auf primitive Weise präpariert und damit für eine entsprechende Anwendung nutzbar gemacht. Die Verarbeitung von Tierhäuten zu Leder erfolgte mit Hilfe von Gerbstoffen und verschiedenen Gerbtechniken. Der Gerbprozess besteht aus unterschiedlichen Einzelschritten, die sich je nach Rohware und dem herzustellenden Produkt unterscheiden können. /Hoppenheidt et al. 2005/ beschreiben mit dem Weichen und Äschern zwei ausgewählte Verfahrensschritte der Lederbearbeitung. Das Weichen (Soaking) hat zum Ziel, die Rohhaut von Verunreinigungen und Konservierungsmitteln zu befreien. Ein weiterer Zweck ist die Wiederherstellung des Quellungszustandes wie am Körper des lebenden Tieres. Der Prozess untergliedert sich entsprechend in zwei Teilschritte, den Weichvorgang, um die Verschmutzungen zu lösen, und den Hauptweichvorgang, bei dem die Häute und Felle das verlorene Wasser wieder aufnehmen. Der Weichprozess dauert mehrere Stunden bis Tage und wird in Mischern, Trommeln, Gruben oder Kanälen durchgeführt. Je nach Rohware können als Zusatzstoffe Tenside, Enzyme oder Bakterizide eingesetzt werden. Nachdem wirksame proteolytische Bakterien- und Pilzenzyme in ausreichenden Mengen produziert werden konnten, weitete sich das enzymatische Weichen aus. Trotz vieler anwendungstechnischer Vorteile des enzymatischen Weichens sind aufgrund der Enzymaktivität Grenzen gesetzt, da bereits nach ca. sechs Stunden ein Angriff auf kollagene Proteine erfolgen kann /Hoppenheidt et al. 2005/.

Der Begriff Äschern (Lining, Unhairing) bezeichnet den Prozessschritt, bei dem die Häute enthaart und die Faserstruktur der Haut aufgeschlossen wird. Dabei erfolgt die Entfernung der Haare und anderer Hautkomponenten chemisch und mechanisch. Durch den Einsatz von Sulfiden (NaHS, Na<sub>2</sub>S) und Kalk werden Fette und Hornstoffe (Haare, Haarwurzeln, Epidermis) entfernt. Alternativ können anstatt der anorganischen Sulfide auch organische Präparate (Mercaptide, Natriumthioglykolat) in Kombination mit starken Alkali- und Aminomischungen eingesetzt werden. Um die Wirksamkeit zu verbessern, werden dem Prozess teilweise Enzympräparate zugegeben. Das Äschern erfolgt ebenfalls in Trommeln, Mischern, Gruben oder Rührern. Beim Äschern wird in einem haarzerstörenden Prozess, bei dem durch Chemikalieneinsatz ein weitgehend hydrolytischer Abbau der Haare erfolgt, und einem haarerhaltenden Prozess, bei dem die Haare auf chemischem Weg gelockert und anschließend durch Abwalzen oder eine maschinelle Enthaarung mechanisch entfernt werden, unterschieden /Hoppenheidt et al. 2005/.

Insgesamt wird der Einsatz von Enzymen bei der Lederherstellung nach /Hoppenheidt et al. 2005/ unterschiedlich eingeschätzt. Es wird angemerkt, dass der Einsatz von Lipasen beim Weichen selten gebraucht wird, und man geht davon aus, dass der vollständige Verzicht auf Tenside beim Weichen nicht möglich ist. Beim Einsatz von Proteasen muss beachtet werden, dass diese nur in einem sehr engen pH-Bereich (pH 8 bis 11) aktiv sind und in einer wässrigen Phase am wirkungsvollsten eingesetzt werden können. Darüber hinaus kann die Effektivität der Enzyme durch höhere Temperaturen gesteigert werden, der Einsatz von Gerbstoffen und Schwermetallen hemmt dagegen jedoch deren Wirksamkeit.

### **Einsatzbeispiele in der Papier- und Zellstoffverarbeitung**

Zellstoff, der aus Frischholz hergestellt wird, enthält einen Restanteil an Lignin, welches für die Braunfärbung des Materials verantwortlich ist. Zusätzlich kann sich bei der chemischen Auftrennung die Färbung des Restlignins verdunkeln /Bajpai 2004/. Diese Färbungen müssen durch Bleichen entfernt werden. Dabei werden entweder nur die Chromophore des Lignins zerstört, oder das Lignin gelöst und entfernt /Gruber 2011/. Chemische Bleichverfahren arbeiten oxidativ und lösen das Lignin. Eingesetzt werden heute neben Chlorverbindungen wie z. B. Chlordioxid auch Wasserstoffperoxid, Natriumperoxid oder Ozon. Insgesamt werden jedoch ca. 28 % des Zellstoffs nicht gebleicht, 13 % konventionell mit Chlor und der größte Anteil, ca. 55 % des Zellstoffs, wird elementarchlorfrei gebleicht. Es wird bei diesem Verfahren kein elementares Chlor  $\text{Cl}_2$  verwendet, sondern Chlorverbindungen wie Chlordioxid. Bei weiteren 4 % werden chlorfreie Verfahren (TCF) eingesetzt. In diese Gruppe fallen auch reduktive Verfahren, die das Lignin im Zellstoff belassen und nur die Chromophore zerstören /Gruber 2011/.

Für den enzymatischen Einsatz sind vielversprechende Möglichkeiten, ähnlich wie in der Textilindustrie, Laccase und Cellulase /Bhat 2000, Riva 2006/. Durch eine Vorbehandlung von Zellstoff aus dem Kraftprozess mit Hemicellulase Xylanase kann der Hyperchloridverbrauch bei Hartholz um bis zu 40 % und bei Weichholz um bis zu 20 % gesenkt werden. Bei 110 °C überleben einige Xylanase produzierende Bakterien bis zu 20 Minuten bzw. bei 75 °C sogar dauerhaft. Die Dauer für eine vollständige Bleichung auf Basis von Xylanase ist jedoch sehr lange und der Vorgang nicht vollständig verstanden. Es lassen sich daher vermutlich noch deutliche Leistungssteigerungen erreichen. Bisher kann mit dem Einsatz von Enzymen jedoch eine Reduktion der anschließend zum Einsatz kommenden Chemikalienmenge erreicht werden /Bajpai 2004/.

Die Prozesse, wodurch es bei Laccase zur Bleichung kommt, sind besser untersucht. Das Bleichen läuft mithilfe von kleinen Molekülen ab, die als Oxidationsträger fungieren. Diese bilden ein sogenanntes Laccase-Mediator-System (LMS). Welche Moleküle als Mediator eingesetzt werden können, ist ebenfalls gut erforscht /Riva 2006/. Nach /Bajpai 2004, Couto et al. 2006/ ist mit Ligozym ein Produkt, welches auf einem LMS basiert und bei einer Temperatur von 40 bis 65 °C, einem pH-Wert von 4 bis 7, bei Drücken von 1 bis 14 bar und für eine Dauer von 1 bis 4 Stunden eingesetzt wird, verfügbar.

Zur Papierherstellung müssen die durch Lignin verklebten Holzfasern getrennt werden. Dies kann durch eine mechanische oder chemische Trennung erfolgen /Breen et al. 1999/. Bei der mechanischen Trennung sind die Produkteigenschaften sehr gut. Aufgrund der hohen Ausbeute von 95 % kann diese einfache Technik für große Produktionsmengen eingesetzt werden. Nachteilig ist der hohe Energiebedarf, da das Holz erhitzt wird, um die Bindungsfähigkeit des Lignins zu reduzieren. Beim chemischen Trennverfahren, auch Pulping genannt, wird das Lignin ausgewaschen, das Holz zerfällt bei leichter mechanischer Belastung und man erhält den Zellstoff. Jedoch ist die Ausbeute mit ca. 50 % deutlich geringer als beim mechanischen Auftrennverfahren. Daher werden in der Papierherstellung im Normalfall Fasern aus beiden Auftrennmethoden (Holzstoff und Zellstoff) gemischt eingesetzt. Es werden vor allem drei chemische Prozesse zur Zellstoffherstellung angewendet. Dabei hat der Soda-Prozess einen Anteil von ca. 5 %, 18 % werden mit dem Sulfit-Prozess bearbeitet und der größte Anteil wird durch den Kraft-Prozess (77 %) hergestellt. Dabei werden bei einer Temperatur von 170 °C Natriumsulfid ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) und Natronlauge ( $\text{NaOH}$ ) zugesetzt. Mit Hilfe des Sulfid-Anions wird das Lignin nukleophil gespalten und etwa die Hälfte (45 bis 55 %) des Holzes wird zu Zellstoff umgewandelt. Der andere Anteil geht im Wesentlichen in das Abfallprodukt Schwarzlauge über. Beim Sulfit-Prozess kommt Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) zum Einsatz, welches in Wasser zu schwefeliger Säure, bestehend aus  $\text{HSO}_3$  und  $\text{H}_2\text{SO}_3$ , zerfällt. Diese sulfoniert das Lignin und es entstehen wasserlösliche Bruchstücke. Der Vorgang wird bei Temperaturen von 125 bis 140 °C durchgeführt und dauert ca. 5 bis 7 Stunden /Gruber 2011/.

In der Natur werden Pflanzenmaterialien vollständig abgebaut und der Abbau wird wesentlich durch Enzyme (Biokatalysatoren) beschleunigt. Organismen, die Hartgewebe verdauen können, z. B. bestimmte Pilze, produzieren dazu Enzyme (spezielle Eiweißstoffe), die sehr spezifisch auf bestimmte Bindungen wirken. In der Natur werden in der Regel zunächst die Polyosen, dann die Cellulose und am Schluss das Lignin angegriffen, da Kohlenhydrate leichter aufzuspalten sind als Lignin. Es sind bisher nur wenige Enzyme bekannt, die Lignin selektiv spalten. Dabei handelt es sich um sog. Oxidoreduktasen. Dazu zählen nach /Gruber 2011/:

- Lactase, eine Polyphenoloxidase, welche das Lignin oxidativ spaltet
- Mangan-Peroxidase benötigt  $\text{Mn}^{2+}$ -Ionen, die zu  $\text{Mn}^{3+}$ -Ionen oxidiert werden und dieses spaltet selektiv das Lignin auf oxidativem Weg
- Lignin-Peroxidase (Ligninase) benötigt  $\text{H}_2\text{O}_2$  zur Oxidation

Nach /Gruber 2011/ gibt es bisher jedoch keine „echten Aufschluss-Verfahren“, die vollständig mit diesen Enzymen arbeiten. Es wird jedoch bereits seit längerer Zeit an einem technischen Einsatz geeigneter Pilze geforscht. Vielversprechende Pilzarten sind z. B. *Ceriporiopsis subvermispora* oder *Phlebia subserialis*. Nach /Akhtar et al. 1998/ könnte sich mit diesen Pilzen im Vergleich zu einer rein mechanischen Aufbereitung über 30 % an Energie einsparen lassen. Andere Untersuchungen gehen von mehr als 45 % aus /Breen et al. 1999/. Gleichzeitig steigt nach /Akhtar et al. 1998/ die Reißfestigkeit des Produktes, wodurch der Anteil an chemisch aufgetrennten Fasern reduziert werden kann. Um die Tauglichkeit für einen groß-

technischen Einsatz zu erhöhen und die Qualität zu verbessern, wurden unterschiedliche Hilfsmittel untersucht. So ermöglicht nach /Breen et al. 1999/ ein Anteil von 0,5 % Maisquellwasser (Corn Steep Liquor) in der Impfmasse einen geringeren Bedarf an Impfmasse an der gesamten umzusetzenden Masse und der Impfanteil kann auf 5 g/t reduziert werden. Ohne Zusatz werden 3 kg/t benötigt.

Auch die Zugabe von Stickstoff und Glucose wurde untersucht, mit dem Ergebnis, dass sich auch dadurch ein leichter Energieeinspareffekt erzielen lassen kann /Akhtar et al. 1998/. Weitere wichtige Einflussfaktoren auf eine effektive Nutzung von Pilzen ist die Bereitstellung einer entsprechenden Temperatur und Belüftung. So sind Temperaturen von 27 bis 32 °C für *Ceriporiopsis subvermispora* und 27 bis 39 °C für *Phlebia subserialis* vorteilhaft. Bei der Belüftung geht man davon aus, dass Werte über  $0,02 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$  keinen verstärkenden Effekt haben während eine geringere Belüftungsrate das Wachstum verhindern (siehe /Akhtar et al. 1998, Breen et al. 1999, Scott 2003/).

Ein sehr wesentlicher Einflussfaktor ist die Art des Holzes. Je nach Holzart sind bei den eingesetzten Pilzstämmen unterschiedliche Bedingungen für einen optimalen Prozess notwendig /Akhtar et al. 1998/. Nach Untersuchungen und der Realisierung und Bewertung einer Demonstrationsanlage kommen /Scott et al. 2002, Scott et al. 2000, Scott 2003/ zu dem Ergebnis, dass eine biomechanische Auftrennung der rein mechanischen Auftrennung wirtschaftlich und ökologisch überlegen ist. In einer Pilotanlage (Versuchsstadium) führte ein 2-wöchiges Biopulping zu einer Reduktion des Strombedarfs von 25 bis 30 %. Dadurch lassen sich, auch unter Berücksichtigung der für das biotechnologische Verfahren zusätzlich notwendigen Ausrüstung, Gesamteinsparungen von 9 bis 20 \$ pro Tonne Zellstoff realisieren. Der Prozess wurde an zwei Demonstrationsanlagen mit unterschiedlichem Durchsatz (12 t/Tag und 40 t/Tag) an 40 Tonnen Rohmaterial erfolgreich getestet und analysiert.

### **Enzymatische Methanolherstellung**

Nach /Reetz 2011/ wäre ein wichtiger Schritt für den Umstieg auf alternative Rohstoffquellen, die effiziente Umwandlung von Methan in chemisch gut verwertbare Stoffe wie z. B. Methanol. Eine vielversprechende neuartige Möglichkeit der enzymatischen Methanolherstellung nutzt dabei das Einfügen eines inerten Gases in die Bindetasche eines Enzyms. Dadurch wird diese verkleinert und das Methan kann effektiv gebunden werden. Methanol kann einerseits konventionellen Kraftstoffen beigemischt oder direkt in Brennstoffzellen verwendet werden. Darüber hinaus eignet es sich als Ausgangsstoff für eine Vielzahl von chemischen Synthesen. Konventionelle Verfahren der Herstellung von Methanol erfolgen über Umwege (Synthesegas), sind aufwändig, benötigen hohe Temperaturen und Drücke und sind daher sehr energieintensiv.

Im Gegensatz dazu kann die Methanolherstellung mit dem Enzym Methanmonooxygenase effizienter und bei mildereren Reaktionsbedingungen erfolgen. Dieses Enzym ist jedoch sehr komplex und lässt sich schwer in einer künstlichen Umgebung erzeugen und nutzen. Nach /Reetz 2011/ könnte die Enzymfamilie Cytochrom P450 (CYP) einen neuen Ansatzpunkt darstellen, da ihre Hauptaufgabe die Oxidation diverser körpereigener und körper-

fremder Substanzen ist. Aktuell ist jedoch das Problem, dass die Bindetasche des Enzyms zu groß ist, um Methan passgenau aufzunehmen und zu oxidieren. Um dieses Problem zu lösen, fügten die Wissenschaftler ein Carbonsäure, bei der alle Wasserstoffatome der Kohlenwasserstoffkette durch Fluoratome ersetzt wurden, in die Bindetasche ein, um diese zu verkleinern. Aufgrund der wesentlich kleineren Bindetasche kann nun auch Methan effektiv gebunden und zu Methanol oxidiert werden. „Der Weg zu einer technischen Nutzung ist noch sehr weit, das Konzept öffnet jedoch eine Tür für weitere Entwicklungen, so auch bei der Oxidation anderer chemischer Stoffe“ /Reetz 2011/.

### **Mikrobielle Brennstoffzellen zur Stromerzeugung**

In Kläranlagen werden heute bereits Bakterien eingesetzt, um organische Verbindungen und Schadstoffe abzubauen. Für den Einsatz von mikrobiellen Brennstoffzellen wird das Abwasser als mögliche Energiequelle gesehen. Dabei verwerten Mikroorganismen viele im Abwasser vorhandene Stoffe, um ihren Energiebedarf zu decken. Wenn energiereiche Substanzen abgebaut werden, entstehen Elektronen. Für die Nutzung als mikrobielle Brennstoffzellen sind vor allem metallreduzierende Bakterien interessant, da sie Elektronen an einen festen Elektronenempfänger, z. B. an eisenhaltige Mineralien oder an die Elektrode eines bioelektrochemischen Systems, übertragen können. Diese Übergabe funktioniert jedoch nur dann, wenn die Bakterien direkt als einzellige Schicht auf der Elektrode aufgebracht sind.

Wissenschaftler konnten nun erstmals die Strukturen der sog. Cytochrome „in situ“ (in lebenden Biofilmen) und ihrer natürlichen Umgebung sichtbar machen. Es zeigte sich, dass der Biofilm zu 98 % aus dem Bakterium *Geobacter sulfurreducens* besteht. Es wurde hochporöses Elektrodenmaterial entwickelt, das aus einer Vielzahl von leitfähigen Carbonfasern besteht und eine sehr große Oberfläche aufweist. Dadurch können eine sehr große Zahl von Bakterien direkt Elektronen auf die Elektrode übertragen und die Forscher konnten damit 30 Ampere pro m<sup>2</sup> messen, was bisher dem stärksten von Bakterien erzeugten Strom entspricht. Es wird nun daran optimiert, dass eine noch größere Zahl von Bakterien mit den Nanofasern in Verbindung stehen und damit mehr Leistung erzielt werden kann. Eine große Hürde stellt die Übertragung aus dem Labormaßstab (wenige Quadratzentimeter) in einen mehrere Quadratmeter großen Stromerzeuger dar. Das Potenzial wird deutschlandweit in den mehr als 10.000 kommunalen Kläranlagen gesehen /Biotechnologie 2011/.

## **5.4 Theoretisches Potenzial der Biotechnologie**

Aufgrund der Ergebnisse der detaillierten Betrachtung biotechnologischer Anwendungsmöglichkeiten wird das theoretische Potenzial von folgenden biotechnologischen Anwendungen bzw. Prozessen, die zukünftig eine große Auswirkung auf die Energiewirtschaft haben könnten, untersucht. Dabei wird in die Nutzung von biologischen Rohstoffen und in den Einsatz von Enzymen zur gezielten Prozesssteuerung unterschieden. Die Auswahl der untersuchten Anwendungen richtet sich, neben der Relevanz für die Energiewirtschaft, nach den zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten der betrachteten Anwendung. Darüber hinaus sollen durch



die ausgewählten Anwendungen alle Sektoren abgedeckt werden, was jedoch aufgrund der freien Datenverfügbarkeit nur eingeschränkt möglich ist. Bei der Nutzung von biologischen Rohstoffen werden Biokunststoffe, Biobasierter Reifenfüller (TPS), Mikroalgen zur Biogas- sowie Biokraftstoffproduktion (Bioethanol und Biodiesel) untersucht. Im Bereich der Nutzung von Enzymen zur gezielten Prozesssteuerung wird der Einsatz von Enzymen bei Waschmitteln, in der Textilindustrie (Scouring), in der Metallreinigung sowie die Abwasserbehandlung mit anaeroben Bakterien betrachtet. Im Themenfeld der weißen Biotechnologie wird die Butanol-Produktion (ABE-Prozess), die Produktion von Adipinsäure, die Produktion von Bernsteinsäure als Ersatz für Maleinsäureanhydrid und die Produktion von Ethyllactat als Ersatz für Ethylacetat analysiert.

Zur Darstellung des theoretischen Potenzials wird davon ausgegangen, dass die Marktdurchdringung der biotechnologischen Anwendungen und Prozesse 100 % beträgt. Hinsichtlich der technischen Parameter wird, in Anlehnung an die Vorgehensweise bei der Nanotechnologie, davon ausgegangen, dass aktuell im Labormaßstab darstellbare Werte erreicht werden, bzw. es werden Abschätzungen und Annahmen verwendet, die in 2030 erwartet werden. Das theoretische Potenzial bezieht sich auf die in Kapitel 6.2 dargestellten Annahmen des Bio-Szenarios im Jahr 2030, geht jedoch von einer vollständigen Marktdurchdringung der jeweiligen Technologie aus. Bei der Berechnung des theoretischen Potenzials der Biogasproduktion von Algen wird als Grundlage die Nutzung von 10 % der im Jahr 2030 vorgesehenen Fläche zur Biogasproduktion (1,7 Mio. ha, siehe /Nitsch 2008, Weithäuser 2009/) durch die Mikroalgenproduktion angenommen. Bei der Berechnung des theoretischen Potenzials zur Erzeugung von Biodiesel und Bioethanol wird in Entsprechung davon ausgegangen, dass 10 % der für die Biodiesel- bzw. Bioethanolherstellung angenommenen Fläche in 2030 (2,1 Mio. ha, siehe /Hampicke 2009, Nitsch 2008, Weithäuser 2009/) durch die Mikroalgenproduktion ersetzt wird. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 5.12** zusammengefasst.

Die betrachteten zwölf biotechnologischen Anwendungen, Prozesse bzw. Substitutionsprozesse haben das Potenzial, ca. 625 PJ zusätzlich zu erzeugen und über 230 PJ an Energie einzusparen. Bei den betrachteten Anwendungen, die zu einer zusätzlichen Energieerzeugung führen, dominiert der Einsatz von Mikroalgen. Hinsichtlich möglicher Einsparungen kommt dem Einsatz von Reifenfüllern auf Basis von thermoplastischer Stärke (71 PJ) und der Nutzung von Biokunststoffen (65 PJ) die größte Bedeutung zu. An dritter Stelle folgt die biotechnologische Herstellung von Adipinsäure mit 35 PJ.

Aufgrund des großen Potenzials durch die Nutzung von Mikroalgen dominiert der Einsatz von biologischen Rohstoffen mit einem Anteil am Gesamtpotenzial von über 90 % im Vergleich zur Nutzung von Enzymen zur gezielten Prozesssteuerung. Entsprechend dominiert bei der Betrachtung des theoretischen Potenzials nach unterschiedlichen Sektoren (vgl. **Tabelle 5.13**) auch der Bereich der Erzeugung / Wandlung. Bei den anderen Sektoren ergibt sich das größte Potenzial im Sektor der Industrie, da die Mehrheit der untersuchten Anwendungen diesem Bereich zuzuordnen sind.



**Tabelle 5.12:** Theoretisches Potenzial von biotechnologischen Anwendungen entlang der energetischen Wertschöpfungskette

Anwendungen	Theoretisches Potenzial	
	Energieerschließung	Energiewandlung, -speicherung, -verteilung und -nutzung
	Zusätzliche Energieproduktion [PJ]	Energieeinsparung [PJ]
<b>Nutzung biologischer Rohstoffe</b>		
Biokunststoffe		65,0
Reifenfüller (TPS)		71,4
Mikroalgen zur Biogasproduktion	381,8	
Mikroalgen zur Produktion von Biokraftstoffen	Bioethanol Biodiesel	26,1 206,2
<b>Nutzung von Enzymen zur gezielten Prozesssteuerung</b>		
Einsatz von Enzymen bei Waschmitteln		15,5
Enzymeinsatz in der Textilindustrie (Scouring)		5,2
Abwasserbehandlung mit anaeroben Bakterien	11,3	2,5
Einsatz von Enzymen in der Metallreinigung		9,1
Produktion von Adipinsäure		35,3
Butanol-Produktion (ABE-Prozess)		4,8
Produktion von Malelinsäureanhydrid / Bernsteinsäure		2,7 [TJ]
Produktion von Ethylacetat / Ethyllactat		8,1 [TJ]
<b>Summe</b>	<b>625</b>	<b>233</b>

In Entsprechung zur Betrachtung beim theoretischen Potenzial der Nanotechnologie in Kapitel 4.4 zeigt **Tabelle 5.13** einen Vergleich zwischen dem theoretischen Potenzial der einzelnen Sektoren und einem Vergleichswert<sup>56</sup> (Mittelwert des Energieverbrauchs bzw. -einsatzes von 2001 bis 2005) gemäß /EU 2006/ und /BMWi 2012/. Es wird deutlich, dass die Nutzung von Mikroalgen zur Energieerzeugung ein sehr großes theoretisches Potenzial besitzt. Aber auch die acht betrachteten Anwendungen im Industriesektor haben das Potenzial, ca. 5 % des Energiebedarfs der Industrie einzusparen. Im Verkehrsbereich hat allein die Nutzung des thermoplastischen Reifenfüllers das theoretische Potenzial, den Energieverbrauch um ca. 3,6 % zu reduzieren.

Basierend auf dem beschriebenen theoretischen Potenzial werden in Kapitel 6.2 anhand der Entwicklung von unterschiedlichen Szenarien die möglichen Auswirkungen der Biotechnologie auf die Energiewirtschaft detaillierter untersucht und ausgewertet.

<sup>56</sup> Nach /EU 2006/ „Zur Berechnung eines jährlichen Durchschnittsverbrauchs verwenden die Mitgliedstaaten den jährlichen inländischen Endenergieverbrauch aller von dieser Richtlinie erfassten Energieverbraucher in den letzten fünf Jahren vor Umsetzung dieser Richtlinie, für die amtliche Daten vorliegen. Dieser Endenergieverbrauch entspricht der Energiemenge, die während des Fünfjahreszeitraums an Endkunden verteilt oder verkauft wurde und zwar ohne Bereinigung nach Gradtagen, Struktur- oder Produktionsänderungen“.

**Tabelle 5.13:** Vergleich des theoretischen Potenzials der Biotechnologie mit Vergleichswerten

Sektor	Theoretisches Potenzial		Vergleichswert 2001 - 2005 <sup>56</sup> (siehe /EU 2006/ und /BMWi 2012/)	
	[PJ]	[%]	[PJ]	
Zusätzliche Energieproduktion	625,4	28,8	2.171 <sup>57</sup>	
Energieeinsparung	Industrie	122,0	4,9	2.485 <sup>58</sup>
	GHD	0,0	0,0	1.498 <sup>58</sup>
	Haushalte	15,5	0,6	2.697 <sup>58</sup>
	Verkehr	95,1	3,6	2.635 <sup>58</sup>

<sup>57</sup> Mittelwert der Jahre 2001 bis 2005 der Bruttostromerzeugung (siehe /BMWi 2012/)

<sup>58</sup> Mittelwert der Jahre 2001 bis 2005 des Endenergieverbrauchs des entsprechenden Sektors (siehe /BMWi 2012/)

## 6 Szenarien- und Sensitivitätsanalysen

In den folgenden Kapiteln werden die möglichen Auswirkungen der Nanotechnologie (siehe Kapitel 4) und der Biotechnologie (siehe Kapitel 5) auf den Energieverbrauch, die nachgefragten Energieträger, die Energieversorgung, die CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Energiewirtschaft in Deutschland im Rahmen von Szenarien- und Sensitivitätsanalysen untersucht. Die Beschreibung orientiert sich an der energetischen Wertschöpfungskette (Energieerzeugung und -wandlung, Energiespeicherung und -verteilung sowie Energienutzung). Im Rahmen der Szenarienanalyse (siehe Kapitel 2.3) beschreibt das Nano-Szenario bzw. Bio-Szenario die erwartete Entwicklung. Im Hinblick auf Unsicherheiten bei der zukünftigen technischen Entwicklung neuer Innovationen sowie deren möglicher Marktdurchdringung und Akzeptanz werden jeweils zwei Sensitivitätsanalysen (siehe Kapitel 2.4) durchgeführt. Um einen Ergebniskorridor zu erhalten, erfolgt (im Rahmen der Sensitivitätsanalyse) die Berechnung einer konservativen Entwicklung (Nano - / Bio -) und einer progressiven Entwicklung (Nano + / Bio +). Bei den Sensitivitätsanalysen werden Haupttreiber der Entwicklung, wie z. B. die Marktdurchdringung und Entscheidungsquote, um  $\pm 25\%$  variiert. Die Ergebnisse der Szenarien und Sensitivitätsanalysen werden für die betrachteten Basisinnovationen getrennt (Nanotechnologie siehe Kapitel 7.1 und Biotechnologie siehe Kapitel 7.2) beschrieben. In Kapitel 7.3 erfolgt die zusammenfassende Darstellung der Szenarienergebnisse sowie entsprechende Sensitivitätsanalysen.

### 6.1 Nanotechnologie

Im Rahmen der Szenarioanalyse werden, in Anlehnung an die Berechnung des theoretischen Potenzials in Kapitel 4.4 beschriebenen nanotechnologischen Anwendungen bzw. Technologiefelder entlang der energetischen Wertschöpfungskette (Energieerzeugung, -wandlung, -verteilung, -speicherung und -nutzung) untersucht.

#### 6.1.1 Energieerzeugung, -wandlung, -verteilung und -speicherung

Im Umwandlungssektor werden unterschiedliche bestehende Anwendungen, die durch den Einsatz der Nanotechnologie verbessert werden, aber auch neue, durch die Nanotechnologie erst mögliche bzw. für einen wirtschaftlichen Einsatz weiterentwickelte Anwendungen und Technologien betrachtet. Im Bereich der Solarenergienutzung wird der Einsatz von Antireflexschichten sowie neue, innovative Photovoltaiktechnologien analysiert. Im Bereich der Kraftwerkstechnologien werden der Einsatz von thermoelektronischen Generatoren zur Abwärmenutzung und die Auswirkungen der Verwendung von Nanomembranen bei CCS-Technologien näher untersucht. Darüber hinaus erfolgt die Untersuchung der Auswirkungen durch den Einsatz von Brennstoffzellen in der Hausenergieversorgung (Brennstoffzellenheizgeräte) und im Verkehrsbereich (Brennstoffzellenfahrzeuge).

## Photovoltaik und Solarthermie

Bei der Nutzung der Solarenergie werden unterschiedliche nanotechnologische Anwendungen betrachtet (siehe Kapitel 4.3.1). Einerseits werden bei bestehenden Technologien (Solar Kollektoren, Hochtemperaturreceiver für solarthermische Kraftwerke und konventionelle Photovoltaikzellen) die Auswirkungen einer Oberflächenveredelung der Kollektoren mit Antireflexschichten untersucht und andererseits werden neuartige, innovative Photovoltaiktechnologien (Dünnschichtsolarzellen, Farbstoffsolarzellen, organische Polymerzellen, Stapelsolarzellen, Quantenpunktsolarzellen) analysiert.

### Antireflexschichten

In Kapitel 4.3.1 werden die Grundlagen von nanotechnologischen Antireflexschichten näher erläutert. Da bei Solarzellen ca. 10 % der Sonnenstrahlung (8 % durch Reflexion, 2 % durch Streuung und Absorption) verloren gehen, kann durch den Einsatz von Antireflexschichten der Wirkungsgrad und die Ausbeute gesteigert werden. Bei Photovoltaikmodulen wird davon ausgegangen, dass die Leistung um bis zu 4 Prozentpunkte gesteigert werden kann. Warmwasserkollektoren wird eine Leistungssteigerung von bis zu 6 Prozentpunkten vorhergesagt /Hofmann 2006/. Für die Berechnungen wird davon ausgegangen, dass bei Solarkollektoren eine Wirkungsgradverbesserung um 5,5 Prozentpunkte, bei Photovoltaikzellen um 3,5 Prozentpunkte und bei solarthermischen Kraftwerken um 4 Prozentpunkte möglich ist.

Als Basis der Berechnungen und als Referentwerte dienen die Abschätzungen zur Entwicklung der Solarenergienutzung (Solarthermie, PV, solarthermische Kraftwerke (basiert auf der Idee eines Europäischen Elektrizitätsnetzwerks für erneuerbare Energien)) nach /BMWi 2012, Nitsch et al. 2010/. Es wird bei Solarkollektoren und PV-Anlagen von einer Lebensdauer von 20 Jahren ausgegangen. Hinsichtlich der Marktdurchdringung wird bei Antireflexbeschichtungen davon ausgegangen, dass der Marktanteil von 10 % in 2015 auf 95 % im Jahr 2030 ansteigt. Bei solarthermischen Kraftwerken startet die Effizienzsteigerung im Jahr 2020.

**Tabelle 6.1** zeigt die durch den Einsatz von Antireflexschichten zusätzlich erzeugbare Energiemenge für die Szenarienberechnung (Nano), die beiden Sensitivitätsanalysen (Nano -, und Nano +) sowie die Referenzwerte\* nach /BMWi 2012, Nitsch et al. 2010/. Es wird offensichtlich, dass mit in Summe 4,3 PJ zusätzlicher Energieproduktion im Jahr 2030 im Nano-Szenario die Auswirkungen dieser Technologie bis 2030 nur sehr geringfügig sind.

**Tabelle 6.1:** Zusätzliche Energieproduktion durch den Einsatz von Antireflexschichten und die entsprechenden Referenzwerte nach /BMWi 2012, Nitsch et al. 2010/

	Anwendung	Einheit	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	Solarthermie	Zusätzliche Wärmeproduktion [PJ]	0,0	0,1	0,8	1,5	2,1
	Photovoltaik	Zusätzliche Stromproduktion [PJ]	0,0	0,1	0,3	0,2	0,5
	Solarthermische Kraftwerke	Zusätzliche Stromproduktion [PJ]	0,0	0,0	0,0	0,2	0,5
Nano	Solarthermie	Zusätzliche Wärmeproduktion [PJ]	0,0	0,1	1,0	2,0	2,8
	Photovoltaik	Zusätzliche Stromproduktion [PJ]	0,0	0,1	0,4	0,3	0,7
	Solarthermische Kraftwerke	Zusätzliche Stromproduktion [PJ]	0,0	0,0	0,0	0,4	0,8
Nano +	Solarthermie	Zusätzliche Wärmeproduktion [PJ]	0,0	0,2	1,3	2,5	2,9
	Photovoltaik	Zusätzliche Stromproduktion [PJ]	0,0	0,1	0,5	0,4	0,7
	Solarthermische Kraftwerke	Zusätzliche Stromproduktion [PJ]	0,0	0,0	0,0	0,6	1,3
Referenzwerte*	Solarthermie	Zukünftige Wärmeproduktion [PJ]	21,6	45,1	79,6	126,0	172,3
	Photovoltaik	Zukünftige Stromproduktion [PJ]	27,3	52,1	73,7	82,8	93,1
	Solarthermische Kraftwerke	Zukünftige Stromproduktion [PJ]	0,0	0,0	0,0	34,9	72,7

### Neuartige Photovoltaiktechnologien

Neben der Entwicklung und Verbesserung von herkömmlichen, meist auf Silizium basierenden Solarzellen wird nach /Jopp 2006/ seit einigen Jahren an neuartigen und innovativen Solarzellentechnologien geforscht. Zu diesen Technologien gehören z. B. Dünnschichtsolarzellen, Farbstoffsolarzellen, organische Polymerzellen, Stapelsolarzellen oder Quantenpunkt-solarzellen wobei die Nanotechnologie bei der Entwicklung eine entscheidende Rolle spielt (siehe Kapitel 4.3.1). In der Szenarienanalyse werden folgende Photovoltaiktechnologien betrachtet:

- Dünnschichtsolarzellen (a-Si, CdTe, CIGS)
- Farbstoffsolarzellen
- Organische Polymerzellen
- Stapelsolarzellen
- Quantenpunktsolarzellen

Bei der Betrachtung des Verbreitungsgrades neuartiger Solarzellen werden sowohl Dächer als auch Fassaden als mögliche Nutzflächen berücksichtigt. In der Literatur gibt es dazu unterschiedliche Abschätzungen wie in /Bernreuter 2002/ zusammenfassend dargestellt. Im Rahmen dieser Betrachtung werden Berechnungen von /Kaltschmitt et al. 2006/ für die Szenari-

entwicklung als Grundlage verwendet. Das Flächenpotenzial nach /Kaltschmitt et al. 2006/ ermittelt sich aus den existierenden Dachflächen, einem Teil der Fassadenflächen und dem Teil der landwirtschaftlichen Nutzflächen, der für die Nahrungsmittelproduktion nicht benötigt wird. Potenziell Nutzbare Flächen wie z. B. Gleisüberdachungen, Parkplatzüberdachungen, Arkaden, Vorgärten oder Hauseingänge werden für eine Energieerzeugung als nicht verfügbar angesehen. Im Rahmen der Szenariorechnung wird in Anlehnung an /Kaltschmitt et al. 2006/ davon ausgegangen, dass folgende Potenzialflächen für den Einsatz von innovativen Photovoltaikzellen zur Verfügung stehen:

- Dachflächen: 419 Mio. m<sup>2</sup> (aufgrund der Konkurrenz zur Solarthermie)
- Fassadenflächen: 200 Mio. m<sup>2</sup>

Weitere Freiflächen werden nicht berücksichtigt. Hinsichtlich der erzielbaren Wirkungsgrade neuer Photovoltaiktechnologien wird im Rahmen der Betrachtung davon ausgegangen, dass sich diese in der Zukunft weiter entwickeln werden und sich den aktuell im Labor erreichbaren Werten annähern. Die Berechnung des jährlichen Stromertrages erfolgt nach /Quaschnig 2008/, wobei von einer durchschnittlichen Globalstrahlung in Deutschland von 1.000 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) ausgegangen wird. Gewinne und Verluste durch Neigung als auch der Performance Ratio werden vernachlässigt (vgl. Formel (6.1) und (6.2)).

$$E_{\text{elekt.}} = \frac{H_{\text{solar}} * f_{\text{Neigung}} * P_{\text{MPP}} * PR}{1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} \quad (6.1)$$

mit:

$$P_{\text{MPP}} = A * \eta * 1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \quad (6.2)$$

$E_{\text{elekt.}}$	Jährlicher Stromertrag [kWh/a]
$H_{\text{solar}}$	Jährliche solare Bestrahlung [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]
$f_{\text{Neigung}}$	Gewinne und Verluste durch die Neigung
$P_{\text{MPP}}$	Nennleistung [kW <sub>p</sub> ]
PR	Performance Ratio
A	Nutzbare Fläche [m <sup>2</sup> ]
$\eta$	Wirkungsgrad

**Tabelle 6.2** fasst die für das Nano-Szenario verwendeten Werte zum prozentualen Anteil am Flächepotenzial sowie der zukünftigen Entwicklung der Zellenwirkungsgrade zusammen. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass in 2030 jeweils 25 % des Flächenpotenzi als der Dächer und Fassaden durch die betrachteten neuen Photovoltaiktechnologien genutzt werden können. Bei den Dünnschichtsolarzellen wird den CdTE-Dünnschichtsolarzellen aufgrund des darin verwendeten giftigen Cadmiums ein geringeres Entwicklungspotenzial unter-



stellt. Das größte Verbreitungspotenzial, trotz geringerer Wirkungsgrade, wird für Farbstoffsolarmzellen gesehen, da diese kostengünstig hergestellt werden können. Die Anwendung von Stapel- und Quantenpunktsolarmzellen wird primär auf Dachflächen gesehen. Aufgrund des hohen technischen Aufwands und den damit verbundenen Kosten, können auf günstig ausgerichteten Dachflächen die größten Erträge erzeugt werden. Je nach zukünftiger Entwicklung dieser Technologien, ist der Einsatz auf Fassaden ebenfalls denkbar (vgl. auch Kapitel 4.3.1).

**Tabelle 6.2:** Entwicklung des prozentualen Anteils am Flächenpotenzial und der Wirkungsgrade für unterschiedliche Photovoltaiktechnologien (Nano-Szenario)

[%]		2010	2015	2020	2025	2030
a-Si-Dünnschichtsolarmzellen	Dach	0,0	1,3	2,5	3,8	5,0
	Fassade	0,0	1,3	2,5	3,8	5,0
	$\eta$	6,0	8,3	10,5	12,8	15,0
CdTe-Dünnschichtsolarmzellen	Dach	0,0	0,6	1,3	1,9	2,5
	Fassade	0,0	0,8	1,5	2,3	3,0
	$\eta$	8,0	10,1	12,3	14,4	16,5
CIGS-Dünnschichtsolarmzellen	Dach	0,0	1,3	2,5	3,8	5,0
	Fassade	0,0	1,3	2,5	3,8	5,0
	$\eta$	11,8	13,9	15,9	18,0	20,0
Farbstoffsolarmzellen	Dach	0,0	1,8	3,5	5,3	7,0
	Fassade	0,0	1,8	3,5	5,3	7,0
	$\eta$	5,0	7,0	9,0	11,0	13,0
Organische Polymerzellen	Dach	0,0	0,6	1,3	1,9	2,5
	Fassade	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0
	$\eta$	5,0	6,3	7,5	8,8	10,0
Stapelsolarmzellen	Dach	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0
	Fassade	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\eta$	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Quantenpunktsolarmzellen	Dach	0,0	0,3	0,5	0,8	1,0
	Fassade	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\eta$	10,0	13,8	17,5	21,3	25,0

Basierend auf der Entwicklung der Zellenwirkungsgrade und der Marktdurchdringung der einzelnen Technologien stellt **Tabelle 6.3** die mögliche zusätzliche Energieproduktion basierend auf dem Einsatz der beschriebenen neuen Photovoltaiktechnologien für das Nano-Szenario und die beiden Sensitivitätsanalysen (Nano -, Nano +) bis zum Jahr 2030 dar. Es zeigt sich, dass Dünnschichtsolarmzellen das größte Potenzial für eine zusätzliche Stromproduktion (49 PJ) in der Zukunft aufweisen, da sich die anderen Technologien erst am Beginn ihrer jeweiligen Entwicklung befinden. Insgesamt kommt das Nano-Szenario zu einer möglichen zusätzlichen Stromproduktion von 87 PJ. Es jedoch möglich, dass durch technische Fortschritte die Bedeutung der untersuchten Technologien in der Zukunft stärker ausfällt, als dies im Nano-Szenario der Fall ist. Bei einer progressiven Entwicklung könnte die zusätzliche Stromproduktion um über 55 % auf ca. 136 PJ erhöht werden.

**Tabelle 6.3:** Zusätzliche Energieproduktion durch den Einsatz neuartiger Photovoltaiktechnologien

	Zusätzliche Stromproduktion [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	a-Si Dünnschichtsolarzellen	0,0	1,3	3,3	6,0	9,4
	CdTe Dünnschichtsolarzellen	0,0	0,8	2,0	3,6	5,5
	CIGS Dünnschichtsolarzellen	0,0	2,2	5,0	8,4	12,5
	Farbstoffsolarzellen	0,0	1,5	3,9	7,2	11,4
	Organische Solarzellen	0,0	0,6	1,4	2,5	3,7
	Stapelsolarzellen	0,0	0,5	1,3	2,2	3,4
	Quantenpunktsolarzellen	0,0	0,6	1,5	2,7	4,2
Nano	a-Si Dünnschichtsolarzellen	0,0	2,3	5,8	10,7	16,7
	CdTe Dünnschichtsolarzellen	0,0	1,5	3,6	6,4	9,8
	CIGS Dünnschichtsolarzellen	0,0	3,9	8,9	15,0	22,3
	Farbstoffsolarzellen	0,0	2,7	7,0	12,9	20,3
	Organische Solarzellen	0,0	1,0	2,5	4,4	6,7
	Stapelsolarzellen	0,0	0,9	2,3	4,0	6,0
	Quantenpunktsolarzellen	0,0	0,8	1,9	3,6	5,6
Nano +	a-Si Dünnschichtsolarzellen	0,0	3,6	9,1	16,6	26,1
	CdTe Dünnschichtsolarzellen	0,0	2,3	5,7	10,0	15,3
	CIGS Dünnschichtsolarzellen	0,0	6,0	13,8	23,4	34,8
	Farbstoffsolarzellen	0,0	4,3	11,0	20,1	31,7
	Organische Solarzellen	0,0	1,6	3,9	6,8	10,4
	Stapelsolarzellen	0,0	1,5	3,5	6,2	9,4
	Quantenpunktsolarzellen	0,0	1,2	3,0	5,5	8,7

### Brennstoffzellen

Im Rahmen der Betrachtungen werden zum stationären Einsatz von Brennstoffzellen (siehe auch Kapitel 4.3.1) so genannte Brennstoffzellenheizgeräte untersucht. Brennstoffzellenheizgeräte (BZH) setzen sich aus einer Brennstoffzelle, einem Gaszusatzbrenner sowie einem Wärmespeicher zusammen. Beim Einsatz eines BZH erfolgt neben der Deckung des Wärmebedarfs auch eine Produktion von Strom, der als Eigenstrom selbst genutzt werden kann. Eine BZH-Anlage ist jedoch auch an das öffentliche Stromnetz gekoppelt. Je nach Betriebsweise und des aktuellen Strombedarfs erfolgt ein Strombezug oder eine Stromeinspeisung in das Netz. Im KWK-Betrieb<sup>59</sup> sind bei stationären Brennstoffzellen Gesamtwirkungsgrade von über 90 % möglich /IEA 2005/. Bei der Strom- und Wärmeerzeugung in stationären Brennstoffzellen ist es technisch möglich neben Wasserstoff auch Brenngas, kurz- und mittelfristig vor allem Erdgas einzusetzen /Edel 2003, 2006/.

Um die möglichen Auswirkungen des Einsatzes von BZH-Anlagen zu untersuchen, wird in einem ersten Schritt das technische Potenzial für BZH ermittelt. Diese können entweder als Ersatz für einen Gas-Brenner (Ersatzinvestition) im erdgasversorgten Gebäudebestand in Frage kommen oder auch Heizungsanlagen mit anderen Energieträgern ersetzen (Energieträgerwechsel). Ein weiteres Potenzial stellt der erdgasversorgte Neubau dar. Hinsichtlich der Gebäudestruktur wird in Einfamilien-, Zweifamilien- und Mehrfamilienhäuser unterschieden.

<sup>59</sup> Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bedeutet, dass neben Strom auch Wärme produziert und genutzt wird

Aufgrund der verschiedenen Leistungsgrößen von BZH gibt es kaum Objekte mit Heizwärmebedarf, die nicht für den Einsatz einer Brennstoffzelle geeignet sind /Gummert et al. 2006/. Unter Berücksichtigung der Lebensdauer von Heizungsanlagen (20 Jahre für Heizkessel inklusive Peripheriekomponenten) und der Entscheidungsquote für BZH ergibt sich dann die jährliche Anzahl an zusätzlich installierten BZH-Anlagen. Durch Angaben zum Energiebedarf der Haushalte (vgl. **Tabelle 6.4**) und technischen Parametern (vgl. **Tabelle 6.5**) von BZH-Anlagen werden die Eingabegrößen ergänzt und ermöglichen die Berechnung der Auswirkungen von BZH-Anlagen auf den zukünftigen Energiebedarf in Deutschland.

Die verwendeten Energiebedarfskennwerte beruhen auf Referenzgebäuden für Einfamilien-, Zweifamilien- und Mehrfamilienhäuser. Bei Mehrfamilienhäusern wird ein Gebäudetyp mit 6 Wohneinheiten ausgewählt. Um eine Sanierung der Gebäude und damit einen sinkenden Energieverbrauch zu berücksichtigen, wird angenommen, dass im Durchschnitt 1 % des jeweiligen Bestands im Jahr energetisch saniert wird /Krewitt et al. 2004/. Nach der Renovierung werden diese Gebäude dem Neubau zugerechnet. Daher wird unter einer Sanierung eine Angleichung an den jeweils aktuellen bauphysikalischen Gebäudestandard verstanden /Köhler et al. 2005/. Nach /IBZ 2010/ weisen die in BZH verwendeten Zusatzbrenner (Brennwerttechnik) Normnutzungsgrade von ca. 109 %<sup>60</sup> auf. Im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen wird für den bei einem BZH notwendigen Zusatzbrenner daher ein Wirkungsgrad von 90 %<sup>61</sup> angenommen.

**Tabelle 6.4:** Spezifischer Heizwärme-, Warmwasser -und Strombedarf von Haushalten /Blesl et al. 2010, EA-NRW 2006, Jungbluth 2007/

	Gebäudetyp	Heizwärmebedarf	Warmwasserbedarf	Wärmebedarf	Strombedarf
		[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]
Bestand	EFH	20.300	1.800	22.100	3.500
	ZFH	26.400	3.500	29.900	5.300
	MFH	56.800	10.300	67.100	14.800
Neubau	EFH	9.100	1.800	10.900	3.500
	ZFH	13.600	3.500	17.100	5.300
	MFH	24.900	10.300	35.200	14.800

**Tabelle 6.5:** Technische Anlagenparameter von BZH /BINE 2012, Gsellmann et al. 2010, Gummert et al. 2006, Jungbluth 2007, Pohl et al. 2005, Vaillant 2007/

Gebäudetyp	Elektrische Nennleistung	Vollastbenutzungsstunden	Stromkennzahl	Gesamtnutzungsgrad
	[kW <sub>el</sub> ]	[h/a]	[s]	[%]
EFH	1,0	5.000	0,4	85 %
ZFH	1,5	5.000	0,4	85 %
MFH	3,5	5.000	0,4	85 %

<sup>60</sup> Normnutzungsgrad auf Heizwert bezogen

<sup>61</sup> Wirkungsgrad auf Brennwert bezogen

Hinsichtlich der Marktdurchdringung wird eine Differenzierung nach Gebäudetypen, Einfamilien- (EFH), Zweifamilien- (ZFH) und Mehrfamilienhaus (MFH), sowie nach Neubau und Gebäudebestand vorgenommen (siehe **Tabelle 6.6**). Nach /Edel 2006/ ist bei BZH zur Hausenergieversorgung bei Einfamilien- und Zweifamilienhäusern eine schnellere Verbreitung zu erwarten. Als Grund hierfür wird die Problematik der abnahmegerechten Zurechnung bei der Erzeugung von Wärme und Strom auf die einzelnen Wohneinheiten eines Gebäudes genannt.

**Tabelle 6.6:** Marktdurchdringung für BZH im Gebäudebestand und im Neubau

		Bestand			Neubau		
		EFH	ZFH	MFH	EFH	ZFH	MFH
2010	Nano -	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0%
	Nano	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0%
	Nano +	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0%
2015	Nano -	2,3 %	2,3 %	1,1 %	6,8 %	6,8 %	1,1%
	Nano	3,0 %	3,0 %	1,5 %	9,0 %	9,0 %	1,5%
	Nano +	3,8 %	3,8 %	1,9 %	11,3 %	11,3 %	1,9%
2020	Nano -	6,8 %	6,8 %	3,4 %	20,3 %	20,3 %	3,4 %
	Nano	9,0 %	9,0 %	4,5 %	27,0 %	27,0 %	4,5 %
	Nano +	11,3 %	11,3 %	5,6 %	33,8 %	33,8 %	5,6 %
2025	Nano -	20,3 %	20,3 %	10,1 %	22,5 %	22,5 %	10,1 %
	Nano	27,0 %	27,0 %	13,5 %	30,0 %	30,0 %	13,5 %
	Nano +	33,8 %	33,8 %	16,9 %	37,5 %	37,5 %	16,9 %
2030	Nano -	22,5 %	22,5 %	11,3 %	24,0 %	22,5 %	11,3 %
	Nano	30,0 %	30,0 %	15,0 %	32,0 %	30,0 %	15,0 %
	Nano +	37,5 %	37,5 %	18,8 %	40,0 %	37,5 %	18,8 %

**Tabelle 6.7** stellt die Ergebnisse des Nano-Szenarios und der Sensitivitätsanalysen für den Einsatz von Brennstoffzellenheizgeräten bis 2030 dar. Durch BZH könnten bis 2030 im Nano-Szenario ca. 81 PJ an Energie im Bereich der Haushalte eingespart werden.

**Tabelle 6.7:** Energieeinsparung durch den Einsatz von BZH im Haushaltsbereich

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	2,1	9,7	30,8	61,0
Nano	0,0	2,8	12,9	41,1	81,4
Nano +	0,0	3,5	16,1	51,4	101,7

Neben dem stationären Einsatz können Brennstoffzellen auch in mobilen Anwendungen genutzt werden. Der Einsatz von Brennstoffzellen in Fahrzeugen wird von vielen Automobilherstellern schon lange erforscht und verfolgt. Nach /Strategierat 2006/ leisten Brennstoffzellenfahrzeuge bei erfolgreicher Markteinführung einen Beitrag zur Versorgungssicherheit, zur Effizienzsteigerung und zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, wird die Nanotechnologie bereits heute in Brennstoffzellenanwendungen eingesetzt (z. B. nanostrukturierte Platin-Katalysatoren) und sie wird auch in Zukunft zur weiteren Leistungssteigerung und Kostensenkungen beitragen können.

In der Szenarioberechnung wird von einem technischen Potenzial von 100 % aller Fahrzeuge in Deutschland ausgegangen und die Brennstoffzellenfahrzeuge substituieren dabei zum gleichen Teil Otto- und Dieselmotoren bei Neufahrzeugen. Der Eintritt von Brennstoffzellenfahrzeugen in den Massenmarkt wird für das Jahr 2020 mit 0,1 % Anteil an der gesamten Fahrzeugflotte angenommen. Der Marktanteil steigt bis 2030 auf 1 % an. Als Referenzfahrzeug dient ein Forschungsfahrzeug der Daimler AG (F 600 Hygenius), bei dem eine Brennstoffzelle mit einer Leistung von 80 kW eingesetzt wird, ergänzt durch einen 300 V Lithium-Ionen-Akkumulator. Der Wasserstoffverbrauch beträgt umgerechnet 2,9 Liter Diesel auf 100 Kilometer /Daimler 2010a, Geitmann 2005/.

**Tabelle 6.8** zeigt die möglichen Auswirkungen durch den Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen für die Szenarien- und Sensitivitätsanalysen bis 2030. Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass die mögliche Energieeinsparung durch den Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen zwischen 7,4 und 13,3 PJ variieren könnte.

**Tabelle 6.8:** Energieeinsparung durch den Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	0,1	0,7	3,0	7,4
Nano	0,0	0,1	1,0	4,1	10,2
Nano +	0,0	0,2	1,4	5,4	13,3

### Kraftstoffadditiv Ceroxid

Die Grundlagen zur möglichen Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz des Additivs Ceroxid werden in Kapitel 4.3.1 dargestellt. Darauf aufbauend wird das Energieeinsparpotenzial abgeschätzt. Nach /Wilk 2006/ kann Ceroxid technisch in allen Diesel-Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Daher wird von einem technischen Potenzial für Dieselfahrzeuge von 100 % ausgegangen. Aufgrund von Unsicherheiten über die Anwendungsmöglichkeit bei Ottofahrzeugen wird das technische Potenzial auf 50 % reduziert und der mögliche Einsatz um 5 Jahre verzögert. Die möglichen Kraftstoffeinsparungen werden in einem Bereich von 2 bis 9 % variiert. Für Dieselfahrzeuge wird davon ausgegangen, dass bereits in 2015 ca. 10 % aller Dieselfahrzeuge Ceroxid als Kraftstoffadditiv nutzen. Im Jahr 2030 steigt der Marktanteil auf 50 % an vgl. **Tabelle 6.9**). Durch den Einsatz des Kraftstoffadditivs Ceroxid könnte im Nano-Szenario in 2030 ca. 35 PJ eingespart werden.

**Tabelle 6.9:** Marktdurchdringung und Energieeinsparung für den Einsatz des Kraftstoffadditivs Ceroxid

		Marktdurchdringung		Energieeinsparung [PJ]
		Diesel	Benzin	
2010	Nano -	0,0%	0,0%	0,0
	Nano	0,0%	0,0%	0,0
	Nano +	0,0%	0,0%	0,0
2015	Nano -	7,5%	0,0%	1,0
	Nano	10,0%	0,0%	3,9
	Nano +	12,5%	0,0%	8,0
2020	Nano -	15,0%	7,5%	3,2
	Nano	20,0%	10,0%	11,7
	Nano +	25,0%	12,5%	24,1
2025	Nano -	26,3%	15,0%	6,1
	Nano	35,0%	20,0%	22,4
	Nano +	43,8%	25,0%	45,7
2030	Nano -	37,5%	26,3%	9,5
	Nano	50,0%	35,0%	34,8
	Nano +	62,5%	43,8%	70,9

### Nanostrukturierte Membranen zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung

In Kapitel 4.3.1 werden eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten von nanostrukturierten Membranen beschrieben. Im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalyse werden die möglichen Auswirkungen des Einsatzes einer Nanomembran zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung untersucht. Bei CCS-Technologien treten aufgrund des höheren Eigenenergiebedarfs des Kraftwerks Wirkungsgradverluste auf, woraus ein erhöhter Primärenergieeinsatz resultiert. Gegenüber chemischen Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung haben Membranverfahren jedoch den Vorteil, dass bei ihnen mit geringeren Wirkungsgradverlusten gerechnet werden kann. /Birnbauer et al. 2010/ gehen davon aus, dass sich der Nettowirkungsgrad von Kohlekraftwerken durch CCS um ca. 10 bis 14 Prozentpunkte verringert. Dies führt entsprechend zu einer Erhöhung des Eigenenergiebedarfs des Kraftwerks von ca. 15 bis 30 %. Durch technologische Weiterentwicklungen, speziell der Verbesserung von Gas-Trennmembranen, wird beim Einsatz von Nanomembranen mit einem geringeren Wirkungsgradverlust gerechnet. Nach /ETAP 2007/ soll die Erhöhung des Eigenenergieverbrauchs auf 8 % verringert werden. Daraus resultiert eine Verringerung des Wirkungsgrades um ca. 3 Prozentpunkte. Auch /Birnbauer et al. 2010, Viebahn et al. 2010/ gehen davon aus, dass zukünftig Wirkungsgradverluste von 4 bis 8 Prozentpunkten erreichbar sind (siehe auch Kapitel 4.3.1).

Die Szenarien- und Sensitivitätsbetrachtungen erfolgen aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsgrade konventioneller Kraftwerke getrennt nach Steinkohle-, Braunkohle- und Erdgaskraftwerken. Darüber hinaus kann dadurch eine unterschiedliche Marktdurchdringung von CCS bei den einzelnen Kraftwerkstechnologien in die Berechnung integriert werden. Bei der Verbreitung der CCS-Technologie wird davon ausgegangen, dass diese bei Kohlekraftwerken schneller eingesetzt wird als bei Erdgaskraftwerken. Für Stein- und Braunkohle-



kraftwerke wird davon ausgegangen, dass bereits im Jahr 2015 2 % der Kraftwerke mit CCS Technologien ausgestattet sind. Dieser Wert steigt auf 70 % im Jahr 2030 an. Ein Grund, warum Erdgaskraftwerke später mit CCS Technologien ausgerüstet werden, ist z. B., dass bereits der Brennstoff Erdgas weniger CO<sub>2</sub> erzeugt und die spezifischen Kosten der CO<sub>2</sub>-Abtrennung dadurch höher ausfallen als dies bei kohlebefeueten Kraftwerken der Fall ist. Daher wird für Erdgaskraftwerke davon ausgegangen, dass im Jahr 2020 5 % der Kraftwerke und im Jahr 2030 60 % der Kraftwerke mit nanostrukturierten Membranen zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung ausgestattet sind.

Basierend auf der zukünftigen Stromproduktion, den Wirkungsgradminderungen und der Verbreitungsquote von CCS-Technologien ergibt sich eine mögliche Erhöhung des Primärenergiebedarfs durch den Einsatz dieser Technologien und es kann abgeschätzt werden, welchen Möglichkeiten die Nanotechnologie hier bieten könnte. **Tabelle 6.10** zeigt die zu erwarteten Primärenergieeinsparungen durch den Einsatz von nanostrukturierten Membranen bei CCS im Vergleich zu konventionellen Technologien mit einer Reduktion des Nettowirkungsgrads um 8 Prozentpunkte. Durch den Einsatz der Nanotechnologie könnte der Primärenergieverbrauch beim Einsatz von CCS Technologien um rund 260 PJ reduziert werden (Nano-Szenario).

**Tabelle 6.10:** Reduktion des Primärenergieverbrauchs durch den Einsatz von nanostrukturierten Membranen für CCS

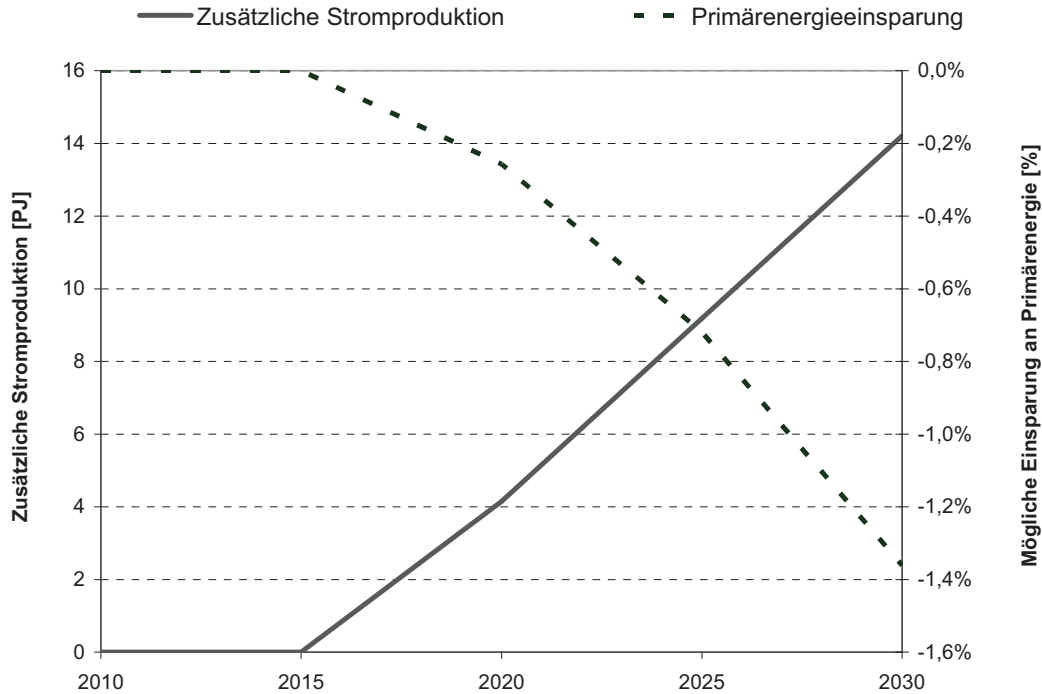
Reduktion des Primärenergieverbrauchs [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	6,4	57,0	109,1	195,2
Nano	0,0	8,5	76,0	145,5	260,2
Nano +	0,0	10,7	95,0	181,9	325,3

### Thermoelektrische Generatoren

Der Wirkungsgrad thermoelektrischer Generatoren liegt nach /Fröhlich 2007/ bei etwa 5 bis 10 %. Durch den Einsatz nanostrukturierter Materialien erhofft man sich Effizienzverbesserungen von 50 bis 200 % /UH 2008/. Nach /Bachmann et al. 2007/ konnte mit einer Legierung aus Blei, Tellur und Nanopartikeln aus Silber und Antimon bei einer Temperaturdifferenz von 600 °C eine Umsetzung der Wärmeenergie in Elektrizität mit einer Effizienz von 18 % erreicht werden. Denkbar ist daher die Anwendung solcher thermoelektrischer Generatoren in Kraftwerken aber auch im Automobilbereich (siehe auch Kapitel 4.3.1).

Im Rahmen der Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von thermoelektrischen Generatoren in Kraftwerken werden alle konventionellen Kraftwerke einbezogen. Die nutzbare Abwärme ergibt sich aus dem jeweiligen Wirkungsgrad des Kraftwerks. Es wird davon ausgegangen, dass nur 70 % der anfallen Abwärme der Kraftwerke auch zur Stromproduktion den thermoelektrischen Generatoren zur Verfügung steht. Da bestehende thermoelektrische Generatoren noch nicht im großen Maßstab zur Verfügung stehen, wird im Rahmen der Berechnungen der Wirkungsgrad der Generatoren mit 3 bzw. 5 % angenommen, was unter den nach /Bachmann et al. 2007/ bereits erreichbaren Werten liegt. Hinsichtlich einer möglichen Marktdurchdringung wird eine positive Entwicklung unterstellt. Bereits im Jahr 2020 sind 5

% der Kraftwerke mit thermoelektrischen Generatoren ausgerüstet und dieser Wert steigt bis zum Jahr 2030 auf 30 % an. **Abbildung 6.1** stellt die mögliche zusätzliche Stromproduktion sowie die damit verbundene Primärenergieeinsparungen dar.



**Abbildung 6.1:** Mögliche Auswirkungen durch den Einsatz von thermoelektrischen Generatoren auf die Stromproduktion und die Primärenergieeinsparung

**Tabelle 6.11** fasst die Entwicklung der zusätzlichen Stromproduktion durch den Einsatz von thermoelektrischen Generatoren in konventionellen Kraftwerken für die Szenarien- und Sensitivitätsanalysen bis 2030 zusammen. Je nach Entwicklung könnten dadurch 11 bis 18 PJ Strom zusätzlich erzeugt werden.

**Tabelle 6.11:** Zusätzliche Stromproduktion durch thermoelektrische Generatoren

Zusätzliche Stromproduktion [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	0,0	3,1	6,9	10,7
Nano	0,0	0,0	4,1	9,2	14,2
Nano +	0,0	0,0	5,2	11,5	17,8

Neben der bereits beschriebenen Einsatzmöglichkeit von thermoelektrischen Generatoren (TEG) in Kraftwerken ist deren Einsatz auch im Abgasstrang von Automobilen denkbar. Nach /Paschen et al. 2004/ ist ihr Einsatz am Motor, in der Abgasanlage oder am Katalysator denkbar. Bereits 2012 sollten nach /Pester et al. 2009/ thermoelektrische Generatoren im Automobilbereich eingesetzt werden und aus Abgashitze Strom zur Einspeisung ins Bordnetz gewinnen. Dabei wird davon ausgegangen, dass der thermoelektrische Generator bis zu 250 W aus dem heißen Abgas der Abgasrückführung erzeugen kann, wodurch mit einer Kraftstoffeinsparung von 2 % gerechnet wird. Im Rahmen der Berechnung wird die mögliche Kraftstoffeinsparung im Bereich von 1,1 bis 2 % variiert. Bei Otto- und Dieselfahrzeu-

gen wird von einem 100 % technischen Potenzial für den Einsatz von TEG in Neufahrzeugen ausgegangen. Da mit ersten Fahrzeugen, die mit TEG ausgestattet sein werden, erst nach 2012 gerechnet wird, erfolgt in der Betrachtung der Markteintritt dieser Technologie im Jahr 2015. Es wird daher davon ausgegangen, dass in 2020 bereits 2 % und in 2030 40 % der Neufahrzeuge thermoelektrische Generatoren zur Stromproduktion aus der Abgashitze nutzen. Bis 2030 könnte dadurch der Energieverbrauch im Verkehrssektor um 1,1 PJ reduziert werden (vgl. **Tabelle 6.12**).

**Tabelle 6.12:** Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz von thermoelektrischen Generatoren in Fahrzeugen

Kraftstoffeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	0,0	0,1	0,5	0,8
Nano	0,0	0,0	0,1	0,7	1,1
Nano +	0,0	0,0	0,2	0,9	1,4

### Superkondensatoren in Hybridbussen

In konventionellen Linienbussen mit mechanischen Bremssystemen wird die kinetische Energie beim Bremsen nicht genutzt. Bei einem elektrisch abgebremsten Bus kann die zurück gewonnene Bremsenergie in Superkondensatoren gespeichert und zum erneuten Anfahren verwendet werden. Dadurch lassen sich der Kraftstoffverbrauch, die Anfahrgeräusche und die Emissionen reduzieren. Aufgrund ihrer technischen Eigenschaften sind Superkondensatoren für diesen Einsatzzweck anderen Energiespeichern überlegen /MAN 2005/ (siehe auch Kapitel 4.3.2).

Das technische Potenzial setzt sich aus dem Fahrzeugbestand an Kraftomnibussen in Deutschland zusammen und es wird eine durchschnittliche Lebensdauer von 12 Jahren angenommen. Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch konventioneller Linienbusse beträgt 1.346,7 MJ/100 km /Alber 2006, UBA\_CH 2004/. In Abhängigkeit des Einsatzes (Linienführung, Anzahl der Haltestellen, etc.) sind durch Superkondensatoren Kraftstoffeinsparungen von ca. 20 bis 25 % möglich. Dieses große Einsparpotenzial wird zu ca. 80 % von der Bremsenergie rückgewinnung bestimmt /Fischle 2005, Kreschl et al. 2005/.

Im Rahmen der Berechnung wird die Kraftstoffeinsparung in einem Bereich von 20 bis 25 % variiert und es wird davon ausgegangen, dass in 2015 3,5 % sowie in 2030 9 % der Linienbusse in Deutschland mit Hybridtechnik und Superkondensatoren ausgestattet sind. **Tabelle 6.13** zeigt die dadurch möglichen Kraftstoffeinsparungen bis zum Jahr 2030.

**Tabelle 6.13:** Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz von Superkondensatoren in Hybridbussen

Kraftstoffeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5
Nano	0,0	0,1	0,2	0,5	0,8
Nano +	0,0	0,1	0,3	0,7	1,1

Ähnliche Kraftstoffeinsparungen in der Größenordnung von 20 bis 30 % werden nach /Daimler 2009, 2010b, 2011/ auch bei einem im Testbetrieb eingesetzten Hybridbus erreicht.

Dieses Konzept setzt als Energiespeicher einen Lithium-Ionen-Akkumulator mit einer Leistung von 240 kW und einem Gewicht von 350 kg ein. Im Gegensatz zum Einsatz von Superkondensatoren ermöglicht dieses Konzept einen vollelektrischen Betrieb von bis zu 5 km im Innenstadtbereich. Auch nach /Wolf 2011/ sind durch den Einsatz von Superkondensatoren in Hybrid-Lkw insbesondere im Auslieferungsbetrieb mit häufigen Start-Stopp-Sequenzen Kraftstoffeinsparungen von bis zu 30 % möglich.

### 6.1.2 Energienutzung

Im Bereich der Energienutzung (vgl. auch Kapitel 4.3.3) wird z. B. der Einsatz von innovativen Beleuchtungstechnologien (LED und OLED) und OLED-Displays untersucht. Im Baubereich werden die Möglichkeiten von hochfestem Beton und Dämmmaterialien analysiert und mögliche nanotechnologische Anwendungen mit Relevanz für den Verkehrssektor sind die Verwendung von Polycarbonat für die Automobilverschiebung, der Einsatz von Nanolacken, Nanofüllstoffe in Reifen sowie reibungsreduzierende Beschichtungen. Weitere nanotechnologische Anwendungen und Prozesse, die im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen untersucht werden, sind Nanokatalysatoren sowie der Einsatz von Nanopartikeln in der Kunststoffproduktion.

### Beleuchtungstechnologien

Im Bereich neuartiger Beleuchtungstechnologien basierend auf der Nanotechnologie wird der Einsatz von LED und OLED (siehe auch Kapitel 4.3.3) im Rahmen der Szenarioanalyse betrachtet. Dabei erfolgt die Untersuchung für die Sektoren Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistung sowie für den Sektor Haushalte. Der Einsatz von LED und zukünftig von OLED als Alternative zu konventionellen Lichtquellen wird seit einiger Zeit diskutiert, da angenommen wird, dass LED effizienter für die Lichterzeugung genutzt werden können /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/. Leuchtquellen für die Allgemeinbeleuchtung<sup>62</sup> lassen sich in die drei Lampenarten Glühlampen, Entladungslampen (Nieder- und Hochdruckentladungslampen), LED und zukünftig OLED unterscheiden. Zur Gruppe der Niederdruckentladungslampen zählen Leuchtstoff- und Energiesparlampen. Grundsätzlich gibt es für die Verbreitung neuer Beleuchtungstechnologien keine technischen Restriktionen. Da Hochdruckentladungslampen bereits sehr hohe Wirkungsgrade aufweisen /Jüstel 2006a/, werden sie aus dem substituierbaren Potenzial für diese Betrachtung ausgeschlossen.

Zunächst wird das Potenzial für eine Substitution konventioneller Lampen durch LED und OLED bestimmt (siehe auch Kapitel 2.3 und **Abbildung 2.4**). Um eine allgemeine Vergleichbarkeit einzelner Technologien zu erreichen, wird, aufbauend auf dem Substitutionspotenzial, der Energieverbrauch je Lampenart bestimmt. Hierzu wird die Lichtmenge pro Lebenszyklus aus der spezifischen Lebensdauer und einem gemittelten Lichtstrom errechnet. In Verbindung mit einer festgelegten Bezugslichtmenge erhält man den Lampenbedarf je Be-

<sup>62</sup> Straßen- und Signalbeleuchtung ist nicht Inhalt der Betrachtung, da die LED-Technologie in diesem Bereich bereits in einer Vielzahl von Pilotprojekten eingesetzt wird (siehe z. B. /BMBF 2009/)

leuchtungstechnologie. Darauf aufbauend ergibt sich der Energieverbrauch der einzelnen Lampenarten. Die Veränderung des Energieverbrauchs ergibt sich durch Multiplikation des Energieverbrauchs je Lampenart mit der Energieeinsparung je Leuchtmittel.

Angaben zu den technischen Daten der Beleuchtungstechnologien und deren zukünftige Entwicklung sowie die Grundlagen der Szenarienrechnung sind in **Tabelle 6.15** zusammengefasst. Die Daten basieren auf /Jüstel 2006b, OLLA 2009, Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/. Nach /OLLA 2009/ sind OLED mit einer Lebensdauer von über 10.000 Stunden bei einer Effizienz bzw. Lichtausbeute von 50 lm/W bereits realisiert. Um auf dem Massenmarkt bestehen zu können, sind jedoch Lichtausbeuten von 100 lm/W und eine Lebensdauer von 100.000 Stunden notwendig, die im Rahmen eines Forschungsprojektes erreicht werden sollen /OLED100 2009, 2011/. In der Szenarienbetrachtung wird das Verbot der Glühlampe ab 2012 implementiert, indem von einer vollständigen Umstellung auf Energiesparlampen ab 2015 ausgegangen wird.

Der Ersatz von konventionellen Beleuchtungstechnologien durch LED könnte nach dem Ergebnis der Szenariorechnung bis 2030 zu Energieeinsparungen von ca. 115 PJ führen (vgl. **Tabelle 6.14**). Zusätzliche 38 PJ könnten durch den zukünftigen Einsatz von OLED eingespart werden. Als Ergebnis der Sensitivitätsanalysen kann festgestellt werden, dass neuartige Beleuchtungstechnologien wie LED und OLED das Potenzial haben, bis 2030 zwischen 91 PJ und 175 PJ einzusparen.

**Tabelle 6.14:** Energieeinsparungen durch den Einsatz von LED und OLED in der Allgemeinbeleuchtung

	Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	LED	0,0	21,8	32,3	57,4	90,9
	LED und OLED	0,0	21,8	36,2	70,8	124,8
Nano	LED	0,0	23,0	37,0	70,5	115,2
	LED und OLED	0,0	23,0	42,0	86,4	153,1
Nano +	LED	0,0	24,2	41,8	83,6	134,3
	LED und OLED	0,0	24,2	47,6	101,1	174,5

LEDs werden bereits seit einiger Zeit auch im Automobilbereich angewendet. Aufgrund der hohen Lebensdauer, der Designflexibilität sowie der Möglichkeit zur Energieeinsparung ist der Einsatz von LED-Leuchtmitteln im Automobilbereich interessant /Schiermeister et al. 2003/. Ihr breiter Einsatz in der Frontbeleuchtung steht jedoch noch bevor. Der Anteil der Beleuchtung des Verkehrssektors am Endenergieverbrauch beträgt 15,7 PJ (Stand 2008 /BMWi 2012/).

**Tabelle 6.15:** Technische Parameter von konventionellen Beleuchtungstechnologien und zukünftige Entwicklungen von LED und OLED

Technische Parameter und Rahmenannahmen	Einheit	Glühlampe	Energiesparlampe/ Leuchtstoffröhre	LED					OLED									
				2010	2015	2020	2025	2030	2010	2015	2020	2025	2030					
Leistungsaufnahme	W	75	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
Lebensdauer	h	1.000	13.000	15.000					10.000					100.000				
Lichtstrom gemittelt	lm	898	900	30	100	150	200	200	220	220	50	80	100	150	200			
Lichtausbeute lm/W	lm/W	12	60	30	100	150	200	200	220	220	50	80	100	150	200			
Lichtmenge pro Lebenszyklus	Mlmh	0,9	11,7	0,5	1,5	2,3	3,0	3,0	3,3	3,3	0,5	1,2	10,0	15,0	20,0			
Bezugslichtmenge (BLM) (Vergleichbarkeit)	Mlmh	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7			
Lampenbedarf für BLM	Stück	13,0	1,0	26,0	7,8	5,2	3,9	3,9	3,5	3,5	23,4	9,8	1,2	0,8	0,6			
Energieverbrauch für BLM	kWh	978	195	390	117	78	59	59	53	53	234	146	117	78	59			



Das Abblendlicht, an das sowohl das Standlicht, die Kenzeichenbeleuchtung und die Schlussleuchten gekoppelt sind, hat bei einem Pkw bisher eine Leistung von 110 W. Der dadurch resultierende Verbrauch beim Einsatz von konventionellen Glühlampen beträgt bei Ottomotoren 0,207 l/100 km und bei Dieselmotoren 0,142 l/100 km /BAST 2006/. Durch den Einsatz von LED-Leuchtmitteln in Frontscheinwerfern mit Abblendlicht-Funktion lässt sich der Energieverbrauch der Beleuchtung im Pkw um ca. 39 % reduzieren (siehe auch /Hamm 2006/), wodurch sich der Anteil der Beleuchtung am Kraftstoffverbrauch auf 0,13 l/100 km bei Ottomotoren bzw. auf 0,09 l/100 km bei Dieselmotoren reduzieren lässt. Als technisches Potenzial werden 100 % aller Neufahrzeuge angenommen. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass 2015 bereits 10 % aller Neufahrzeuge mit LED als Frontbeleuchtung ausgestattet sein werden. Dieser Anteil steigt bis 2030 auf etwa 90 % an. Die daraus resultierenden zukünftigen Einsparungen sind in **Tabelle 6.16** dargestellt.

Es zeigt sich, dass durch den Einsatz von LED in der Frontbeleuchtung bei einer konservativen Entwicklung 3,4 PJ und bei einer progressiven Entwicklung 5,3 PJ eingespart werden könnten.

**Tabelle 6.16:** Kraftstoffeinsparungen durch den Einsatz von LED in der Frontbeleuchtung

Kraftstoffeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	0,3	1,0	1,9	3,4
Nano	0,0	0,4	1,4	2,6	4,6
Nano +	0,0	0,5	1,7	3,2	5,3

## Displaytechnologien

Der Einsatz von OLED-Displays zur Substitution von konventionellen Displaytechnologien hat bisher kaum begonnen. Unterschiedliche Hersteller haben zwar schon erste Modelle vorgestellt, von einer Verbreitung auf dem Massenmarkt sind sie jedoch noch weit entfernt. Allerdings zeichnen sich OLED-Displays durch deutlich geringere Energieleistungsaufnahmen im Betrieb aus. Auch die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus, d. h. inklusive Vorproduktion, Herstellung und Gebrauch, zeigt den energetischen Vorteil der OLED-Displaytechnologie gegenüber konventionellen Displaytechnologien (siehe auch Kapitel 4.3.3).

Zur Berechnung der Szenarien wird zunächst das Substitutionspotenzial bestimmt. Dabei wird davon ausgegangen, dass OLED-Displays alle anderen drei betrachteten Displaytechnologien ersetzen können. Darauf aufbauend ergibt sich unter Berücksichtigung des Anteils der Displaytechnologien am Energieverbrauch der Sektoren sowie des Umstellungsgrades der Energieverbrauch je Displaytechnologie für die Substitution. Um die Leistungsaufnahmen der unterschiedlichen Technologien vergleichen zu können, wird entsprechend /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/ die Leistungsaufnahme flächenbereinigt dargestellt. Als Grundlage dient dabei die gemittelte Leistungsaufnahme eines 50 Zoll Displays. Der Energieverbrauch in der Gebrauchsphase wurde entsprechend der Leistungsaufnahme in 2010 nach /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/ ermittelt (vgl. **Tabelle 6.17**). Bei der Berechnung der möglichen Energieeinsparung durch den Einsatz von OLED-Displays wird

von einer technischen Weiterentwicklung und damit einer Erhöhung der Energieeffizienz der OLED-Technologie ausgegangen.

**Tabelle 6.17:** Leistungsaufnahme und Energieverbrauch unterschiedlicher Displaytechnologien (eigene Berechnung nach /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/)

Technologie	Leistungsaufnahme 50 Zoll [W] in 2010	Energieverbrauch Gebrauchsphase [MJ]	Anteil Energiever- brauch OLED [%]
CRT	200	1.990	10
LCD	100	710	30
PDP	100	710	30
OLED	30	214	

Der Energieverbrauch der unterschiedlichen Displaytechnologien als Ausgangsbasis für das Vergleichsjahr 2010 wird in Anlehnung an /Stobbe et al. 2009/ ermittelt. Durch den Einsatz von OLED Displays könnten im Nano-Szenario, beginnend im Jahr 2015 ca. 0,3 PJ und im Jahr 2030 10,6 PJ in den Sektoren Industrie, GHD und Haushalte eingespart werden (vgl. **Tabelle 6.18**). Als Ergebnis der Sensitivitätsanalyse zeigt sich, dass diese Einsparung zwischen 8,5 und 13,6 PJ in 2030 variieren könnten.

**Tabelle 6.18:** Energieeinsparung durch den Einsatz von OLED-Displays

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	0,2	2,3	4,7	8,5
Nano	0,0	0,3	2,8	5,7	10,6
Nano +	0,0	0,4	3,6	7,4	13,6

### Ultrahochfester Beton

Aufgrund der Größe und Bedeutung des Bausektors können sich energetische Veränderungen beim Einsatz des Grundbaustoffes Beton stark auswirken. Es ist dabei zu beachten, dass die Herstellung des Baustoffes Beton nur wenig Energie erfordert und der eigentliche Energieeinsatz für die Herstellung des Bindemittels Zement benötigt wird. Hierbei entfällt der größte Anteil des Energieverbrauchs auf die Gewinnung des Gesteins, dessen Zerkleinerung und dem Brennen des Zements. Allein die deutsche Zementherstellung benötigte im Jahr 2009 ca. 100 PJ Energie. Als Grundlage für die Berechnungen dient daher nicht die in Deutschland verbaute Menge an Zement, sondern der gesamte Zementabsatz /BDZ 2010, 2011/. Die Verwendung von hochfestem Beton erlaubt eine deutliche Reduzierung der eingesetzten Menge und daher der notwendigen Rohstoffe und Energie (siehe auch Kapitel 4.3.3).

Die mögliche Energieeinsparung beim Einsatz von UHPC wird im Rahmen der Sensitivitätsanalyse in einem Bereich von 10 bis 40 % variiert. Weitere Eingangsparameter der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen sind die in Deutschland produzierte Zementmenge, die Entwicklung des zukünftigen spezifischen Energieverbrauchs zur Herstellung (thermisch, elektrisch) und die mögliche Marktdurchdringung mit UHPC. Bei der Berechnung der Entwicklung des Energiebedarfs der konventionellen Herstellung wird die Erhöhung der Effizienz beim elektrischen Energieeinsatz von 0,8 % pro Jahr und beim thermischen Energieein-

satz von 1,1 % pro Jahr entsprechend der historischen Entwicklung fortgeschrieben. Um auch hier mögliche Unsicherheiten in der zukünftigen Entwicklung abzudecken, wird die mögliche prozessbedingte elektrische Energiereduktion im Bereich von 0,4 bis 1,2 % und der Bedarf an thermischer Energie im Bereich von 0,9 bis 1,6 % variiert. Über die theoretisch mögliche Energieeinsparung und der Verbreitungsquote (2015: 0,5 %, 2030 2,5 %) des hochfesten Betons errechnet sich die mögliche Energieeinsparung im Baubereich. Zur Verdeutlichung der Unterschiede ist in **Tabelle 6.19** und **Tabelle 6.20** ein Vergleich zwischen konventionellem und ultrahochfestem Beton nach /Schmidt et al. 2007/ dargestellt.

Basierend auf den oben genannten Rahmenannahmen stellt **Tabelle 6.21** die Ergebnisse des Nano-Szenarios und der beiden Sensitivitätsanalysen (Nano -, Nano +) für den Einsatz von UHPC in Deutschland dar. Es wird deutlich, dass die möglichen Auswirkungen bis zum Jahr 2030 sehr gering ausfallen. Gemäß den Berechnungen könnten zwischen 0,2 und 1,1 PJ eingespart werden.

**Tabelle 6.19:** Energieverbrauch für 1 m<sup>3</sup> Beton und UHPC /Schmidt et al. 2007/

Material	Einheit	UHPC	C35/45
Zement	kg/m <sup>3</sup>	733	350
Silicastaub	kg/m <sup>3</sup>	183	--
Quarz Sand / Kiesel	kg/m <sup>3</sup>	1008	1802
Wasser	kg/m <sup>3</sup>	161	175
Silikatdampf	kg/m <sup>3</sup>	230	--
Stahlfasern	kg/m <sup>3</sup>	75	--
Primärenergiebedarf	MJ/m <sup>3</sup>	3440	1702
Treibhausgasemissionen	kg/m <sup>3</sup>	571	282

**Tabelle 6.20:** Energieverbrauch je Tragwerk für Beton und UHPC /Schmidt et al. 2007/

Material	UHPC (Fachwerk aus ultrahochfestem Beton)		Konventioneller Beton	
	Rohmaterial	Energie	Rohmaterial	Energie
	[t]	[MJ]	[t]	[MJ]
Zement	98	35.199	120	43.080
Silicastaub	18	--	--	--
Betonzuschlag	170	2.518	620	9.176
Wasser	21	--	60	--
Stahlfasern	10	242.800	--	--
Bewehrungsstahl	22	541.000	70	1.720.000
Spannstahl	12	327.000	10	278.000
Stahlfachwerk	--	--	--	--
<b>Summe</b>	<b>351</b>	<b>1.148.517</b>	<b>880</b>	<b>2.050.256</b>

**Tabelle 6.21:** Energieeinsparung durch den Einsatz von UHPC

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2
Nano	0,0	0,1	0,3	0,4	0,4
Nano +	0,0	0,2	0,7	0,9	1,1

## Dämmanwendung mit VIP

Im Sektor Haushalte nimmt die Raumwärme mit 1.833 PJ (Stand 2008) einen Anteil von ca. 72 % am Endenergieverbrauch ein /BMWi 2012/. Neben einer Erneuerung der Heizungstechnik kann die Dämmung von Gebäuden den Energieverbrauch für Raumwärme senken. Darüber hinaus reduziert eine effiziente Dämmung eine Erwärmung der Wohnräume in den Sommermonaten, wodurch eine energieintensive Kühlung vermieden werden kann (vgl. Kapitel 4.3.3).

Im Rahmen dieser Szenarioberechnung wird die Dämmung von Gebäuden mit den so genannten Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) im Sektor der Haushalte untersucht. Nach /Jopp 2006/ haben VIP glänzende Aussichten auf dem gesamten Bausektor und zwar sowohl als Dämmmaterial im Gebäudebestand (energetische Sanierung) als auch im Bereich des Neubaus. Daher stellen sowohl der Gebäudebestand als auch der Neubau ein Potenzial für die Dämmung mit VIP dar. Um die Auswirkungen durch die Dämmung mit VIP vergleichen zu können, wird als Vergleichsdämmmaterial Polystyrol-Hartschaum (PS) verwendet.

Basierend auf der Anzahl an Wohneinheiten, die für eine Wärmedämmung in Frage kommen (Substitutionspotenzial) und der Entscheidungsquote, bei der Durchführung einer Dämmmaßnahme VIP einzusetzen, ergibt sich die Anzahl an mit VIP gedämmten Wohneinheiten pro Jahr. Neben der Anzahl der Wohneinheiten ist auch die Außenwandfläche von Relevanz für die Berechnung. Anhand der technischen Parameter der beiden untersuchten Dämmmaterialien wird der U-Wert<sup>63</sup> von 1 m<sup>2</sup> Außenwandfläche berechnet. für die Berechnung wird eine verputzte Ziegelwand ausgewählt (siehe auch Kapitel 2.3 und **Abbildung 2.5**). Zur Ermittlung des Transmissionswärmebedarfs der Außenwand wird der anteilige Heizwärmebedarf  $Q_h$  [kWh/a] mittels der Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$  bestimmt /GRE 2002/:

$$Q_h = Gt * TFB * C_{TD} * A_{Bauteil} * U \quad (6.3)$$

mit:

$Q_h$	Heizwärmebedarf	[kWh/a]
$Gt$	Gradtagzahl, Durchschnittswert für Deutschland	84 kKh/a
$TFB$	Teilbeheizungsfaktor (räumliche und zeitliche Teilbeheizung)	0,9
$C_{TD}$	Temperaturreduktionsfaktor	1,0 (Außenwand)
$A_{Bauteil}$	Fläche des betrachteten Bauteils (Außenmaße)	[m <sup>2</sup> ]
$U$	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/(m <sup>2</sup> *K)]

<sup>63</sup> Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) gibt die Energiemenge in Watt an, die bei einer Temperaturdifferenz von 1 K in einer Sekunde durch eine Fläche von 1 m<sup>2</sup> fließt. Der U-Wert dient zur Bestimmung der Transmissionswärmeverluste durch Bauteile. Die Einheit des U-Wertes ist [W/(m<sup>2</sup>\*K)]

**Tabelle 6.22** fasst die Ergebnisse zusammen. Für die weiteren Berechnungen wird bei VIP von einer Dämmstärke von 20 mm ausgegangen.

Die Energieeinsparung bei Dämmung mit VIP gegenüber einer Dämmung mit Polystyrol-Hartschaum ergibt sich durch Multiplikation der typischen Außenwandfläche je Gebäudetyp und der Heizenergieeinsparung je  $m^2$  Außenwandfläche. Im Nano-Szenario wird davon ausgegangen, dass VIP bereits in 2015 einen Marktanteil im Neubau von 5 % aufweisen und dieser Wert bis 2030 auf 80 % ansteigt. Die Entwicklung im Bestand ist um 5 Jahre verzögert und erreicht in 2030 einen Anteil von 60 %. Darüber hinaus ist im Bestand eine Sanierungsquote von 0,5 % zugrundegelegt. Wird bei der Sanierung konventionelles Material verwendet, kommt die oben aufgeführte Einsparung nicht zum Tragen. Das sanierte Gebäude im Bestand wird dann wie ein Neubau behandelt und geht entsprechend in die Berechnung ein. Die resultierende Energieeinsparung je Wohneinheit nach Gebäudetyp ist in **Tabelle 6.23** dargestellt.

**Tabelle 6.22:** Technische Parameter von Dämmmaterialien

	Einheit	Ungedämmt	Polystyrol-Hartschaum	Vakuum-Isolations-Paneele (VIP)	
Dämmstärke	mm	-	100	20	40
Wärmeleitfähigkeit der Dämmmaterialien	W/(m*K)	-	0,035	0,004	0,004
U-Wert der Wand	W/(m <sup>2</sup> *K)	1,504	0,285	0,177	0,094
Heizwärmebedarf $Q_h$ je 1 m <sup>2</sup> Wand	kWh/a	113,7	21,5	13,4	7,1

**Tabelle 6.23:** Heizenergieeinsparung je Wohneinheit durch den Einsatz von VIP im Vergleich zu Polystyrol-Hartschaum

		Gebäude mit 1 WE	Gebäude mit 2 WE	Gebäude mit $\geq 3$ WE
Heizwärmeeinsparung je WE nach Gebäudetyp	kWh/a	1.224,7	918,5	816,5

Die quantitative Auswirkung auf den Energieverbrauch in Deutschland ergibt sich durch Multiplikation der Heizenergieeinsparung mit der Anzahl an Wohneinheiten mit VIP-Dämmung. Die Ergebnisse der Szenarien- und Sensitivitätsberechnungen sind in **Tabelle 6.24** zusammengefasst. Durch den Einsatz von VIP könnten im Jahr 2030 zwischen 23 und 44 PJ an Energie im Bereich der Haushalte eingespart werden.

**Tabelle 6.24:** Energieeinsparung durch den Einsatz von VIP als Dämmmaterial

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	0,0	1,7	9,3	23,3
Nano	0,0	0,2	3,1	14,5	35,1
Nano +	0,0	0,2	3,9	18,2	43,9

## Polycarbonat für die Automobilverschiebung

Eine Möglichkeit, den Kraftstoffbedarf von Fahrzeugen zu verringern, besteht in der Reduzierung des Fahrzeuggewichts. In der Automobilindustrie ist das Thema Leichtbau als Trend deutlich erkennbar. Neben dem Einsatz von hochfesten Stählen, Leichtmetallen und verstärkten Kunststoffen besteht eine weitere Möglichkeit im Bereich der Verschiebung eines Fahrzeuges (siehe Kapitel 4.3.3). Im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen wird der Einsatz von Polycarbonat als Glasersatz in der Fahrzeugverschiebung untersucht. Um das Energieeinsparpotenzial durch eine Verringerung des Fahrzeuggewichts in der Nutzungsphase berechnen zu können, wird eine Korrelation zwischen Pkw-Gewicht und Kraftstoffverbrauch verwendet. Literaturangaben weisen hier jedoch teilweise große Unterschiede auf. So geben /Brink et al. 1999/, ausgehend von einem Fahrzeuggewicht von 1.000 kg, eine Verbrauchsminderung von 7 % pro 100 kg Gewichtseinsparung auf 100 km an, was einer Minderung des Kraftstoffverbrauchs von ca. 0,5 l/100 km entspricht (durchschnittlicher Verbrauch von 7,3 l/100 km). /Klein 2002/ geht von einer Senkung um 0,3 bis 0,6 l/100 km bei 100 kg Gewichtseinsparung aus, während /Eberle 2000/ eine Bandbreite von 0,4 bis 0,8 l nennt.

Das Gewicht des Glases, welches durch Polycarbonat ersetzt wird, beträgt im Durchschnitt 40 kg pro Pkw /Möthrich et al. 2007/. Für die Berechnungen wird die mögliche Gewichtseinsparung durch den Einsatz von Polycarbonat in einem Bereich von 13 bis 24 kg je Fahrzeug variiert. Dadurch ergibt sich eine resultierende Kraftstoffreduktion von 0,7 bis 1,2 %, basierend auf der konservativen Annahme, dass eine Verringerung des Fahrzeuggewichts um 100 kg einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs um 5 % entspricht. Hinsichtlich der Marktdurchdringung von Polycarbonat in der Automobilverschiebung wird davon ausgegangen, dass bereits 2015 ca. 5 % der Autoverschiebung aus Polycarbonat hergestellt wird. Dieser Anteil steigt bis 2030 auf 70 %, dabei ist der Einsatz von Polycarbonat auf Neufahrzeuge beschränkt.

**Tabelle 6.25** zeigt die Ergebnisse der Szenariokalkulation. Die mögliche Kraftstoffeinsparung beginnt mit 0,1 PJ im Jahr 2015 und steigt bis 2030 auf 1,1 PJ im Szenario Nano an. Als Ergebnis der Sensitivitätsanalyse kann festgestellt werden, dass dieser Wert im Jahr 2030 zwischen 0,6 und 1,9 PJ variieren könnte.

**Tabelle 6.25:** Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz von Polycarbonat für die Automobilverschiebung

Kraftstoffeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	0,0	0,1	0,3	0,6
Nano	0,0	0,1	0,2	0,5	1,1
Nano +	0,0	0,1	0,4	0,8	1,9

## Nanolacke im Automobilbereich

Aufgrund der guten Datengrundlage durch Studien von /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/ ist es möglich, im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen die energetischen Auswirkungen der Herstellung von Nanolacken zu untersuchen. Dabei werden die Lackher-



stellung und der Lackierungsprozess betrachtet. Je nach Lacksystem (1-/2-Komponenten Klarlack, Wasser-Klarlack) werden unterschiedliche Lackmengen zur Lackierung einer Fahrzeugkarosserie benötigt. Um den Einsatz des Nanolacks mit den konventionellen Lacksystemen zu vergleichen, wird ein durchschnittlicher Normallack berechnet, der anteilig aus den Lacksystemen 1-/2-Komponenten Klarlack (1/2 KCC), Wasser-Klarlack (Wasser CC) und Pulver Klarlack (Pulver CC) zusammengesetzt ist. In Anlehnung an /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/ setzt sich der durchschnittliche Normallack zu 50 % aus Wasser-Klarlack, zu je 20 % aus 1-/2-Komponenten Klarlack und zu 10 % aus Pulver-Klarlack zusammen. Der Energiebedarf zur Herstellung und zur Applikation ergibt sich entsprechend aus dem anteiligen Energiebedarf der einzelnen Lacksysteme (vgl. **Tabelle 6.26**). Es wird ersichtlich, dass sowohl bei der Herstellung als auch bei der Applikation der Energiebedarf des Nanolacks geringer ausfällt als bei konventionellen Lacksystemen. Zwar benötigt man für die Herstellung von 1 kg applikationsfähigem Lack deutlich mehr Energie als für alle konventionellen Lacksysteme, doch aufgrund der deutlich reduzierten Schichtdicke, der damit verbundenen geringeren Lackmenge und aufgrund der Reduktion an Prozessschritten bei der Lackierung kehrt sich dieser Effekt bereits vor der Gebrauchsphase um (vgl. auch Kapitel 4.3.3).

**Tabelle 6.26:** Energiebedarf für die Herstellung und Applikation unterschiedlicher Lacksysteme

	Einheit	1-KCC	2-KCC	Wasser CC	Pulver CC	Vergleichs-lack	Nano-lack
Energiebedarf Herstellung	[MJ/Fahrzeug]	200	225	200	300	215	47
Energiebedarf Applikation	[MJ/Fahrzeug]	763	764	770	637	754	670
Summe Energiebedarf	[MJ/Fahrzeug]	963	989	970	937	969	717
Lackmenge	[kg/Fahrzeug]	2,3	2,3	3,2	2,4	2,7	0,3

Hinsichtlich der Marktdurchdringung von Nanolacken wird davon ausgegangen, dass deren Anteil von 8 % in 2015 auf 25 % im Jahr 2030 ansteigt. Bis 2030 könnten somit bis zu 0,3 PJ bei der Herstellung und Verarbeitung von Lacken eingespart werden (vgl. **Tabelle 6.27**).

**Tabelle 6.27:** Energieeinsparung durch Herstellung und Verarbeitung von Nanolacken

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2
Nano	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2
Nano +	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3

Auf Basis der Ergebnisse von /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/ ist es auch möglich, die Auswirkungen durch den Einsatz von Nanolacken in der Gebrauchsphase von Automobilen in den Szenarienanalysen zu untersuchen. Aufgrund der geringeren Schichtdicken hat der Einsatz von Nanolacken eine Gewichtsreduktion zur Folge. Die damit verbun-

dene Kraftstoffeinsparung wird entsprechend der bei den Berechnungen zu den Auswirkungen von Polycarbonat in der Automobilverschiebung beschriebenen Gewichts-Verbrauchs-korrelation ermittelt. Pro Fahrzeugkarosserie kann ca. 2,4 kg Gewicht eingespart werden. Dies entspricht einer Verbrauchsreduktion von ca. 0,12 %. Es wird auch hier davon ausgegangen, dass im Jahr 2015 ca. 5 % und im Jahr 2030 1/4 der Neufahrzeuge mit Nanolack ausgerüstet werden. Die Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch durch den Einsatz von Nanolacken ist jedoch auch im Jahr 2030 sehr gering (vgl. **Tabelle 6.28**).

**Tabelle 6.28:** Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz von Nanolack im Automobilbereich

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04
Nano	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05
Nano +	0,00	0,01	0,03	0,05	0,07

Gemäß den Szenarienberechnung könnten im Verkehrsbereich dadurch maximal 0,05 PJ eingespart werden. Je nach unterstellter Entwicklung (konservativ, progressiv) könnte diese Einsparung zwischen 0,04 und 0,07 PJ variieren.

### Nanofüllstoffe in Autoreifen

Nach /Velte 2006/ und /Unselde 2006/ ist durch den Einsatz von Nanopartikeln oder Kohlenstoffnanoröhren als Füllstoffe in Reifenmischungen eine Reduktion des Rollwiderstandes von 15 – 25 % möglich. Dadurch sind Kraftstoffeinsparungen von über 4 % denkbar, da eine Reduzierung des Rollwiderstands um 30 % etwa einer Verringerung des Kraftstoffbedarfs um 5 % entspricht /König 2004/ (siehe auch Kapitel 4.3.3). Im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen wird daher die resultierende Kraftstoffeinsparung in einem Bereich von 0,8 bis 4 % variiert und es wird von einem technischen Potenzial von 100 % aller Autoreifen ausgegangen.

Die zeitliche Abschätzung der Verbreitung solcher neuartiger Nanofüllstoffe und der damit verbundenen Kraftstoffeinsparung gestaltet sich schwierig, da nach /Velte 2006/ die meisten Verfahren zur Herstellung von Nanostrukturen in Reifenmischungen erst entwickelt werden. Im Rahmen der Berechnungen wird von einer schnellen Marktdurchdringung ausgegangen. Bereits im Jahr 2015 werden 15 % aller Reifen mit nanobasierten Füllstoffen ausgerüstet. Im Jahr 2030 wird sich dieser Anteil auf maximal 70 % erhöhen (Nano-Szenario). Wie aus **Tabelle 6.29** ersichtlich, könnte der Einsatz von Nanofüllstoffen in Autoreifen im Nano-Szenario in 2030 bis zu 34,5 PJ Kraftstoff einsparen.

**Tabelle 6.29:** Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz von Nanofüllstoffen in Autoreifen

Kraftstoffeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	1,1	3,2	6,1	9,5
Nano	0,0	7,4	19,8	29,6	34,5
Nano +	0,0	11,4	30,9	53,4	67,3

## Reibungsreduzierende Beschichtungen

Trotz einer ständigen Verringerung von Fertigungstoleranzgrenzen und Fortschritten auf dem Gebiet der Schmierstoffe wird nach /HL 2006/ der Kraftstoffverbrauch moderner Pkw-Motoren noch immer zu ca. 15 % von der Motorreibung bestimmt. Untersuchungen durch /Thesenvitz et al. 2007/ nach dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) zeigen, dass eine Minderung des Kraftstoffverbrauchs bei Pkw um 11 % möglich ist (vgl. Kapitel 4.3.3). Im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen wird eine mögliche Verbrauchsreduktion durch den Einsatz reibungsreduzierender Beschichtungen im Bereich von 6 bis 11 % variiert. Hinsichtlich des technischen Potenzials wird davon ausgegangen, dass eine reibungsreduzierende Beschichtung im Antriebsstrang und im Motor zu 100 % bei Diesel- und Ottofahrzeugen umgesetzt werden kann. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen kommt eine entsprechende Beschichtung lediglich im Antriebsstrang zum Einsatz, wodurch sich das mögliche Potenzial reduziert und für die Berechnungen mit 25 % angenommen wird. In 2015 werden 3 % und im Jahr 2030 9 % der gesamten Fahrzeugflotte reibungsreduzierende Beschichtungen verwenden. Diese können sowohl bei Neufahrzeugen, als auch im Fahrzeugbestand eingesetzt werden. Im Jahr 2030 könnten dadurch nach den Berechnungen im Rahmen der Sensitivitätsanalysen zwischen 8,4 und 24,6 PJ an Kraftstoff im Verkehrsbereich eingespart werden (vgl. **Tabelle 6.30**).

**Tabelle 6.30:** Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz von reibungsreduzierenden Beschichtungen

Kraftstoffeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	2,8	4,6	6,5	8,4
Nano	0,0	4,9	8,2	11,5	14,8
Nano +	0,0	8,2	13,7	19,2	24,6

## Nanokatalysatoren

Derzeit basieren über 80 % der klassischen, chemischen Verfahren im industriellen Maßstab auf dem Einsatz von Katalysatoren. Untersuchungen zufolge beruhen ca. 25 % der Bruttowertschöpfung in den westlichen Industriestaaten auf katalytischen Prozessen /DFG 2006/. Leistungsfähige Katalysatoren sorgen schon heute dafür, dass chemische Reaktionen ressourcenschonend unter Erhöhung der Ausbeute und der Vermeidung von Nebenprodukten ablaufen /Heubach et al. 2005/. Die Nanotechnologie bietet einen wichtigen Ansatzpunkt zur weiteren Verbesserung der katalytischen Wirkung, da durch die Nanostrukturierung der Katalysatoren das Verhältnis von Oberfläche zum Volumen ansteigt. Dadurch werden die Katalysebedingungen verbessert, da die Reaktionen dort ablaufen, wo die Reaktanten und die wirksame katalytische Oberfläche zusammentreffen (siehe auch Kapitel 4.3.3).

Die Styrolsynthese ist einer der zehn wichtigsten petrochemischen Prozesse und die jährliche Produktion in Deutschland betrug in 2010 954 kt /DESTATIS 2011/. In Studien von /Steinfeldt et al. 2004, Steinfeldt et al. 2007/ wird ein nanotechnologischer Katalysator bei der Styrolproduktion untersucht. Basierend auf diesen Untersuchungsergebnissen werden die

möglichen Auswirkungen dieses neuen Katalysators im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen betrachtet. Der aus Nanoröhren bestehende Katalysator reduziert die Energie zur Herstellung von 1 kg Styrol im Vergleich zur klassischen Styrolsynthese mit einem Kalium-Eisenoxid-Katalysator von 6,36 MJ auf 3,25 MJ (siehe auch Kapitel 4.3.3). Basierend auf dem Anteil der deutschen Styrolproduktion, der Variation des Produktionswachstums (3,8 bis 6,3 %), der Variation der zukünftigen Energieeffizienzsteigerung (1,5 bis 2,5 %) bei der konventionellen Styrolsynthese, dem Marktanteil des auf Nanoröhren basierenden Katalysators und der dadurch möglichen Einsparung lassen sich die möglichen Auswirkungen des Einsatzes des neuen Katalysators abschätzen. Es wird dabei davon ausgegangen, dass 2015 bereits 5 % der Produktionsprozesse den nanobasierten Katalysator einsetzen und im Jahr 2030 die Hälfte der Styrolproduktion mithilfe dieses Katalysators durchgeführt wird. Durch den Einsatz des Nanokatalysators scheint eine Energieeinsparung im Nano-Szenario von 3,7 PJ im Jahr 2030 möglich (vgl. **Tabelle 6.31**).

**Tabelle 6.31:** Energieeinsparung durch den Einsatz von Nanokatalysatoren in der Styrolproduktion

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	0,2	0,4	1,0	2,2
Nano	0,0	0,2	0,6	1,6	3,7
Nano +	0,0	0,3	0,8	2,4	5,7

### Nanopartikel in der Kunststoffproduktion

Wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben, kann der Einsatz von Nanopartikeln die Fließfähigkeit von Polybutylenterephthalat (PBT) deutlich verbessern und dadurch den Verarbeitungsprozess in Spritzgussmaschinen optimieren. Der weltweite Verbrauch an PBT lag im Jahr 2009 bei 750 kt mit jährlichen Wachstumsraten von ca. 5 %. In Deutschland werden ungefähr 10 % des Weltverbrauchs eingesetzt /BASF 2004, Eibeck et al. 2010/. Dabei wird ca. 92 % des PBT in Spritzgussmaschinen verarbeitet und der elektrische Prozessenergiebedarf für die Verarbeitung von 1 kg PBT in einer Spritzgussmaschine beträgt ca. 3 kWh. Durch die Zugabe von Nanopartikeln wird die Schmelzviskosität von PBT deutlich gesenkt. Es ist dadurch möglich, dünnwandigere Bauteile herzustellen sowie die Zykluszeit und die Einspritz- und nachdrücke zu reduzieren. Zusammengenommen kann von einer 20 %igen Energieeinsparung ausgegangen werden /BASF 2005, Eipper et al. 2006, Weiß et al. 2004/. Untersuchungen von /Steinfeldt et al. 2010/ geben eine mögliche Einsparung am Primärenergieverbrauch von 9 % an.

Im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalyse wird die Energieeinsparung im Bereich von 11 bis 20 % variiert. Es wird davon ausgegangen, dass bereits in 2015 30 % der PBT-Verarbeitung durch Nanopartikel optimiert wird und im Jahr 2030 alle PBT Verarbeitungsprozesse auf die Verwendung von Nanopartikeln umgestellt wurden. Basierend auf dem PBT-Anteil, der in Spritzgussmaschinen bearbeitet wird, der möglichen Energieeinsparung und der zukünftigen Marktdurchdringung ergibt sich die mögliche Einsparung durch den Einsatz von Nanopartikeln bei der PBT-Verarbeitung in Spritzgussmaschinen in Deutschland. Im

Jahr 2015 könnten dadurch im Nano-Szenario ca. 0,1 PJ eingespart werden und im Rahmen der Sensitivitätsanalysen könnte dieser Wert in 2030 zwischen 0,2 und 0,8 PJ variieren (Tabelle 6.32).

**Tabelle 6.32:** Energieeinsparung durch den Einsatz von Nanopartikeln in der PBT-Verarbeitung

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Nano -	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2
Nano	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4
Nano +	0,0	0,1	0,4	0,6	0,8

## 6.2 Biotechnologie

Im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen zu biotechnologischen Anwendungen wird, in Anlehnung an die Berechnung des theoretischen Potenzials der Biotechnologie in Kapitel 5.4, zwischen der Nutzung von biologischen Rohstoffen und dem Einsatz von Enzymen zur gezielten Prozesssteuerung unterschieden.

### 6.2.1 Nutzung biologischer Rohstoffe

Bei der Nutzung von biologischen Rohstoffen werden im Rahmen der Szenarienbetrachtung der Einsatz von Biokunststoffen (siehe auch Kapitel 5.3.1), die Nutzung von Thermoplastischer Stärke als Reifenfüller, die Nutzung von Mikroalgen zur Biogasproduktion sowie die Herstellung von Biokraftstoffen (Bioethanol, Biodiesel) durch Mikroalgen näher analysiert.

#### Biokunststoffe

**Tabelle 6.33** fasst den fossilen Energiebedarf zur Herstellung unterschiedlicher petrochemischer Kunststoffe und ausgewählter Biokunststoffe sowie die Produktionsmengen der petrochemischen Kunststoffe (Stand 2009) zusammen.

**Tabelle 6.33:** Fossiler Energiebedarf und Produktionsmengen von ausgewählten Kunststoffen /Lindner 2010, PlasticEurope 2008, Wolf et al. 2005/

	Fossiler Energiebedarf [GJ/t]	Produktion 2009 [Mio. t]
Petrochemische Kunststoffe		
LDPE	80,6	1,70
HDPE	80,0	1,27
PS	87,0	0,39
durchschnittl. chem. PUR	101,3	0,64
PET	77,0	0,48
Biokunststoffe		
Stärkepolymere	41	
PLA	29,2	
PHA	50,2	
durchschnittl. Bio-PUR	70,4	
Andere Bio-Polyester	65,0	

In **Tabelle 6.34** sind die Substitutionspotenziale nach /Wolf et al. 2005/ im Jahr 2030 dargestellt. So wird beispielsweise davon ausgegangen, dass in 2030 biotechnologisches PUR zu 30 % chemisches PUR ersetzen könnte. Des weitern gehen /Wolf et al. 2005/ davon aus, dass Stärkepolymere ebenfalls als Ersatz für chemisches PUR eingesetzt werden können (10 %). Insgesamt könnte chemisches PUR somit zu 50 % durch Biokunststoffe ersetzt werden. Der vollständige Ersatz eines petrochemischen Kunststoffes durch einen biobasierten Kunststoff wird von /Wolf et al. 2005/ auch in 2030, z. B. aufgrund technischer Restriktionen, nicht erwartet.

**Tabelle 6.34:** Substitutionspotenzial für konventionelle Kunststoffe durch Biokunststoffe in 2030 nach /Wolf et al. 2005/

[%]	LDPE	HDPE	PS	Chem. PUR	PET
Stärkepolymere	10	10	10	10	0
PLA	0	10	10	0	10
PHA	20	30	20	10	10
Bio-PUR	0	0	0	30	0
Andere Bio-Polyester	0	0	0	0	30
Gesamt	30	50	40	50	50

Um die möglichen Auswirkungen durch die Substitution von petrochemischen Kunststoffen durch biobasierte Kunststoffe zu ermitteln, werden für die Szenarien- und Sensitivitätsanalysen die nachfolgend erläuterten Rahmenannahmen verwendet. Die entsprechenden prozentualen Anteile der Jahre 2010 bis 2030 in Bezug auf das Substitutionspotenzial gemäß /Wolf et al. 2005/, die im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen verwendet werden, sind in **Tabelle 6.35** zusammengefasst. Es wird davon ausgegangen, dass im Bio-Szenario 50 % des Substitutionspotenzials in 2030 ausgeschöpft werden. Dies bedeutet, dass z. B. biotechnologisches PUR zu 15 % und Stärkepolymere zu 5 % chemisches PUR ersetzen können (Bio-Szenario). Durch den Ersatz von LDPE, HDPE, PS, PUR und PET durch die biobasierten Kunststoffe Stärkepolymere, PLA, PHA, Bio-PUR und andere Bio-Polyester könnte im Jahr 2030 zwischen 24 und 40 PJ an fossiler Energie eingespart werden (vgl. **Tabelle 6.36**).

**Tabelle 6.35:** Marktanteil von Biokunststoffen in Bezug zum Substitutionspotenzial im Jahr 2030

[%]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	0	4	8	23	38
Bio	0	5	10	30	50
Bio +	0	6	13	38	63

**Tabelle 6.36:** Energieeinsparung durch den Einsatz ausgewählter Biokunststoffe

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	0,0	2,5	4,9	14,7	24,5
Bio	0,0	3,3	6,5	19,5	32,5
Bio +	0,0	4,1	8,1	24,4	40,6



### Biobasierter Reifenfüller (TPS)

Thermoplastische Stärke kann neben dem Ersatz von petrochemischen Kunststoffen wie PE oder PS auch als Reifenfüller bei der Herstellung von Reifen eingesetzt werden und dabei konventionelle Füller wie z. B. Industrieruß ersetzen (siehe Kapitel 5.3.1). Nach /Wolf et al. 2005/ ist technisch eine Substitution von 50 % bezogen auf das Gewicht möglich und der Einsatz des thermoplastischen Reifenfüllers führt zur Reduktion des Rollwiderstands und damit zu einer Kraftstoffeinsparung. Neben den Einsparmöglichkeiten bei der Nutzungsphase des Reifens kann auch bei der Herstellung des Reifenfüllers eine Reduktion des Energieverbrauchs realisiert werden.

Für die Szenarien- und Sensitivitätsanalysen wird davon ausgegangen, dass bei der Nutzung einer 50 %igen Substitution von herkömmlichen Reifenfüllern durch thermoplastische Reifenfüller eine Einsparung von ca. 9,5 g CO<sub>2</sub>/km ermöglicht wird. Dabei entfallen 8,9 g CO<sub>2</sub>/km auf die Reduktion des Rollwiderstandes und 0,25 g CO<sub>2</sub>/km auf die Gewichtsreduzierung des Reifens (siehe /Wolf et al. 2005/). Für die Szenarienbetrachtung wird daher mit einer möglichen Reduktion von 9,17 g CO<sub>2</sub>/km für die Nutzungsphase des Reifens gerechnet. Unter Berücksichtigung eines durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs in Deutschland in 2007 von 7,6 l / 100 km /BMVBS 2009/ und einem mittleren CO<sub>2</sub> Ausstoß (Benzin und Diesel) von 2,5 kg CO<sub>2</sub>/l /ZDK 2008/ resultiert daraus eine Kraftstoffeinsparung von 4,8 %. Diese wird im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen zwischen 2,7 und 4,8 % variiert.

Bei der Durchsetzung des thermoplastischen Reifenfüllers im Markt wird eine positive Marktentwicklung angenommen, Beginnend von 15 % Marktanteil im Jahr 2015 steigt dieser Wert auf 70 % im Jahr 2030. **Tabelle 6.37** fasst die damit verbundenen Kraftstoffeinsparungen für die Szenarien- und Sensitivitätsanalysen zusammen. Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass durch den Einsatz von thermoplastischen Reifenfüllern im Bio-Szenario im Jahr 2030 ca. 47 PJ eingespart werden könnten.

**Tabelle 6.37:** Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz von thermoplastischen Reifenfüllern

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	0,0	3,6	12,0	20,9	26,5
Bio	0,0	6,4	21,4	37,1	47,1
Bio +	0,0	10,7	35,7	61,8	78,5

### Mikroalgen zur Biogasproduktion

Mikroalgen eignen sich aufgrund der hohen Produktivität der Biomasseerzeugung besonders für die Erzeugung von Biogas aus Biomasse. Um Algenbiomasse zu kultivieren, werden unterschiedliche Reaktoren eingesetzt und die Biomasseproduktivität unterscheidet sich entsprechend je nach Reaktortyp (siehe Kapitel 5.3.1). **Tabelle 6.38** stellt die Annahmen zur Entwicklung der Produktivität für unterschiedliche Reaktortypen zusammen (siehe /Biotechnologie 2007, Ecke 2008, Fahrendorf 2008, Hampicke 2009/). Für die Szenarienberechnungen werden die gemittelten Werte für die Mikroalgenreaktoren verwendet.

**Tabelle 6.38:** Annahmen zur Produktivitätsentwicklung von Mikroalgenreaktoren und Mais

Produktivität [t/ha]	2010	2015	2020	2025	2030
aus Mais	15	15	15	15	15
RR	60	75	90	105	120
FR	65	75	80	90	100
FPA	60	75	90	105	120
<b>Reaktoren gemittelt</b>	<b>62</b>	<b>75</b>	<b>87</b>	<b>100</b>	<b>113</b>

Als Berechnungsgrundlage für die verwendete Fläche zur Mikroalgenkultivierung dient die Entwicklung der Anbaufläche für Biogas (vgl. **Tabelle 6.39**), die anteilig durch die Nutzung von Mikroalgen ersetzt wird. Die für die unterschiedlichen Szenarien angesetzten Flächen zur Mikroalgenkultivierung sind in **Tabelle 6.40** dargestellt.

**Tabelle 6.39:** Entwicklung der Flächen für Energiepflanzen zur Biogasproduktion /Nitsch 2008, Weithäuser 2009/

Anbaufläche Biogaspflanzen [Mio. ha]	2010	2015	2020	2025	2030
	0,81	1,10	1,40	1,58	1,76

Aufgrund der noch nicht geklärten Rentabilität und unterschiedlicher technologischer Herausforderungen wird davon ausgegangen, dass erst in 2015 eine Nutzung von Mikroalgen in Bioreaktoren erfolgen wird. Bei der Berechnung der Erträge dient die Biomasseerzeugung durch Maisanbau als Referenz. Die zusätzliche Biogasmenge ergibt sich daher als Differenz der Biogasmenge, basierend auf Biomasse aus Mais, zur Biogasmenge, basierend auf der Biomasse von Mikroalgen. Bei der Berechnung der Energieausbeute werden für Mais 12,4 MJ/kg<sup>64</sup> und für Mikroalgen 19,2 MJ/kg<sup>64</sup> angenommen /Hampicke 2009, Ripplinger 2008a, 2008b/.

**Tabelle 6.40:** Flächenbedarf der Mikroalgenkultivierung zur Biogaserzeugung

Fläche [ha]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	0	83	184	296	660
Bio	0	110	245	395	880
Bio +	0	138	306	494	1.100

Die unter diesen Rahmenannahmen berechnete zusätzliche Energieproduktion aus Mikroalgen ist für das Bio-Szenario und die Sensitivitätsanalysen (Bio -, Bio +) in **Tabelle 6.41** dargestellt. Durch den Ersatz von Mais durch Mikroalgen zur Biogasproduktion können in 2030 zwischen 1,3 und 2,2 PJ zusätzlich erzeugt werden.

**Tabelle 6.41:** Resultierende zusätzliche Biogasproduktion durch Mikroalgen

Biogas [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	0,0	0,1	0,3	0,5	1,3
Bio	0,0	0,1	0,4	0,7	1,7
Bio +	0,0	0,2	0,5	0,9	2,2

<sup>64</sup> Energieproduktion je kg eingesetzter Biomasse

## Mikroalgen zur Produktion von Biokraftstoffen

In Anlehnung an die Nutzung von Algenbiomasse zur Biogasproduktion wird auch die Herstellung von Biokraftstoffen (Bioethanol und Biodiesel) aus Algenbiomasse im Rahmen der Szenarienbetrachtungen untersucht (siehe auch Kapitel 5.3.1). Die im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen verwendeten Produktivitäten sind in **Tabelle 6.42** zusammengestellt (siehe /Biotechnologie 2007/, /Ecke 2008/, /Fahrendorf 2008/, /Hampicke 2009/, /IGV 2008/). Wie bei der Biogasproduktion durch Mikroalgen wird auch bei der Biokraftstoffproduktion aus Mikroalgen als Referenz die Erzeugung von Biokraftstoffen aus Raps (Biodiesel) bzw. Weizen (Bioethanol) angenommen und die zusätzliche Kraftstoffproduktion ergibt sich als Differenz der Referenzentwicklung und der Erzeugung aus Mikroalgen.

**Tabelle 6.42:** Annahmen zur Produktivitätsentwicklung von Mikrolagenreaktoren, Raps und Weizen

Produktivität [t/ha]	2010	2015	2020	2025	2030
aus Raps	4	4	4	4	4
aus Weizen	8	8	8	8	8
RR	60	75	90	105	120
FR	65	75	80	90	100
FPA	60	75	90	105	120
<b>Reaktoren gemittelt</b>	<b>62</b>	<b>75</b>	<b>87</b>	<b>100</b>	<b>113</b>

Als Berechnungsgrundlage für die verwendete Fläche zur Mikroalgenkultivierung dient die Entwicklung der Anbaufläche für Biokraftstoffe. Diese ergibt sich aus der Differenz der Fläche für Energiepflanzen und der Anbaufläche zur Biogasproduktion. Die Anbaufläche zur Biokraftstoffproduktion kann wiederum in die Anteile zur Biodieselerzeugung (Raps) und Bioethanolerzeugung (Weizen) aufgeteilt werden /Hampicke 2009/, /Nitsch 2008/, /Weithäuser 2009/. Die entsprechenden Flächen sind in **Tabelle 6.43** zusammengefasst.

**Tabelle 6.43:** Entwicklung der Flächen für Energiepflanzen, zur Biogas- und Biokraftstoffproduktion

Anbaufläche für Biokraftstoffe [Mio. ha]	2010	2015	2020	2025	2030
Energiepflanzen	2,00	2,50	3,15	3,80	3,90
Biogas	0,81	1,10	1,40	1,58	1,76
Biokraftstoffe	1,19	1,40	1,75	2,22	2,14
Biodiesel (Raps)	0,98	1,15	1,44	1,82	1,75
Bioethanol (Weizen)	0,21	0,25	0,32	0,40	0,39

Für die Nutzung von Mikroalgen werden anteilig die Flächen für Raps (Biodiesel) und Weizen (Bioethanol) ersetzt. Die für die Szenarien- und Sensitivitätsanalysen angesetzten Flächen zur Mikroalgenkultivierung sind in **Tabelle 6.44** dargestellt. Auch bei der Biokraftstoffproduktion aus Mikroalgen wird davon ausgegangen, dass erst in 2015 eine Nutzung von Mikroalgen in Bioreaktoren erfolgen wird. Für die Energieausbeuten zur Kraftstoffherstellung wird für die Biodieselerzeugung von 10,4 MJ/kg<sup>64</sup> für Mikroalgen und von 11,9 MJ/kg<sup>64</sup> für Raps ausgegangen. Bei Bioethanol werden entsprechend 6,0 MJ/kg<sup>64</sup> für

Mikroalgen und 9,2 MJ/kg<sup>64</sup> für Weizen angenommen /Hampicke 2009, Ripplinger 2008a, 2008b/.

**Tabelle 6.44:** Flächenbedarf der Mikroalgenkultivierung zur Biokraftstoffherzeugung

	Fläche [ha]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	Mikroalgen für Biodiesel	0	86	188	341	658
	Mikroalgen für Bioethanol	0	19	41	75	144
Bio	Mikroalgen für Biodiesel	0	115	251	455	877
	Mikroalgen für Bioethanol	0	25	55	100	193
Bio +	Mikroalgen für Biodiesel	0	144	314	569	1.097
	Mikroalgen für Bioethanol	0	32	69	125	241

Die Ergebnisse der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen sind in **Tabelle 6.45** dargestellt. In 2030 könnten durch die Kultivierung von Mikroalgen zwischen 0,8 und 1,4 PJ erzeugt werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Biodieselherstellung mit einem Anteil von ca. 90 %. Dies lässt sich sowohl auf die größere Anbaufläche für Biodiesel als auch auf die im Vergleich zu Bioethanol höhere Produktivität der Mikroalgen bei der Biodieselerzeugung zurückführen.

**Tabelle 6.45:** Resultierende zusätzliche Biokraftstoffproduktion durch Mikroalgen

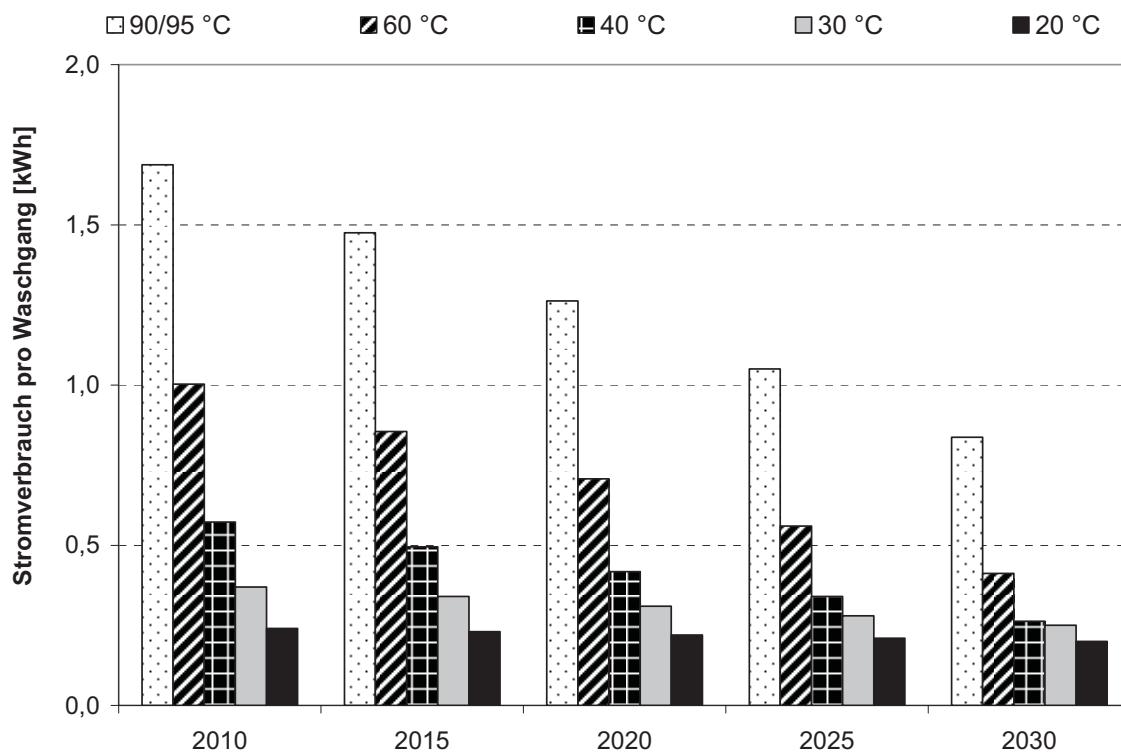
	Biokraftstoff [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	Biodiesel	0,00	0,06	0,16	0,34	0,74
	Bioethanol	0,00	0,01	0,02	0,04	0,09
	Gesamt	0,00	0,07	0,18	0,38	0,83
Bio	Biodiesel	0,00	0,08	0,23	0,45	0,99
	Bioethanol	0,00	0,01	0,02	0,05	0,12
	Gesamt	0,00	0,09	0,24	0,50	1,11
Bio +	Biodiesel	0,00	0,11	0,27	0,56	1,24
	Bioethanol	0,00	0,01	0,03	0,07	0,15
	Gesamt	0,00	0,12	0,30	0,63	1,38

## 6.2.2 Nutzung von Mikroorganismen und Enzymen zur gezielten Prozesssteuerung

Im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen werden bei der Nutzung von Enzymen zur gezielten Prozesssteuerung der Einsatz von Enzymen bei Waschmitteln (siehe Kapitel 5.3.2), der Enzymeinsatz in der Textilindustrie (Scouring), die Abwasserbehandlung mit anaeroben Bakterien, der Einsatz von Enzymen in der Metallreinigung, die Produktion von Adipinsäure, die Produktion von Butanol (ABE Prozess), die Produktion von Bernsteinsäure als Ersatz für Malelinsäureanhydrid sowie die Produktion von Ethyllactat als Ersatz für Ethylacetat näher betrachtet.

## Einsatz von Enzymen bei Waschmitteln

Die Rahmenannahmen für die Szenarien- und Sensitivitätsanalysen hinsichtlich des Einsatzes von Enzymen bei Waschmitteln basieren im Wesentlichen auf /Rüdenauer et al. 2004, Rüdenauer et al. 2006/. Der Durchschnittshaushalt in Deutschland wäscht 164-mal pro Jahr und pro Waschgang werden dabei 5 kg Wäsche gereinigt. Die durchschnittliche Lebensdauer einer Waschmaschine beträgt 11,2 Jahre. In Anlehnung an die Entwicklung des Strombedarfs pro Waschgang für den Bestand in 2001 und 2005 sowie für das Marktangebot in den Jahren 1990, 1995, 2000 und 2004 wird der zukünftige Stromverbrauch (Bio-Szenario) pro Waschgang für die unterschiedlichen Waschttemperaturen ermittelt (vgl. **Abbildung 6.2**). Diese Werte werden in den Sensitivitätsanalysen (Bio -, Bio +) jeweils um  $\pm 25\%$  variiert.



**Abbildung 6.2:** Entwicklung des Stromverbrauchs je Waschgang (Szenario Bio)

Der Einsatz von neuartigen Enzymen hat zur Folge, dass die Waschttemperaturen reduziert werden können. Durch den Einsatz der neuartigen Enzyme wird davon ausgegangen, dass ein vollständiger Wechsel um eine Temperaturstufe ermöglicht wird („one click down“). Da jedoch nicht alle Waschmaschinen über ein Waschttemperaturprogramm mit 20 °C verfügen, ist kein vollständiger Wechsel möglich. Die Verteilung der Waschgänge auf die unterschiedlichen Temperaturprogramme im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsrechnungen für das Basisjahr (2010) und die Jahre 2015 bis 2030 ist in **Tabelle 6.46** dargestellt. Es wird dabei davon ausgegangen, dass ein vollständiger Wechsel um eine Temperaturstufe („one click down“) erst 2020 möglich sein wird. Im Rahmen der Szenarienanalyse wird die Entwicklung ab 2015 um 5 Jahre verzögert (Bio -) bzw. beschleunigt (Bio +). Die damit verbun-

denen möglichen Energieeinsparungen sind in **Tabelle 6.47** dargestellt. Durch den Einsatz der Enzyme in Waschmitteln kann der Energiebedarf der Haushalte im Jahr 2030 basierend auf den Berechnungen im Rahmen der Sensitivitätsanalysen um ca. 11 bis 13 PJ reduziert werden.

**Tabelle 6.46:** Entwicklung der Verteilung der Waschttemperaturen bis 2030 durch den Einsatz von neuartigen Enzymen

Waschtemp.	2010	2015	2020	2025	2030
90/95 °C	10,1 %	5,1 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
60 °C	30,3 %	20,2 %	10,1 %	10,1 %	10,1 %
40 °C	37,4 %	33,9 %	30,3 %	30,3 %	30,3 %
30 °C	19,2 %	37,9 %	56,6 %	37,4 %	37,4 %
20 °C	3,0 %	3,0 %	3,0 %	22,2 %	22,2 %

**Tabelle 6.47:** Energieeinsparung durch den Einsatz neuartiger Enzyme in Waschmitteln

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	0,0	3,2	6,0	9,5	10,8
Bio	0,0	5,0	8,9	10,5	11,7
Bio +	0,0	7,7	9,7	11,2	12,7

### Enzymeinsatz in der Textilindustrie (Scouring)

Aufgrund von Faserbegleitstoffen, wie z. B. Zellwandresten aus Fetten, Wachsen, Pektinen oder Proteinen, muss Baumwolle vor der Verarbeitung und Veredelung gereinigt werden. Dieses Verfahren wird auch als „Scouring“ (Abkochen der Baumwolle) bezeichnet (siehe Kapitel 5.3.2). Nach /DESTATIS 2011/ wurden in Deutschland in 2010 ca. 9,5 Mio. kg Garne aus Baumwolle gebleicht, gefärbt bzw. bedruckt. Für die Szenarienbetrachtung wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2010 bereits 1 % der Baumwolle durch den Einsatz von Pektinase (enzymatisches Verfahren) behandelt wird. Dieser Anteil steigt im Jahr 2020 auf 25 % und in 2030 wird davon ausgegangen, dass 2/3 der Baumwolle anhand des Bioscouring gereinigt wird.

Nach /Nielsen et al. 2009/ kann durch den Einsatz des enzymatischen Verfahrens der Strombedarf um ca. 50 %, d. h. um 150 kWh/t abgekochter Baumwolle verringert werden. Die damit verbundenen möglichen Energieeinsparungen sind in **Tabelle 6.48** zusammengefasst. Es wird deutlich, dass aufgrund der angenommenen schnellen Verbreitung des biotechnologischen Verfahrens, die möglichen Einsparungen stark ansteigen. Als Ergebnis der Sensitivitätsanalysen kann festgestellt werden, dass in 2030 durch das enzymatische Scouring zwischen 1,9 und 3,2 PJ eingespart werden könnten.

**Tabelle 6.48:** Energieeinsparung durch das enzymatische Scouring von Baumwolle

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	0,0	0,4	0,6	1,4	1,9
Bio	0,0	0,5	0,8	1,8	2,6
Bio +	0,0	0,6	1,0	2,3	3,2



### Abwasserbehandlung mit anaeroben Bakterien

In Deutschland sind nach Aussagen von /Rossmath 2009/ ca. 2.000 industrielle Abwasserkläranlagen vorhanden, bei denen eine Umstellung von aeroben Bakterien auf anaerobe Bakterien prinzipiell möglich ist (siehe auch Kapitel 5.3.2). Nach /Austermann-Haun 2008/ sind bereits 10 % der Anlagen umgestellt und es kann von einer Umstellrate von 1 % pro Jahr ausgegangen werden. Für die Szenarien- und Sensitivitätsanalysen wird davon ausgegangen, dass in 2015 bereits 300 Anlagen umgestellt sind und diese Zahl bis 2030 auf 600 umgestellte Anlagen ansteigt.

Durch den Einsatz von anaeroben Bakterien kann die stromintensive Belüftung des Belebungsbeckens entfallen, wodurch der Strombedarf um ca. 70 % reduziert werden kann /dena 2008/. Darüber hinaus hat der Einsatz von anaeroben Bakterien den Vorteil, dass kohlenstoffhaltige Klärstoffe nicht zu CO<sub>2</sub> sondern zu ca. 95 % in Methan umgesetzt werden. Das entstehende Methan kann daher durch den Einsatz eines Blockheizkraftwerks (BHKW) zu Strom und Wärme umgewandelt werden. Im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen wird daher die zusätzlich mögliche Produktion von Strom und Wärme mit einem BHKW untersucht. Nach /dena 2008/ kann ein BHKW (Nennleistung 190 kW<sub>el</sub>, 240 kW<sub>th</sub>) im Jahr ca. 1.115 MWh Strom und 641 MWh Wärme erzeugen. Für die Berechnungen wird davon ausgegangen, dass 70 % der produzierten Wärme auch tatsächlich genutzt werden kann.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in **Tabelle 6.49** und **Tabelle 6.50** zusammengefasst. Durch die Umstellung von 30 % der industriellen Abwasserkläranlagen auf anaerobe Bakterien könnten im Bio-Szenario 0,8 PJ Strom eingespart und durch den Einsatz eines BHKWs zusätzlich 3,4 PJ (Wärme und Strom) erzeugt werden.

**Tabelle 6.49:** Stromeinsparung durch den Einsatz von anaeroben Bakterien in industriellen Abwasserkläranlagen

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	0,0	0,2	0,3	0,4	0,4
Bio	0,0	0,4	0,5	0,6	0,8
Bio +	0,0	0,6	0,8	1,0	1,2

**Tabelle 6.50:** Zusätzliche Energieproduktion durch den Einsatz von BHKWs bei industriellen Kläranlagen

	Zusätzliche Energieproduktion [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	Wärme	0,0	0,3	0,4	0,5	0,5
	Strom	0,0	0,7	0,9	1,1	1,4
Bio	Wärme	0,0	0,5	0,6	0,8	1,0
	Strom	0,0	1,2	1,6	2,0	2,4
Bio +	Wärme	0,0	0,8	1,0	1,3	1,5
	Strom	0,0	1,9	2,5	3,1	3,8

## Einsatz von Enzymen in der Metallreinigung

Im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen wird der Ersatz von konventionellen Metallreinigern auf Lösemittelbasis durch Metallreiniger auf biologischer Basis (Einsatz von Enzymen) untersucht (vgl. Kapitel 5.3.2). Hinsichtlich der Marktdurchdringung wird auf Angaben von /Frank 2009/ zurückgegriffen. Da nur europaweite Verkaufszahlen verfügbar sind, wird davon ausgegangen, dass 50 % der Anlagen in Deutschland eingesetzt werden. Dies entspricht für 2010 ca. 3.800 Anlagen und damit ca. 2 % der in Deutschland eingesetzten Kaltreinigern. Die für die Szenarien angenommene Marktdurchdringung ist in **Tabelle 6.51** dargestellt.

**Tabelle 6.51:** Marktdurchdringung des Einsatzes von Enzymen bei Metallreinigern

[%]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	0	5	8	11	15
Bio	0	6	10	15	20
Bio +	0	8	13	19	25

Um die Änderungen beim Energiebedarf ermitteln zu können, wird neben dem auf Enzymen basierenden Metallreiniger (Bioreiniger) ein konventioneller Metallreiniger (Kaltreiniger) als Referenzverfahren betrachtet. Aufgrund von Hersteller- und Anwenderangaben (siehe /BIC 2009a, 2009b, Frank 2009, J&K 2010, OFRU 2010/) werden für die Szenarienberechnung folgende technische Rahmendaten eingesetzt. Die Leistungsaufnahme des konventionellen Kaltreinigers beträgt 0,04 kW. Durch die notwendige Erwärmung der Reinigungsflüssigkeit beim Bioreiniger ergibt sich hierfür eine erhöhte Leistungsaufnahme von 0,44 kW. Der Kaltreiniger benötigt durchschnittlich 300 l Lösungsmittel pro Jahr, die nach der Verwendung aufbereitet werden müssen. Die Aufbereitung des Lösungsmittels hat eine Leistungsaufnahme von 2 kW bei einem Durchsatz von 5 l/h. Beim enzymatischen Prozess reduziert sich einerseits die Menge des benötigten Lösungsmittels auf 150 l pro Jahr und es kann ohne weitere Aufbereitung der Kanalisation zugeführt werden.

Für die Szenarien- und Sensitivitätsanalysen wird von einer durchschnittlichen jährlichen Betriebsdauer von 265 Stunden ausgegangen /Frank 2009/. Der Energieverbrauch eines Kaltreinigers ergibt sich damit zu 130 kWh/a. Beim enzymatischen Reiniger entsteht durch die benötigte Erwärmung des Lösungsmittels zwar ein erhöhter Energiebedarf beim Betrieb, dieser Mehrverbrauch kann jedoch durch den möglichen Verzicht auf die Aufbereitung des Lösungsmittels kompensiert werden. Der jährliche Energieverbrauch des Bioreinigers ermittelt sich, basierend auf den genannten technischen Parametern, zu 116 kWh/a.

**Tabelle 6.52** stellt die Ergebnisse der Szenarienrechnung für den Einsatz von Enzymen bei Metallreinigern dar. Bei einer Marktdurchdringung von 20 % im Jahr 2030 können durch den biotechnologischen Prozess ca. 1,8 PJ (Bio-Szenario) eingespart werden. Geht man von einer progressiven Entwicklung aus, so erhöht sich die mögliche Einsparung auf 2,3 PJ.

**Tabelle 6.52:** Energieeinsparungen durch den Einsatz von Enzymen bei der Metallreinigung

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	0,0	0,4	0,7	1,0	1,4
Bio	0,0	0,5	0,9	1,4	1,8
Bio +	0,0	0,7	1,1	1,7	2,3

### Produktion von Adipinsäure

Im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen wird hinsichtlich der Produktionsmenge von Adipinsäure im Jahr 2010 von 597.852 t ausgegangen /DESTATIS 2011/. Des Weiteren wird bis 2030 eine geringfügige Steigerung der Produktionsmenge zu Grunde gelegt (vgl. **Tabelle 6.53**).

**Tabelle 6.53:** Entwicklung der Produktionsmenge von Adipinsäure

Adipinsäure [t/a]	2010	2015	2020	2025	2030
	597.852	609.809	622.005	634.445	647.134

Hinsichtlich der zukünftigen Marktdurchdringung der biotechnologischen Herstellungsverfahren zur Produktion von Adipin geht /BREW 2006/ in einem „High scenario“ davon aus, dass bereits 2010 ca. 1/4 der Produktion umgestellt ist. Dieser Wert steigt bis 2030 auf 92 % an /BREW 2006/. Für die Szenario- und Sensitivitätsanalysen wird für die progressive Entwicklung (Bio +), ein jeweils um 80 % geringeres Wachstum angenommen und mit einer Umstellung wird erst in 2015 gerechnet. Der Marktanteil steigt somit von 20 % in 2015 auf 74 % in 2030 an.

Aufgrund des deutlichen Unterschieds beim Energiebedarf und den Treibhausgasemissionen zwischen dem ersten biotechnologischen Prozess (Bio 1) und den beiden weiteren im Rahmen von /BREW 2006/ betrachteten biotechnologischen Prozessen (Bio 2 und Bio 3) zur Herstellung von Adipinsäure (vgl. Kapitel 5.3.2 und **Abbildung 5.4**) wird für die Szenarienbetrachtung bei der Mittelwertbildung der Prozess Bio 1 nicht berücksichtigt. Für den petrochemischen Prozess wird ein nicht-erneuerbarer Energieverbrauch von 85,5 GJ/t und für den biotechnologischen Prozess entsprechend ein durchschnittlicher Wert von 30,9 GJ/t angesetzt.

Die resultierenden Einsparungen im Bio-Szenario steigen von 5 PJ im Jahr 2015 auf über 19 PJ im Jahr 2030 an (**Tabelle 6.54**).

**Tabelle 6.54:** Energieeinsparung durch die biotechnologische Produktion von Adipinsäure

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	0,0	2,5	6,4	8,1	9,8
Bio	0,0	5,0	12,7	16,1	19,6
Bio +	0,0	8,3	21,2	26,8	32,7

### Butanol-Produktion (ABE-Prozess)

Basierend auf den umfangreichen Untersuchungen nach /BREW 2006/ wird die energiebezogene Auswirkung der biotechnologischen Herstellung von Butanol im Rahmen des ABE-Prozesses untersucht. Für die Szenarien- und Sensitivitätsanalysen wird davon ausgegangen, dass in 2030 1/4 der Butanolmenge bereits biotechnologisch hergestellt wird. Die für die Berechnung der möglichen Einsparung verwendete jährliche Produktionsmenge von Butanol ist in **Tabelle 6.55** dargestellt. In 2010 wurden nach /DESTATIS 2011/ 60.126 t Butanol hergestellt. Für die Jahre 2015 bis 2030 wird von einer leichten Produktionssteigerung ausgegangen.

**Tabelle 6.55:** Entwicklung der jährlichen Butanolproduktion

Butanol [t/a]	2010	2015	2020	2025	2030
	60.126	64.936	67.942	70.949	73.955

/BREW 2006/ geht in einem „High scenario“ davon aus, dass bereits in 2020 der Anteil des biotechnologischen Prozesses ca. 25 % beträgt. In den Szenarien- und Sensitivitätsbetrachtungen wird jedoch konservativ davon ausgegangen, dass dieser Wert erst im Jahr 2030 erreicht wird. Der Marktanteil des biotechnologischen Herstellungsprozesses beginnt in 2015 mit 1 % steigt in 2020 auf 5 % bzw. in 2025 auf 15 % an.

Für den konventionellen petrochemischen Prozess wird davon ausgegangen, dass der nicht-erneuerbare Energiebedarf 69,3 GJ/t Butanol beträgt. Da im Rahmen der Studie unterschiedliche biotechnologische Prozesse untersucht wurden, wird für die Szenarienbetrachtung der Mittelwert aus den unterschiedlichen biotechnologischen Prozessen (Bio 1 bis Bio 6) einerseits als auch aus der unterschiedlichen Rohstoffbasis (Stärke, Zuckerrohr, Lignocellulose) verwendet, da noch nicht abgeschätzt werden kann, welcher Prozess sich in Zukunft durchsetzen wird bzw. welche Verbesserungen auch bei Herstellungsverfahren nach heutigem Stand der Technik zukünftig möglich sein werden. Damit ergibt sich eine mögliche Einsparung beim nicht-erneuerbaren Energiebedarf von 65,0 GJ/t produziertem Butanol (siehe /BREW 2006/, Kapitel 5.3.2 und **Abbildung 5.6**).

Als Ergebnis der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen zeigt sich, dass die Umstellung der petrochemischen Butanolherstellung nach dem ABE-Prozess auf biotechnologische Verfahren im Jahr 2030 Einsparung an nicht-erneuerbarem Energieverbrauch von 0,9 bis 1,5 PJ zur Folge hätte (vgl. **Tabelle 6.56**).

**Tabelle 6.56:** Energieeinsparung durch die biotechnologische Herstellung von Butanol

Energieeinsparung [PJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	0,0	0,0	0,2	0,5	0,9
Bio	0,0	0,0	0,2	0,7	1,2
Bio +	0,0	0,1	0,3	0,9	1,5

## Produktion von Bernsteinsäure als Ersatz für Malelinsäureanhydrid

Nach /Arpe 2007/ wurden in 2003 ca. 32 t Malelinsäureanhydrid in Deutschland produziert und nach /Grimm et al. 2011/ kann von einer stark zunehmenden Produktionsmenge ausgegangen werden. Die der Rechnung zugrunde gelegte Produktionsmenge ist in **Tabelle 6.57** dargestellt.

**Tabelle 6.57:** Entwicklung der jährlichen Malelinsäureanhydridproduktionsmenge

Malelinsäureanhydrid [t/a]	2010	2015	2020	2025	2030
	42	46	51	56	61

Hinsichtlich der Marktdurchdringung des Ersatzes von Malelinsäureanhydrid durch Bernsteinsäure wird in Anlehnung an /BREW 2006/ für die progressive Entwicklung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse (Bio +) davon ausgegangen, dass der Marktanteil von 19 % im Jahr 2015 auf knapp 80 % im Jahr 2030 ansteigt.

Die biotechnologisch hergestellte Bernsteinsäure kann nach /BREW 2006/ das petrochemisch hergestellte Malelinsäureanhydrid nicht zu 100 % ersetzen. Es wird daher in den Analysen ein technisches Substitutionspotenzial von 85 % angenommen.

Bei den Szenarien- und Sensitivitätsanalysen für die Substitution von Malelinsäureanhydrid durch Bernsteinsäure als biotechnologisch hergestelltes Substitutionsprodukt wird hinsichtlich den möglichen Einsparungen auf die Untersuchungen von /BREW 2006/ zurückgegriffen. In dieser Studie werden sechs biotechnologische und zwei petrochemische Herstellungsprozesse detailliert untersucht (vgl. Kapitel 5.3.2 und **Abbildung 5.8**). Für die Berechnungen wird dabei der Mittelwert der unterschiedlichen Prozesse als auch der unterschiedlichen Rohstoffbasis<sup>65</sup> (Stärke, Zuckerrohr, Lignocellulose) verwendet, da noch nicht abgeschätzt werden kann, welcher Prozess sich in Zukunft durchsetzen wird bzw. welche Verbesserungen auch bei Herstellungsverfahren nach heutigem Stand der Technik zukünftig möglich sein werden. Daher wird im Rahmen der Szenarien- und der Sensitivitätsanalysen beim petrochemischen Prozess mit einem durchschnittlicher nicht-erneuerbaren Energiebedarf von 82 GJ/t und beim biotechnologischen Prozess mit einem nicht-erneuerbarer Energiebedarf von durchschnittlich 31 GJ/t gerechnet.

Als Ergebnis der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen kann festgestellt werden, dass die möglichen Einsparungen aufgrund der geringen Produktionsmenge im Vergleich zu den anderen betrachteten Chemikalien gering ausfallen und im Jahr 2030 zwischen 0,8 und 2,6 TJ betragen (vgl. **Tabelle 6.58**).

**Tabelle 6.58:** Energieeinsparung durch die Substitution von Malelinsäureanhydrid durch Bernsteinsäure

Energieeinsparung [TJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	0,0	0,1	0,4	0,6	0,8
Bio	0,0	0,3	0,8	1,2	1,6
Bio +	0,0	0,5	1,4	2,0	2,6

<sup>65</sup> bei den biotechnologischen Herstellungsverfahren

### Produktion von Ethyllactat als Ersatz für Ethylacetat

Die im Rahmen der Analysen zugrunde gelegte Produktionsmenge von Ethylacetat ist in **Tabelle 6.59** dargestellt. Ausgehend von 198 t im Jahr 2010 /DESTATIS 2011/ wird bis 2030 eine leichte Produktionssteigerung angenommen.

**Tabelle 6.59:** Entwicklung der Produktionsmenge von Ethylacetat

Ethylacetat [t/a]	2010	2015	2020	2025	2030
	198	202	206	210	214

/BREW 2006/ betrachtet für die mögliche Substitution von Ethylacetat durch Ethyllactat unterschiedliche Szenarien. Die dort verwendeten Substitutionspotenziale sind in **Tabelle 6.60** dargestellt.

**Tabelle 6.60:** Substitutionspotenziale von Ethyllactat für Ethylacetat /BREW 2006/

Substitutionspotenzial [%]	2010	2020	2030
Medium Szenario	13	40	70
High Szenario	25	92	100

In Anlehnung an /BREW 2006/ wird daher für die Berechnung im Rahmen der progressiven Entwicklung in der Sensitivitätsanalyse (Bio +) davon ausgegangen, dass im Jahr 2015 ca. 19 % des petrochemisch produzierten Ethylacetats durch biotechnologisch hergestelltes Ethyllactat substituiert wird und dieser Anteil bis 2030 auf 85 % ansteigt.

Auch für die Herstellung von Ethyllactat als Ersatz für Ethylacetat werden in /BREW 2006/ unterschiedliche Herstellungsverfahren (sieben biotechnologische und fünf petrochemische) detailliert untersucht (vgl. Kapitel 5.3.2 und **Abbildung 5.10**). Für die Berechnungen im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen wird der Mittelwert der unterschiedlichen Prozesse als auch der unterschiedlichen Rohstoffbasis<sup>66</sup> (Stärke, Zuckerrohr, Lignocellulose) verwendet, da noch nicht abgeschätzt werden kann, welcher Prozess sich in Zukunft durchsetzen wird bzw. welche Verbesserungen auch bei Herstellungsverfahren nach heutigem Stand der Technik zukünftig möglich sein werden. Für die Berechnungen wird daher davon ausgegangen, dass im Mittel eine Einsparung an nicht-erneuerbarem Energieverbrauch von 37,8 GJ/t ermöglicht wird.

Die damit verbundenen möglichen Energieeinsparungen sind in **Tabelle 6.61** dargestellt.

**Tabelle 6.61:** Energieeinsparung durch die Substitution von Ethylacetat durch Ethyllactat

Energieeinsparung [TJ]	2010	2015	2020	2025	2030
Bio -	0,0	0,5	1,9	2,2	2,6
Bio	0,0	1,1	3,9	4,5	5,2
Bio +	0,0	1,8	6,4	7,5	8,6

<sup>66</sup> bei den biotechnologischen Herstellungsverfahren



Ähnlich wie bei der Substitution von Malelinsäureanhydrid durch Bernsteinsäure fallen auch beim Ersatz von Ethylacetat durch Ethyllactat die möglichen Einsparungen vergleichsweise gering aus. Im Jahr 2030 sind Einsparungen zwischen 2,6 und 8,6 TJ realisierbar.



## 7 Zusammenfassende Bewertung und energiewirtschaftliche Einordnung

Auf Basis der systematischen Analyse der Auswirkungen und Potenziale von Basisinnovationen (siehe Kapitel 4.3 und 5.3) und der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen (siehe Kapitel 6) werden die möglichen Auswirkungen der beiden Basisinnovationen Nanotechnologie und Biotechnologie auf die Energiewirtschaft zusammenfassend dargestellt.

### 7.1 Nanotechnologie

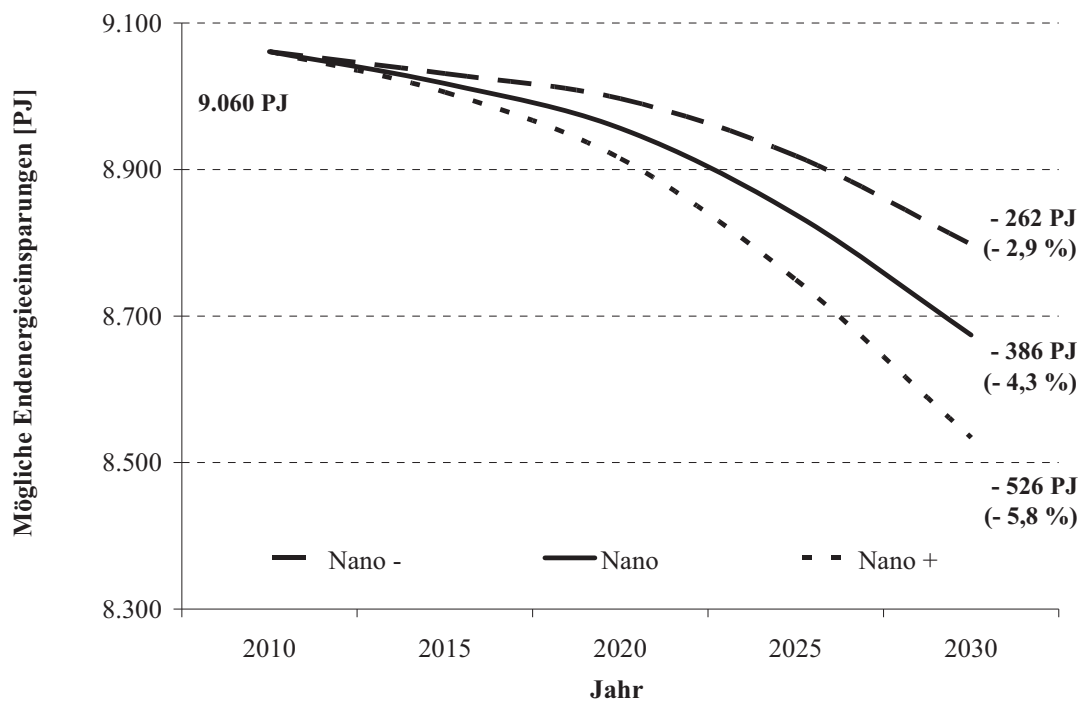
In Kapitel 4.4 wurde das theoretische Potenzial der untersuchten nanotechnologischen Anwendungen bestimmt und in Kapitel 6.1 wurden die Szenarien- und Sensitivitätsanalysen detailliert dargestellt. Um eine zusammenfassende Bewertung der möglichen Auswirkungen der Nanotechnologie auf die Energiewirtschaft in Deutschland zu erhalten, werden die Ergebnisse der Szenarienanalysen und die Berechnungen zum theoretischen Potenzial als Grundlage für eine energiewirtschaftliche Einordnung der untersuchten nanotechnologischen Anwendungen verwendet.

**Abbildung 7.1** zeigt die Entwicklung der möglichen Endenergieeinsparung von 2010 bis 2030. Im Hinblick auf Unsicherheiten bei der zukünftigen technischen Entwicklung von nanotechnologischen Anwendungen, ihrer zukünftigen Marktdurchdringung und des zukünftigen Energieverbrauchs wurden, neben dem Nano-Szenario, im Rahmen der Sensitivitätsanalysen, eine progressive Entwicklung (Nano +) und eine konservative Entwicklung (Nano -) berechnet. Das Nano-Szenario fasst die erwartete Entwicklung zusammen. Die beiden Sensitivitätsanalysen variieren Eingangsp Parameter und Rahmenannahmen wie z. B. Marktdurchdringung oder Entscheidungsrate um + 25 % (Nano +) und - 25 % (Nano -). Bis 2030 variieren die möglichen Einsparungen an Endenergie zwischen 262 und 526 PJ. Im Vergleich zum Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2010 (9.060 PJ) könnten durch die betrachteten nanotechnologischen Anwendungen Einsparungen von ca. 3 bis 6 % ermöglicht werden.

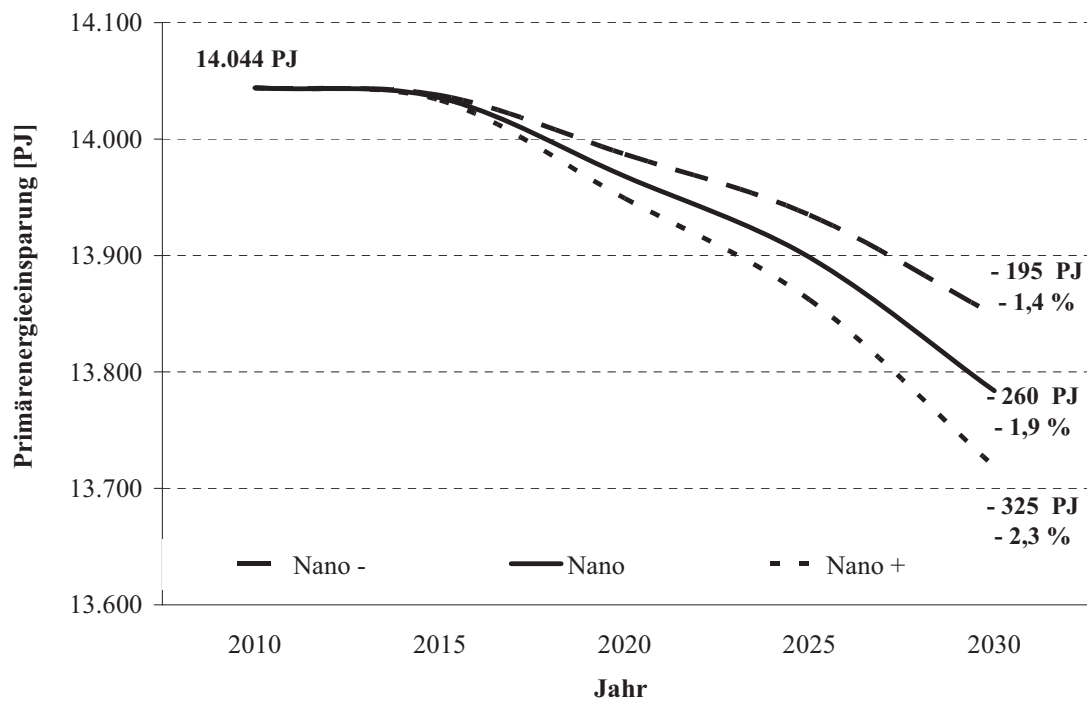
Zusätzlich könnte der Einsatz von nanostrukturierten Membranen zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung eine Primärenergieeinsparung in der Größenordnung von 195 PJ bis 325 PJ ermöglichen (siehe **Abbildung 7.2**). In Bezug auf den Primärenergieverbrauch in 2010 (14.044 PJ) entspricht dies möglichen Einsparungen von 1,4 bis 2,3 %.

**Abbildung 7.3** zeigt die mögliche Entwicklung der zusätzlichen Energieerzeugung durch die betrachteten nanotechnologischen Anwendungen bis 2030 für die Szenarienberechnung und die beiden Sensitivitätsanalysen. Die mögliche zusätzliche Energieerzeugung durch den Einsatz von Antireflexschichten, neuartigen Photovoltaiktechnologien und thermoelektrischen Generatoren variiert zwischen 64 PJ und ca. 159 PJ im Jahr 2030.

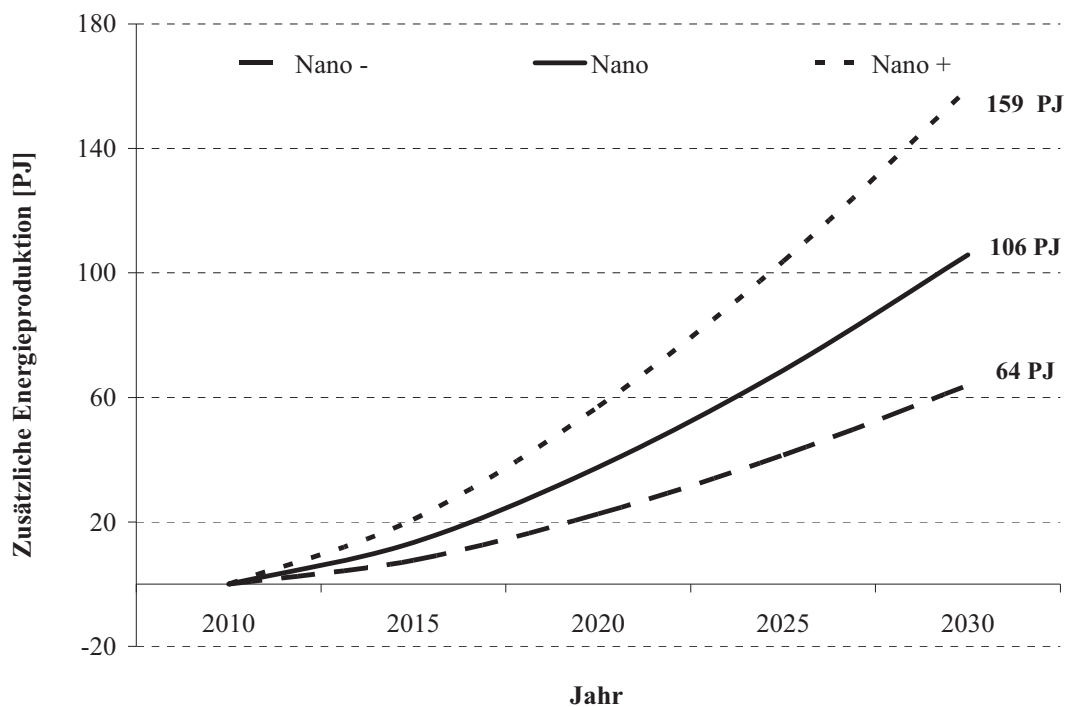
Für alle Entwicklungen zeigt sich, dass die Auswirkungen der analysierten nanotechnologischen Anwendungen auf den Energieverbrauch als auch auf die zusätzliche Energieerzeugung erst spät im betrachteten Zeitrahmen signifikante Auswirkungen aufweisen. Im Jahr 2020 entsprechen die möglichen Endenergieeinsparungen im Nano-Szenario lediglich 1,1 % des Endenergieverbrauchs im Jahr 2010.



**Abbildung 7.1:** Entwicklung der möglichen Endenergieeinsparungen von 2010 bis 2030 für die Nanotechnologie



**Abbildung 7.2:** Entwicklung der möglichen Primärenergieeinsparung durch den Einsatz von nano-strukturierten Membranen bei CCS von 2010 bis 2030



**Abbildung 7.3:** Entwicklung der möglichen zusätzlichen Energieerzeugung von 2010 bis 2030 für die Nanotechnologie

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die oben genannten Anwendungen bis 2030 für Deutschland ein signifikantes Energieeinsparpotenzial aufweisen. Es zeigt sich jedoch auch, dass die Auswirkungen der betrachteten Anwendungen erst nach mehreren Jahren deutlich zum Tragen kommen. Die Entwicklung des Potenzials zur zusätzlichen Energieerzeugung weist ein sehr ähnliches Bild auf, jedoch mit einer zeitlichen Verzögerung.

**Tabelle 7.1** fasst die Ergebnisse der Szenarienanalyse für die untersuchten nanotechnologischen Anwendungen zusammen und stellt die möglichen Auswirkungen und Änderungen bis ins Jahr 2030 für das Nano-Szenario dem theoretischen Potenzial gegenüber (anteilig). Die Ergebnisse der Szenarienberechnungen zeigen, dass die untersuchten nanotechnologischen Anwendungen das Potenzial haben, bis im Jahr 2030 ca. 647 PJ einzusparen. Basierend auf der Analyse von Antireflexschichten, neuartigen Photovoltaiktechnologien und dem Einsatz von thermoelektrischen Generatoren in Kraftwerken könnten zudem zusätzlich 106 PJ an Energie erzeugt werden.

Dabei lässt sich der größte Anteil bei der zusätzlichen Energieerzeugung auf den Einsatz von Dünnschichtsolarzellen zurückführen. Diese weisen ein zusätzliches Potenzial von ca. 50 PJ auf. Hinsichtlich der möglichen Energieeinsparungen stellen die Nutzung von nanostrukturierten Membranen zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung (260 PJ), der Ersatz von konventionellen Beleuchtungstechnologien durch LED und OLED (153 PJ) sowie der Einsatz von Brennstoffzellenheizgeräten (81 PJ) die größten Einsparpotenziale dar. Im Verkehrsbereich könnten durch den Einsatz von Nanofüllstoffen in Autoreifen (35 PJ) und durch die Nutzung des Kraftstoffadditivs Ceroxid (35 PJ) entsprechend große Energieeinsparpotenziale erschlossen werden. Hinsichtlich des Einsatzes des Kraftstoffadditivs Ceroxid muss jedoch beachtet werden, dass bisher keine ausreichenden Informationen über die möglichen Auswirkungen auf

Mensch und Umwelt vorliegen. Bei der Bewertung neuer Innovationen müssen daher mögliche negative Auswirkungen neben den realisierbaren Potenzialen bei der Gesamtbewertung beachtet werden. Der Einsatz von Nanolacken im Automobilbereich oder die Verwendung von Nanokatalysatoren (Styrolproduktion) weisen im Vergleich zu den vorher genannten Anwendungen geringere Einsparpotenziale auf. Auch der Einsatz von OLED Displays zeigt bis 2030 ein relativ kleines Einsparpotenzial, was auf die bis dahin noch geringe Anzahl an verwendeten Geräten zurückzuführen ist.

**Tabelle 7.1:** Änderungen entlang der energiewirtschaftlichen Wertschöpfungskette von 2010 zu 2030 (Nano-Szenario)

Anwendungen		Entwicklung im Nano-Szenario bis 2030 [PJ] und Anteil im Vergleich zum theoretischen Potenzial [%]					
		Energieerzeugung		Energie-wandlung, -speicherung/-verteilung		Energie-nutzung	
		[PJ]	[%]	[PJ]	[%]	[PJ]	[%]
Antireflexschichten bei der Solarenergie-nutzung	Solarthermie	2,8	95,0				
	Solarthermische Kraftwerke	0,8	74,3				
	PV	0,7	95,0				
Neuartige Photovoltaiktechnologien	Dünnschichtzellen	48,8	25,0				
	Farbstoffsolarzellen	20,3	25,0				
	Organische Polymerzellen	6,7	22,6				
	Stapel Solarzellen	6,0	25,0				
	Quantenpunktsolarzellen	5,6	25,0				
Brennstoffzellenheizgeräte				81,5	49,5		
Brennstoffzellenfahrzeuge				10,2	1,6		
Kraftstoffadditiv Ceroxid				34,8	55,5		
Nanostrukturierte Membran zur CO <sub>2</sub> -Abscheidung				260,2	63,7		
Thermoelektrische Generatoren	Auto					1,1	50,7
	Kraftwerk	14,2	30,0				
Superkondensatoren in Hybridbussen						0,8	27,7
LED im Automobilbereich						4,6	92,4
OLED und LED in der Allgemeinbeleuchtung						153,1	74,1
OLED Displays						10,6	32,0
Ultrahochfester Beton						0,4	2,5
Dämmanwendung mit VIP						35,1	29,3
Polycarbonat für Automobilverschleißung						1,1	70,0
Nanolacke im Automobilbereich	Produktion und Applikation					0,2	25,0
	Nutzungsphase					0,0	25,0



Fortsetzung von **Tabelle 7.1:** Änderungen entlang der energiewirtschaftlichen Wertschöpfungskette von 2010 zu 2030 (Nano-Szenario)

Anwendungen	Entwicklung im Nano-Szenario bis 2030 [PJ] und Anteil im Vergleich zum theoretischen Potenzial [%]					
	Energieerzeugung		Energie-wandlung, -speicherung/-verteilung		Energie-nutzung	
	[PJ]	[%]	[PJ]	[%]	[PJ]	[%]
Nanofüllstoffe in Autoreifen					34,5	70,0
Reibungsreduzierende Beschichtungen					14,8	9,1
Nanokatalysatoren (Styrol)					3,7	50,0
Nanopartikel in der Kunststoffproduktion					0,4	100,0
<b>Summe</b>	<b>105,8</b>	<b>26,2</b>	<b>386,6</b>	<b>30,5</b>	<b>260,4</b>	<b>42,8</b>

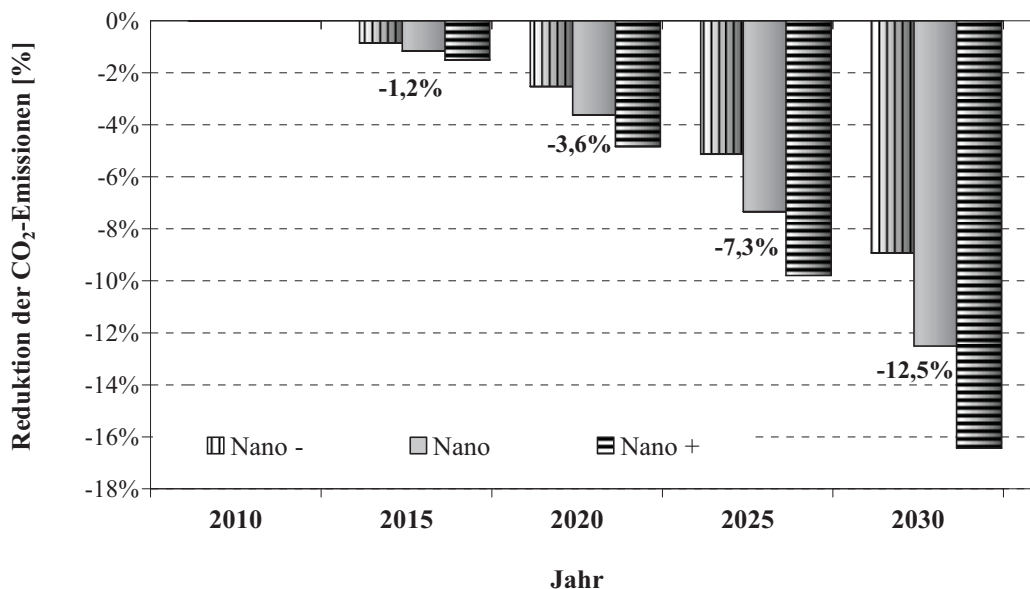
**Tabelle 7.2** vergleicht die Ergebnisse des Nano-Szenarios auf sektoraler Ebene (Wertschöpfungskette) mit dem theoretischen Potenzial (vgl. Kapitel 4.4) im Jahr 2030. Das Ergebnis zeigt deutlich, dass im Verkehrsbereich und in der Industrie zukünftig noch die größten Einsparpotenziale zu erwarten sind. Im Verkehrsbereich könnten bis 2030 ca. 11 % und in der Industrie ca. 47 % des theoretischen Potenzials genutzt werden. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der möglichen zusätzlichen Energieproduktion. Hier könnten bis 2030 ca. 26 % des theoretischen Potenzials realisiert werden. Insgesamt lässt sich feststellen, dass im Bereich der Energieeinsparung die untersuchten nanotechnologischen Anwendungen insgesamt in 2030 ein signifikantes Potenzial aufweisen und ca. 1/3 des theoretischen Potenzials ausgeschöpft werden könnte. Aber auch im Bereich der Energieerzeugung und -wandlung zeichnet sich bis 2030 bereits das mögliche Potenzial der Nanotechnologie ab.

**Tabelle 7.2:** Vergleich des Nano-Szenarios mit dem theoretischen Potenzial der Nanotechnologie in 2030 für unterschiedliche Sektoren

[PJ]	Erzeugung / Wandlung	Industrie	GHD	Haushalte	Verkehr	Summe
Entwicklung bis 2030 (Nano-Szenario)						
Energieeinsparung	260,2	26,2	108,7	150,0	101,8	647,0
Zusätzliche Energieproduktion	105,8					105,8
Theoretisches Potenzial						
Energieeinsparung	408,6	55,6	148,1	346,8	916,5	1.875,5
Zusätzliche Energieproduktion	404,0					404,0

Neben Verbesserungen bei der Energieeffizienz und Energieeinsparungen ist die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen eine bedeutende Herausforderung für die Zukunft. In dieser Hinsicht stellt **Abbildung 7.4** die möglichen Einsparungen an CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz der oben genannten nanotechnologischen Anwendungen im Bereich der Energieein-

sparung sowie der zusätzlichen Energieerzeugung (Antireflexbeschichtungen, neuartige Photovoltaiktechnologien, thermoelektrische Generatoren in Kraftwerken) für den Zeitraum von 2010 bis 2030 für die das Nano-Szenario und die berechneten Entwicklungen im Rahmen der Sensitivitätsanalysen dar. Im Vergleich zu den energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland im Jahr 2010 (777 Mio. t) scheint eine Reduktion von 97 Mio. t CO<sub>2</sub> (12,5 %) in 2030 möglich. Die Untersuchungen von /Cientifica 2007a, 2007b/ und /Luther 2008/ kommen zu ähnlichen Ergebnissen hinsichtlich der möglichen Auswirkungen und Effekte der Nanotechnologie auf die Energiewirtschaft. Nach /Cientifica 2007a, 2007b/ könnte der weltweite Einsatz von nanotechnologiebasierten Anwendungen bereits in 2010 zu CO<sub>2</sub>-Einsparungen von 0,2 Mio. t führen. Diese Reduktionen resultieren hauptsächlich aus Verbesserungen im Gebäudebereich (neue Dämmwendungen) und im Verkehrssektor (Verbesserungen bei der Verbrennungstechnologie). Sowohl /Cientifica 2007a, 2007b/ als auch /Luther 2008/ kommen zu dem Schluss, dass die Nanotechnologie große Potenziale zur Energieeinsparung und der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweist, diese jedoch nicht kurzfristig realisiert werden können.



**Abbildung 7.4:** Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Energieeinsparung und zusätzliche Energieerzeugung für die Nanotechnologie

Basierend auf der Studie „Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030: Energieprognose 2009“ /Fahl et al. 2010/ im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) vergleicht **Tabelle 7.3** die Ergebnisse des Nano-Szenarios mit der projizierten Entwicklung des Energieverbrauchs in Deutschland im Jahr 2030 (Referenzprognose). Die absoluten Werte stellen das Ergebnis des Nano-Szenarios mit Einfluss der nanotechnologischen Anwendungen im Jahr 2030 dar. Es wird ersichtlich, dass die betrachteten Anwendungen im Jahr 2030 knapp 5 % der Stromproduktion in Deutschland decken könnten. Hinsichtlich möglicher Energieeinsparungen könnte die Nanotechnologie z. B. den Energieverbrauch des GHD-Sektors in 2030 um ca. 9 % verringern. Bei den Haushalten sind Einsparungen von über 7 % und im Verkehrsbereich von ca. 4 % denkbar.

Prinzipiell gibt es weitere nanotechnologische Anwendungen, die im Jahr 2030 zur Energieeinsparung bzw. zur zusätzlichen Energieproduktion beitragen könnten. Gerade im Gebäudebereich zeigen die Forschungsbemühungen bei Aerogelen, dass in Zukunft aussichtsreiche Anwendungsmöglichkeiten bestehen, die den Energiebedarf zur Raumheizung deutlich reduzieren könnten. Andere aussichtsreiche Möglichkeiten sind der Einsatz von Nanopartikeln im Leichtbau. Daraus könnten beispielsweise verbesserte Windkraftanlagen oder ein geringeres Fahrzeuggewicht resultieren.

**Tabelle 7.3:** Vergleich zwischen dem Nano-Szenario und der Projektion nach /Fahl et al. 2010/

Sektor	Energieeinsparung bis 2030 (Nano-Szenario)		Referenzwert 2030 *
	[PJ]	[%]	[PJ]
Zusätzliche Stromproduktion	103,0	4,6	2.236 <sup>67</sup>
Industrie	26,2	1,2	2.130 <sup>68</sup>
GHD	108,7	8,8	1.241 <sup>68</sup>
Haushalte	150,0	7,6	1.982 <sup>68</sup>
Verkehr	101,8	4,2	2.442 <sup>68</sup>

\* siehe /Fahl et al. 2010/

## 7.2 Biotechnologie

Auf Basis der systematischen Analyse der Auswirkungen und Potenziale (siehe Kapitel 4.3 und 5.3) und der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen (siehe Kapitel 6) werden die möglichen Auswirkungen der Biotechnologie auf die Energiewirtschaft in Deutschland zusammengefasst und dienen als Grundlage für eine energiewirtschaftliche Einordnung der untersuchten biotechnologischen Prozesse und Anwendungen.

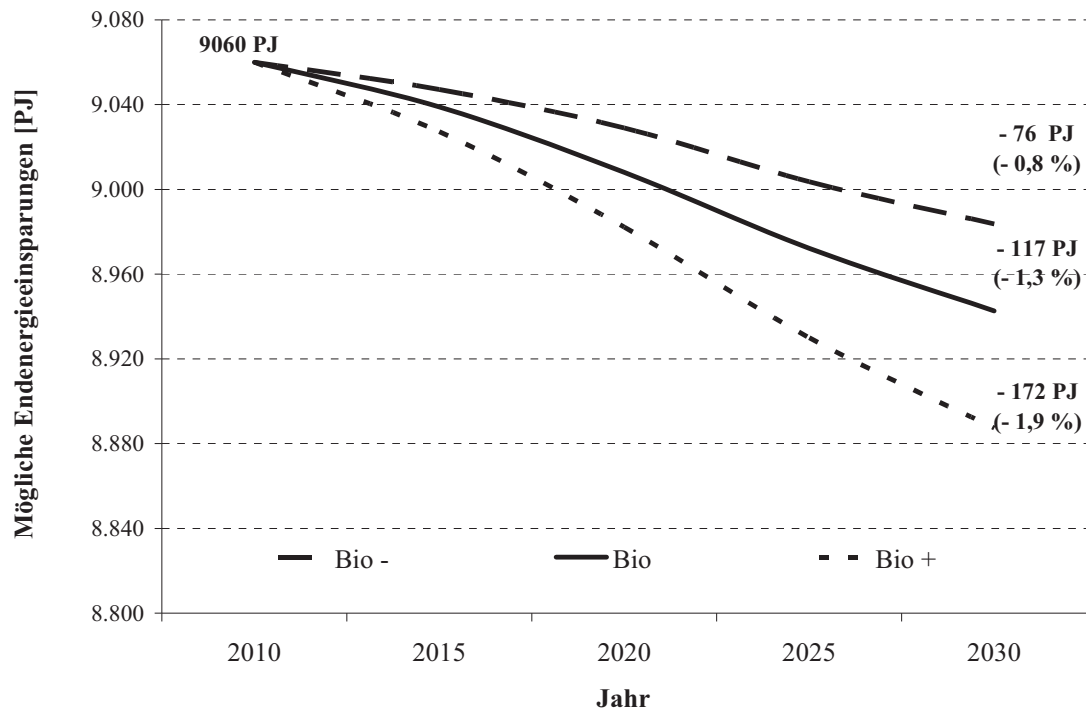
Hinsichtlich des Potenzials Energie einzusparen lässt sich feststellen, dass die betrachteten Anwendungen bereits im Jahr 2030 signifikante Auswirkungen zeigen und über 55 % des theoretischen Einsparpotenzials realisieren könnten. **Abbildung 7.5** zeigt die Entwicklung der möglichen Energieeinsparung durch den Einsatz biotechnologischer Anwendungen von 2010 bis 2030 für das Bio-Szenario und die beiden Sensitivitätsanalysen (Bio -, Bio +). Auch bei den Untersuchungen zur Biotechnologie wurden, wie bei der Nanotechnologie, aufgrund der Unsicherheiten bei der zukünftigen technischen Entwicklung von biotechnologischen Anwendungen, ihrer zukünftigen Marktdurchdringung und des zukünftigen Energieverbrauchs, neben der Szenarienberechnung eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Das Bio-Szenario fasst die erwartete Entwicklung zusammen. Bei den Berechnungen der Sensitivitätsanalysen werden Eingangsparameter und Rahmenannahmen, wie z. B. die Marktdurchdringung, um + 25 % (Bio +) und - 25 % (Bio -) variiert.

Die möglichen Einsparungen variieren in 2030 zwischen 76 und 172 PJ. Dies entspricht im Vergleich zum Endenergiebedarf in 2010 (9.060 PJ) einer Einsparung von 0,8

<sup>67</sup> Bruttostromproduktion nach /Fahl et al. 2010/

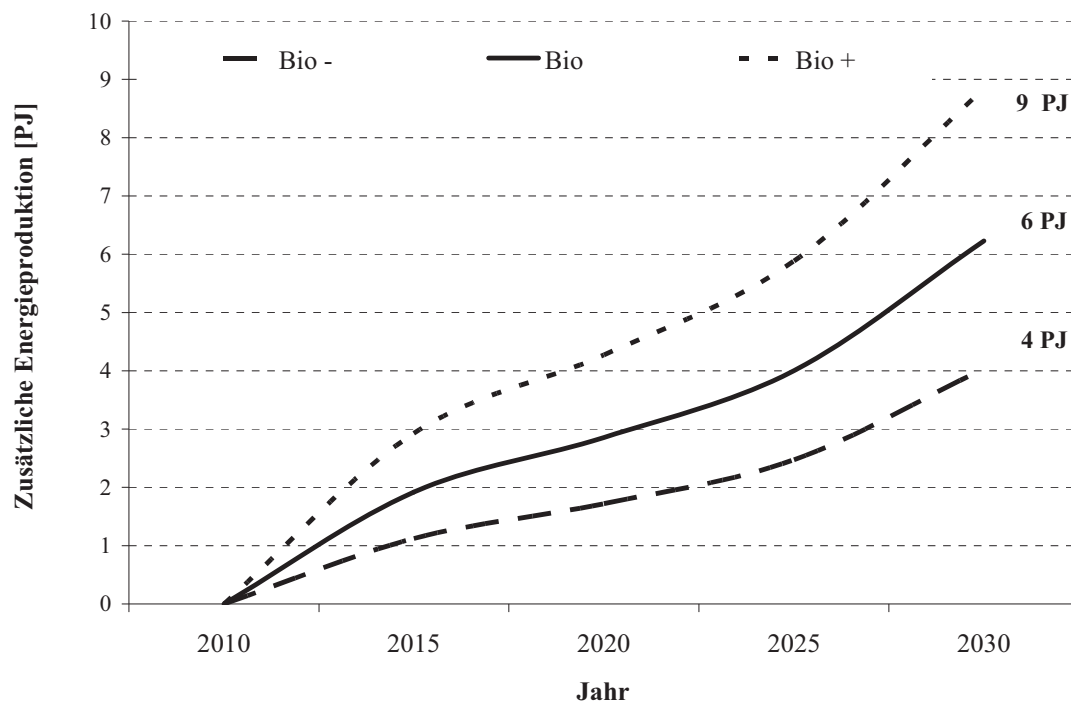
<sup>68</sup> Endenergieverbrauch des jeweiligen Sektors nach /Fahl et al. 2010/

bzw. 1,9 %. Wie bei den Untersuchungen zur Nanotechnologie zeigt sich auch bei den biotechnologischen Anwendungen, dass erst im Laufe der Zeit eine signifikante Einsparung realisiert werden kann. Im Bio-Szenario wird in 2020 nur 44 % der möglichen Einsparung realisiert, die in 2030 erwartet wird.



**Abbildung 7.5:** Entwicklung der möglichen Endenergieeinsparungen von 2010 bis 2030 für die Biotechnologie

Neben den erwarteten Einsparungen ist in **Abbildung 7.6** die Entwicklung der möglichen zusätzlichen Energieerzeugung bis 2030 dargestellt. Für diese Entwicklung zeigt sich, wie bereits für die möglichen Einsparungen, dass sie erst spät signifikante Auswirkungen aufweist. Im Jahr 2030 könnten zwischen 4 und 9 PJ zusätzlich erzeugt werden.



**Abbildung 7.6:** Entwicklung der möglichen zukünftigen zusätzlichen Energieerzeugung von 2010 bis 2030 für die Biotechnologie

**Tabelle 7.4** fasst die Ergebnisse der Szenarienberechnung für die biotechnologischen Anwendungen zusammen und stellt die damit verbundenen Auswirkungen und Änderungen bis 2030 dar. Als Ergebnis zeigt sich, dass die betrachteten zwölf biotechnologischen Anwendungen zu einer Energieeinsparung von ca. 117 PJ im Jahr 2030 führen könnten. Hinsichtlich der Möglichkeit zusätzlich Energie zu erzeugen, wird davon ausgegangen, dass der Einsatz von Mikroalgen zur Biogas- und Biokraftstoffproduktion sowie die Umstellung von industriellen Kläranlagen auf anaerobe Bakterien ca. 6 PJ im Jahr 2030 zusätzlich beitragen könnten.

Bei den Möglichkeiten Energie einzusparen, steht an erster Stelle der Einsatz thermoplastischer Stärke als Reifenfüller (47 PJ), gefolgt von der Nutzung von Biokunststoffen (33 PJ) und der Umstellung des Herstellungsverfahrens von Adipinsäure auf einen biotechnologischen Prozess (20 PJ). Vergleicht man die Nutzung von biologischen Rohstoffen mit dem Einsatz von Enzymen zur gezielten Prozesssteuerung, so kann festgestellt werden, dass der Schwerpunkt zur Energieeinsparung bei der Nutzung von biologischen Rohstoffen liegt. Insgesamt zeigt sich, dass die möglichen Auswirkungen der Biotechnologie vor allem im Einsatz biologischer Rohstoffe, in der Erschließung neuer Energieerzeugungsmöglichkeiten und in der industriellen Anwendung (weiße Biotechnologie) liegen.

**Tabelle 7.4:** Änderungen entlang der energiewirtschaftlichen Wertschöpfungskette von 2010 zu 2030 (Bio-Szenario)

Anwendungen	Entwicklung im Bio-Szenario bis 2030 [PJ] und Anteil im Vergleich zum theoretisches Potenzial [%]			
	Energieerzeugung		Energiewandlung, -speicherung, -verteilung und -nutzung	
	[PJ]	[%]	[PJ]	[%]
<b>Nutzung biologischer Rohstoffe</b>				
Biokunststoffe			32,5	50,0
Reifenfüller (TPS)			47,1	66,0
Mikroalgen zur Biogasproduktion	1,7	0,5		
Mikroalgen zur Produktion von Biokraftstoffen	Bioethanol	0,1	0,4	
	Biodiesel	1,0	0,5	
<b>Nutzung von Enzymen zur gezielten Prozesssteuerung</b>				
Einsatz von Enzymen bei Waschmitteln			11,7	76,0
Enzymeinsatz in der Textilindustrie (Scouring)			2,6	50,0
Abwasserbehandlung mit anaeroben Bakterien	3,4	30,0	0,8	30,0
Einsatz von Enzymen in der Metallreinigung			1,8	20,0
Produktion von Adipinsäure			19,6	55,5
Butanol-Produktion (ABE-Prozess)			1,2	25,0
Produktion von Malelinsäureanhydrid / Bernsteinsäure			1,6 [TJ]	59,3
Produktion von Ethylacetat / Ethyllactat			5,2 [TJ]	63,8
<b>Summe</b>	<b>6,2</b>	<b>1,0</b>	<b>117,3</b>	<b>56,2</b>

Vergleicht man die möglichen Auswirkungen bis 2030 mit dem theoretischen Potenzial, so zeigt sich, dass vor allem im Einsatz von Mikroalgen zur Energieerzeugung noch ein erhebliches zukünftiges Potenzial liegt. Im Gegensatz dazu ist das Potenzial durch den Einsatz von Enzymen bei Waschmitteln in 2030 mit über 75 % des theoretisch möglichen Potenzials bereits weit ausgeschöpft. Bei den Einsatzmöglichkeiten der Biotechnologie im industriellen Bereich ist das theoretisch mögliche Potenzial, je nach Anwendung, zu ca. 20 bis über 60 % bereits in 2030 realisiert.

Der Vergleich des theoretischen Potenzials mit den Ergebnissen des Bio-Szenarios in 2030 ist in **Tabelle 7.5** für die unterschiedlichen Sektoren zusammengefasst. Es wird erneut deutlich, dass gerade im Bereich der Energieerzeugung die Biotechnologie zukünftig eine sehr wichtige Rolle einnehmen könnte. Da im Rahmen der Untersuchungen der Schwerpunkt auf die weiße Biotechnologie (industrielle Nutzung) gelegt wurde, sind die Sektoren Haushalte und Verkehr, mit jeweils nur einer untersuchten biotechnologischen Anwendung, unterrepräsentiert. Daher sind gerade in diesen Sektoren noch weitere Potenziale denkbar. Als Ergebnis der Szenarienbetrachtungen kann für die im Industriesektor untersuchten Anwendungen festgestellt werden, dass sie bereits im Jahr 2030 die Möglichkeit bieten, knapp 50 % des theoretischen Potenzials zu heben.

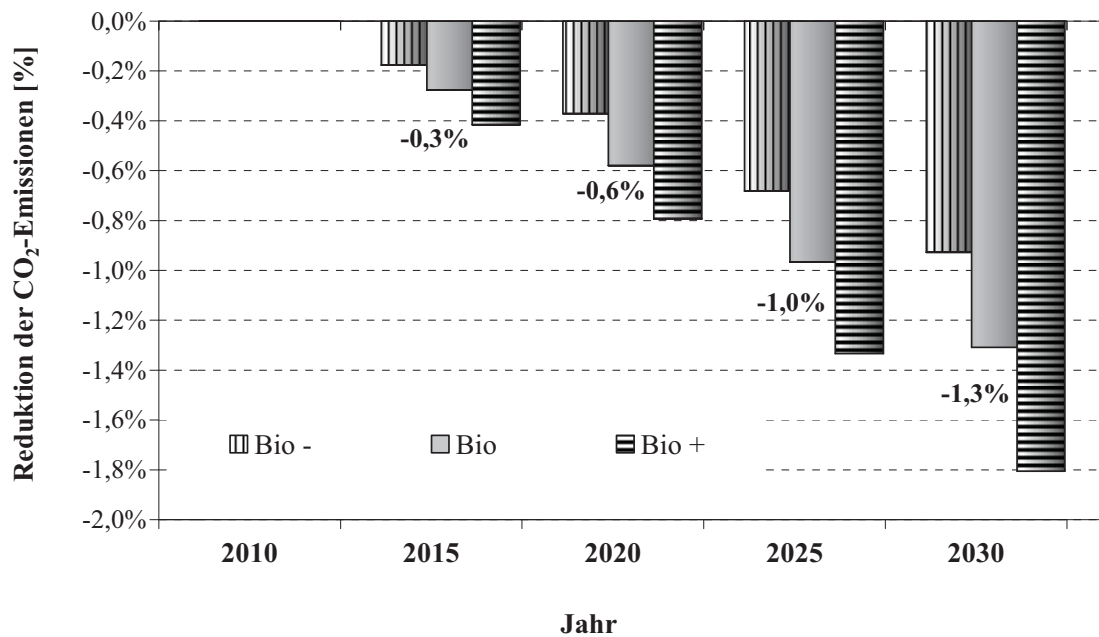


**Tabelle 7.5:** Vergleich des Bio-Szenarios mit dem theoretischen Potenzial der Biotechnologie in 2030 für unterschiedliche Sektoren

	Erzeugung / Wandlung	Industrie	GHD	Haushalte	Verkehr	Summe
Entwicklung bis 2030 (Bio-Szenario)						
Energieeinsparung [PJ]		58,5	0,0	11,7	47,1	117,3
Zusätzliche Energieproduktion [PJ]	6,2					6,2
Theoretisches Potenzial						
Energieeinsparung [PJ]		122,0	0,0	15,5	71,4	208,8
Zusätzliche Energieproduktion [PJ]	625,4					625,4

Neben der Verbesserung der Energieeffizienz und möglichen Energieeinsparungen kommt der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen eine wichtige Bedeutung für eine nachhaltige Energieversorgung zu. Die mit den betrachteten biotechnologischen Anwendungen verbundenen möglichen Einsparungen an CO<sub>2</sub>-Emissionen sind in **Abbildung 7.7** dargestellt. Durch die betrachteten biotechnologischen Anwendungen und Prozesssubstitutionen könnte bis 2030 eine Einsparung von ca. 1,3 % im Jahr 2030 im Vergleich zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen in 2010 (777 Mio. t) in Deutschland erreicht werden. Andere Untersuchungen, wie z. B. /Bang et al. 2009, Buttazzoni 2009/, kommen zu dem Ergebnis, dass biotechnologische Verfahren bereits in 2030 weltweit zwischen 1,0 und 2,5 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> einsparen könnten. Im Vergleich zu den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen in 2010 (33.158 Mio. t) entspricht dies einer möglichen Einsparung zwischen 3 und 8 %. Im Vergleich dazu stellen die im Rahmen der Szenarien- und Sensitivitätsanalyse ermittelten Einsparungen von bis zu 14 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> für Deutschland (ca. 1,8 % im Vergleich zu 2010) ein geringeres Potenzial dar.

Es muss jedoch beachtet werden, dass diese Einsparungen bereits mit den zwölf untersuchten Anwendungen realisiert werden könnten. Gerade die Nutzung von Bioraffinerien (siehe Kapitel 3.3.2) stellt zukünftig (nach 2030) eine bedeutende Möglichkeit dar, den fossilen Energiebedarf zu senken.



**Abbildung 7.7:** Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Energieeinsparungen und zusätzliche Energieerzeugung für die Biotechnologie

Neben der absoluten Veränderung durch biotechnologische Anwendungen bis 2030 im Vergleich zu 2010 stellt **Tabelle 7.6** die Ergebnisse des Bio-Szenarios der projizierten Entwicklung des Energieverbrauchs in Deutschland im Jahr 2030 (Referenzprognose) nach /Fahl et al. 2010/ gegenüber.

**Tabelle 7.6:** Vergleich zwischen dem Bio-Szenario und der Projektion nach /Fahl et al. 2010/

Sektor	Energieeinsparung bis 2030 (Bio-Szenario)		Referenzwert 2030 *
	[PJ]	[%]	[PJ]
Zusätzliche Stromproduktion	2,4	0,1	2.236 <sup>69</sup>
Industrie	58,5	2,7	2.130 <sup>70</sup>
GHD	0,0	0,0	1.241 <sup>70</sup>
Haushalte	11,7	0,6	1.982 <sup>70</sup>
Verkehr	47,1	1,9	2.442 <sup>70</sup>

\* siehe /Fahl et al. 2010/

Dabei stellen die absoluten Werte das Ergebnis des Bio-Szenarios mit Einfluss der biotechnologischen Anwendungen im Jahr 2030 dar. Es zeigt sich, dass die untersuchten biotechnologischen Anwendungen und Prozesssubstitutionen der weißen Biotechnologie den erwarteten Energieverbrauch der Industrie in 2030 um 2,7 % reduzieren könnten. Aufgrund der geringen Anzahl an untersuchten Anwendungen fallen die möglichen Einsparungen im Verkehrssektor und in den Haushalten im Vergleich dazu geringer aus.

<sup>69</sup> Bruttostromproduktion nach /Fahl et al. 2010/

<sup>70</sup> Endenergieverbrauch des jeweiligen Sektors nach /Fahl et al. 2010/

### 7.3 Basisinnovationen

Abschließend werden die möglichen Auswirkungen der beiden Basisinnovationen Nanotechnologie und Biotechnologie integriert dargestellt. Die Untersuchungen zeigen, dass neue Innovationen und Technologien auch zu gegenseitigen Konkurrenzsituationen führen können. Im Verkehrsbereich wurde sowohl ein nano- als auch biotechnologisch basierter Reifenfüller untersucht. Einzeln betrachtet, könnte der nanotechnologische Reifenfüller bis 2030 zu Einsparungen von über 34 PJ und der auf thermoplastischer Stärke basierende Reifenfüller zu Einsparungen von 47 PJ führen. Für die integrierte Bewertung wird daher davon ausgegangen, dass sich beide Technologien gleichmäßig durchsetzen und zusammen das Substitutionspotenzial für innovative Reifenfüller abdecken.

Als Ergebnis der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen kann festgestellt werden, dass die untersuchten Anwendungen der Nano- und Biotechnologie zusammen das Potenzial haben, in 2030 zwischen 319 und 626 PJ an Endenergie einzusparen (siehe **Abbildung 7.8**). Im Vergleich zum Endenergieverbrauch im Jahr 2010 (9.060 PJ) entspricht dies einer möglichen Reduktion des Endenergiebedarfs um 3,5 bis 6,9 % im Jahr 2030. Die mit den betrachteten nano- und biotechnologischen Anwendungen verbundene Einsparung an Primärenergie beschränkt sich auf den Einsatz einer nanobasierten Membran bei CCS (siehe **Abbildung 7.2**). Darüber hinaus könnten aufgrund der untersuchten nano- und biotechnologischen Anwendungen in 2030 die Energieerzeugung um 68 bis 168 PJ gesteigert werden (vgl. **Abbildung 7.9**).

Die damit verbundenen möglichen Einsparungen an CO<sub>2</sub>-Emissionen sind in **Abbildung 7.10** dargestellt. Es zeigt sich, dass bereits die betrachteten nano- und biotechnologischen Anwendungen die CO<sub>2</sub>-Emissionen in 2030 im Vergleich zu 2010 um über 13 % reduzieren könnten. Der Hauptanteil der möglichen Einsparungen, der zusätzlich möglichen Energieerzeugung und der möglichen Reduktionen an CO<sub>2</sub>-Emissionen wird durch die betrachteten 26 nanotechnologischen Anwendungen realisiert. Jedoch sind auch die untersuchten 12 biotechnologischen Anwendungen für 20 % der realisierbaren Energieeinsparungen verantwortlich.

Vergleicht man die aktuell diskutierten bzw. teilweise bereits realisierten Anwendungsmöglichkeiten und neuen Produkte der beiden Basisinnovationen, so lässt sich feststellen, dass die Nanotechnologie einen höheren Querschnittscharakter aufweist als die Biotechnologie. Nanotechnologische Anwendungsmöglichkeiten finden sich in allen Anwendungsbereichen und die Vorsilbe „Nano“ wird teilweise auch als Marketinginstrument verwendet bzw. missbraucht. Die Untersuchungen und Szenarienberechnungen zeigen, dass nanotechnologische Anwendungen bereits in den Jahren bis 2030 und vor allem ab 2025 signifikante Verbesserungen entlang der gesamten energetischen Wertschöpfungskette ermöglichen.

Biotechnologische Anwendungen, Prozesse und Prozesssubstitutionen haben nach aktuellem Stand ihren Schwerpunkt bei industriellen Anwendungen der weißen Biotechnologie und in der Nutzung von biologischen Rohstoffen. Zukünftig wird gerade diesem Bereich und neuen Möglichkeiten Energie bereitzustellen große Bedeutung beigemessen. So können die Konzepte der Bioraffinerien die Chemie- und Raffineriewirtschaft aber auch die Energieer-

zeugung radikal ändern und als zukünftige Perspektive wird eine wissensbasierte Bioökonomie gesehen, die einen vielversprechenden Ansatz für einen Strukturwandel von einer erdöl- zu einer biobasierten Wirtschaft ermöglicht /BMBF 2010b/.

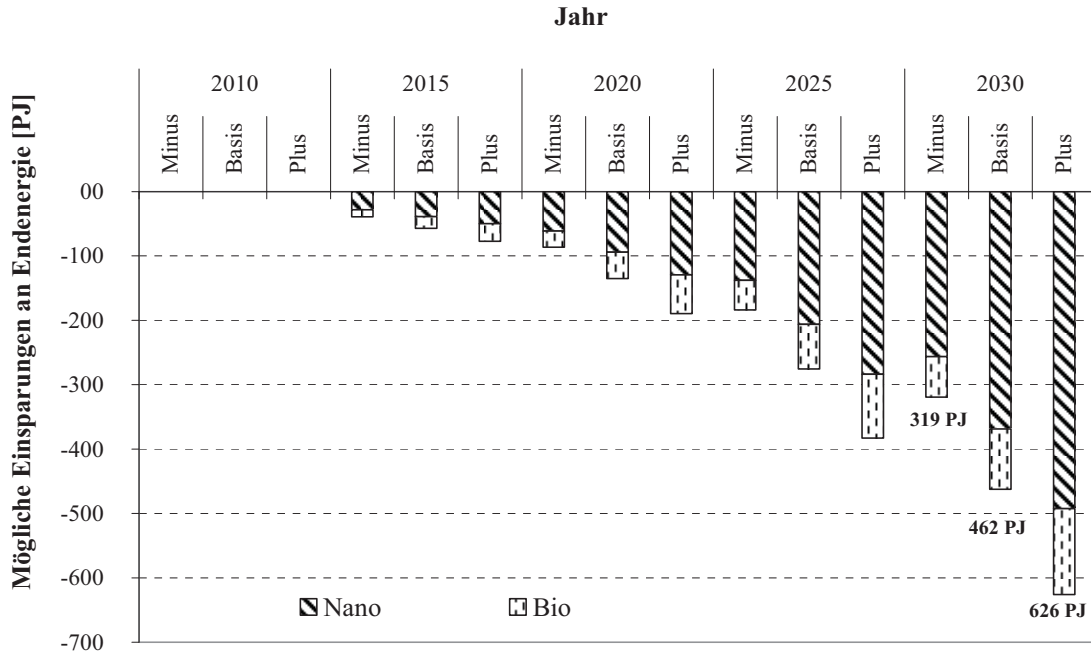


Abbildung 7.8: Entwicklung der möglichen Endenergieeinsparungen von 2010 bis 2030 für die beiden betrachteten Basisinnovationen

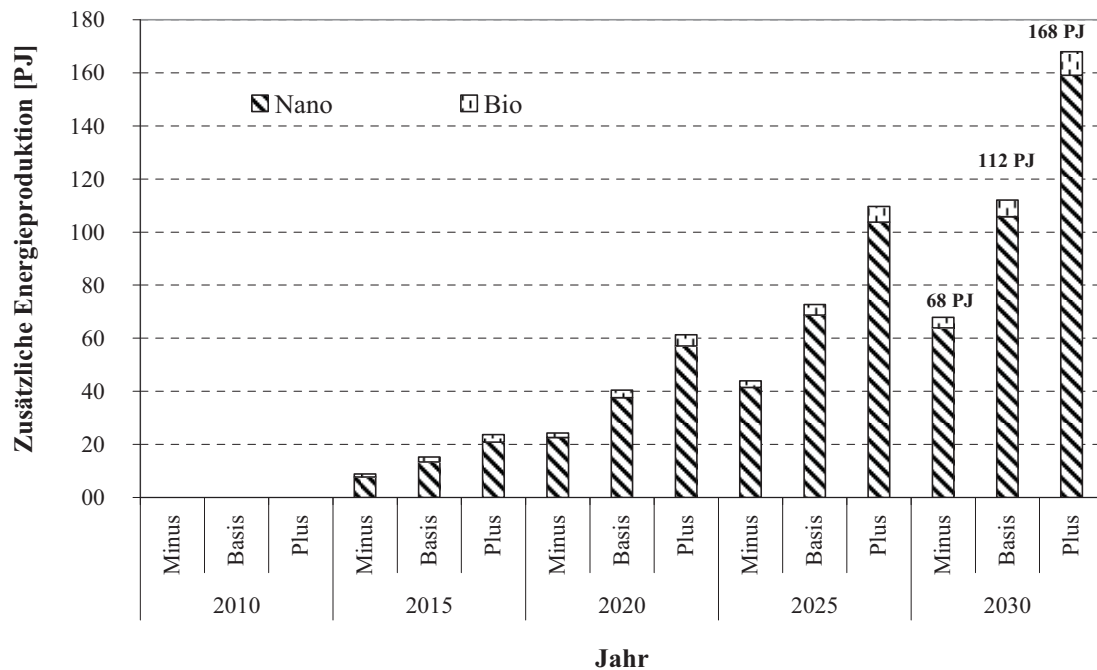


Abbildung 7.9: Entwicklung der möglichen zusätzlichen Energieerzeugung von 2010 bis 2030 durch die beiden betrachteten Basisinnovationen

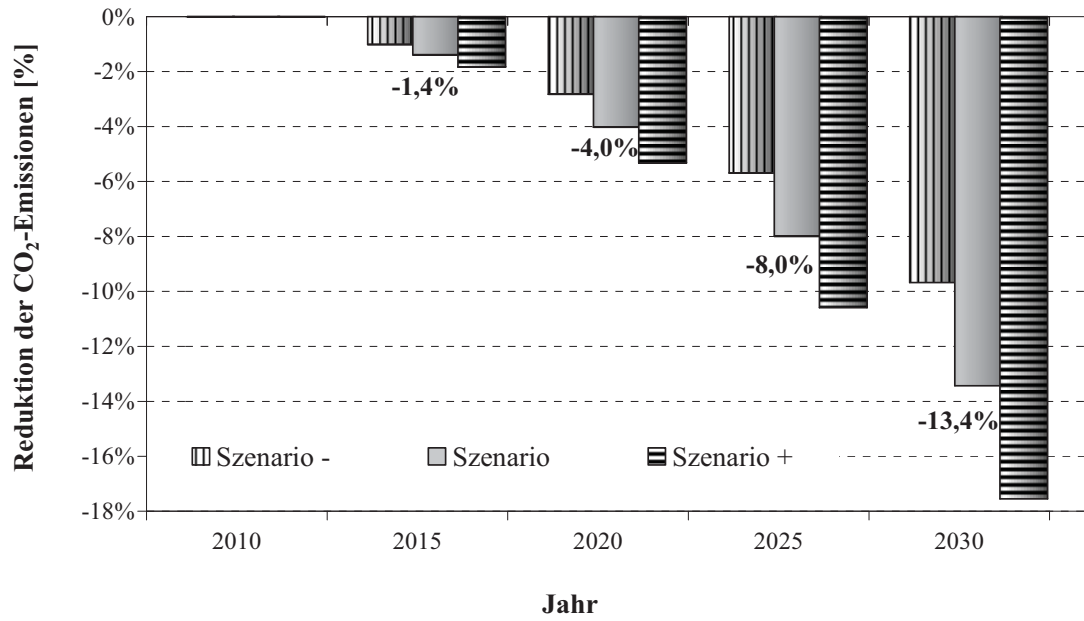


Abbildung 7.10: Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die beiden betrachteten Basisinnovationen





## 8 Schlußbetrachtung und Ausblick

Vor dem Hintergrund endlicher Ressourcen und aufgrund des globalen Klimawandels steigt die Bedeutung einer nachhaltigen Energieversorgung. In dieser Hinsicht gewinnen, neben der Optimierung konventioneller Technologien, dem weitreichenden Einsatz erneuerbarer Energien und der Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz, neue Innovationen an Bedeutung, da grundlegende Forschungserfolge notwendig sind, um die mit einer nachhaltigen Energieversorgung verbundenen Herausforderungen angehen und lösen zu können. Die Einführung von Basisinnovationen führt zu Änderungen in der Energienachfrage als auch in der Energieversorgung. Als Basisinnovationen der Vergangenheit werden z. B. die Dampfmaschine oder das Auto genannt. Im Rahmen der Arbeit konnte gezeigt werden, dass auch die Nano- und Biotechnologie als Basisinnovation der Gegenwart bezeichnet werden können. Technische Fortschritte bei diesen beiden Basisinnovationen zeigen das Potenzial zu Verbesserungen entlang der gesamten energetischen Wertschöpfungskette, von der Energiegewinnung, über die -wandlung, -verteilung, -speicherung bis zum Energieverbrauch.

Neben einordnenden Untersuchungen sowie ersten Abschätzungen zu den möglichen Auswirkungen der Nano- und Biotechnologie auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden für einzelne Technologien und Anwendungen der beiden Basisinnovationen Untersuchungen zum Energieverbrauch oder den Umweltauswirkungen erstellt. Eine umfassende und integrierte Untersuchung und Abschätzung der derzeitigen und zukünftigen Auswirkungen nano- und biotechnologischer Anwendungen auf die Energiewirtschaft und die Quantifizierung resultierender Änderungen im Energieverbrauch sowie mögliche Einsparungen an CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden bisher jedoch nicht durchgeführt.

Ziele der Arbeit waren daher die Identifikation der Einsatzmöglichkeiten von Basisinnovationen, am Beispiel der Nano- und Biotechnologie, entlang der energetischen Wertschöpfungskette sowie die umfassende Analyse und Bewertung derzeitiger und zukünftiger Auswirkungen von nano- und biotechnologischen Anwendungen auf die Energienachfrage und die Energiewirtschaft in Deutschland.

Um diese Ziele zu erreichen, erfolgte, aufbauend auf der Untersuchung von Einsatzmöglichkeiten dieser Basisinnovationen in der Energiewirtschaft, eine systematische Analyse der Auswirkungen und Potenziale sowie eine detaillierte Beschreibung nano- und biotechnologische Produkte und Anwendungen mit besonderer Relevanz für die Energiewirtschaft. Des Weiteren wurden im Rahmen von Szenarien- und Sensitivitätsanalysen die Auswirkungen ausgewählter Anwendungen auf die zukünftige Energienachfrage, die nachgefragten Energieträger sowie die Potenziale zur Effizienzsteigerung und CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung bis 2030 im Vergleich zu 2010 ermittelt. Die Ergebnisse der Szenarien- und Sensitivitätsanalysen zeigen, dass die untersuchten nano- und biotechnologischen Anwendungen in Deutschland im Jahr 2030 zwischen 319 und 626 PJ an Energie einsparen könnten. Im Vergleich zum Energieverbrauch im Jahr 2010 entspricht dies einer Reduktion um 3,5 bis 6,9 %. Des Weiteren haben sie das Potenzial zusätzlich zwischen 68 und 168 PJ an Energie zu erzeugen. Insgesamt könnte der Einsatz der betrachteten Anwendungen die CO<sub>2</sub>-Emissionen in 2030 im Vergleich zu 2010 um ca. 13 % reduzieren. Bei nanotechnologischen Anwendungen kommt neu-

artigen Photovoltaiktechnologien wie z. B. Dünnschichtsolarzellen oder Farbstoffsolarzellen, eine besondere Bedeutung zu, da sie zukünftig einen wichtigen Beitrag zur erneuerbaren Energiebereitstellung leisten könnten. Auch der Einsatz nanostrukturierter Membranen stellt eine wichtige Möglichkeit zur energieeffizienten Decarbonisierung der Energieerzeugung dar. Im Bereich der Energiewandlung kann festgestellt werden, dass die stationäre Brennstoffzellennutzung (Brennstoffzellenheizgeräte) im Haushaltssektor zu deutlichen Effizienzsteigerungen beitragen könnte. Im Bereich der Energienutzung kann vor allem die Umstellung der Beleuchtungstechnologien auf LED und OLED den Energieverbrauch zukünftig signifikant reduzieren. Bei biotechnologischen Anwendungen könnten Biokunststoffe und die Verwendung von biotechnologisch hergestellten Reifenfüllern Energieeinsparpotenziale realisieren. Auch die weiße Biotechnologie zeigt in der Optimierung der Herstellung von Adipinsäure oder bei der Entwicklung neuartiger Enzyme für Waschmittel das Potenzial, zukünftig Energie einzusparen. Im Bereich der Energieerzeugung kann der Einsatz von Mikroalgen sowohl zu Biogas- als auch zur Biokraftstoffproduktion (Biodiesel, Bioethanol) mittelfristig die CO<sub>2</sub>-arme Energieproduktion unterstützen.

Bei den Szenarien- und Sensitivitätsanalysen wurde zugrunde gelegt, dass bis 2030 technologische Fortschritte und Weiterentwicklungen erfolgen sowie eine teilweise starke Verbreitung neuer nanotechnologischer Anwendungen im Markt stattfindet. Um dies zu realisieren, sind noch intensive Forschungsanstrengungen und in vielen Fällen eine deutliche Reduzierung der Herstellungskosten notwendig, damit nano- und biotechnologische Anwendungen wettbewerbsfähig werden. Neben der Unterstützung bei der technischen Weiterentwicklung kommt vor allem der Umsetzung von Forschungsergebnissen in markt- und wettbewerbsfähige Produkte eine große Bedeutung zu. Eine Vielzahl von nano- und biotechnologischen Anwendungen zeigen im Labormaßstab ein sehr großes Potenzial für die Energiewirtschaft, nur muss durch entsprechende Rahmenbedingungen auch dafür gesorgt werden, dass der Schritt vom Labor in den (groß-)industriellen Maßstab gelingt.

Ein weiterer, für die Akzeptanz der Nanotechnologie sehr wichtiger Aspekt, ist das Thema der möglichen Gefährdungspotenziale. Einige Studien zeigen, dass Nanopartikel potenziell für Menschen und die Umwelt gefährlich sein können. Bei Einhaltung bestimmter Vorgaben mit Produkten die Nanopartikel enthalten, können die damit einhergehenden Gefahren jedoch minimiert werden. Es ergibt sich hierbei aber auch die Chance und Notwendigkeit, die Entwicklung der Nanotechnologie zu begleiten, die Chancen und Gefährdungspotenziale in einem transparenten Prozess abzuwägen und mit bestehenden Technologien zu vergleichen, denn eine offene und transparente Kommunikation der Chancen und Gefährdungspotenziale der Nanotechnologie ist direkt mit ihrer Akzeptanz in der Öffentlichkeit verbunden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in naher Zukunft vor allem die Nanotechnologie ein großes Potenzial für eine umwelteffiziente Energiewirtschaft und eine nachhaltige Energieversorgung aufweist. Die Analysen zeigen auch, dass die positiven Auswirkungen der Nanotechnologie hinsichtlich der Reduktion der Emissionen, einer nachhaltigen Energieerzeugung, dem Einsatz erneuerbaren Energien und ressourceneffizienten Produkten und Produktionssystemen weitreichend und umfassend sein können. Als Querschnitts- und Schlüsseltechnologie sind den Potenzialen der Nanotechnologie wenig Grenzen gesetzt. Auf

der anderen Seite müssen eine Vielzahl der nanotechnologischen Anwendungen die Produktion bzw. Umstellung auf einen industriellen Maßstab noch unter Beweis stellen. Darüber hinaus sollten neben den Potenzialen und Möglichkeiten der Nanotechnologie im Bereich der Energieeinsparung und Emissionsreduzierung, die Auswirkungen nanotechnologischer Materialien und Produkte auf die Umwelt und den Menschen verstärkt untersucht und in eine gesamtheitliche Bewertung neuer Innovationen integriert werden. Wie die Vergangenheit zeigt, können neue Technologien negative Auswirkungen auf die Umwelt, die menschliche Gesundheit, die Gesellschaft oder die Wirtschaft haben, die in dieser Form nicht beabsichtigt waren. Daher sollte der Aspekt der Sicherheit ein Bestandteil aller nanotechnologiebasierten Innovationen und Entwicklungen sein. Neben dem Potenzial zur Energieeinsparung muss auch der Energiebedarf für die Produktion und Herstellung von Nanomaterialien in die Betrachtungen integriert werden. Ressourceneffizienz und Lebenszyklusbetrachtungen von nanotechnologischen Anwendungen müssen in die Bewertung von neuen Innovationen eingehen, wenn die Umweltfreundlichkeit von Nanomaterialien untersucht werden soll. In den vergangenen Jahren wurden einige Lebenszyklusanalysen von nanotechnologiebasierten Produkten durchgeführt. Diese zeigen, dass nanotechnologische Produkte nicht zwingend mit Umweltentlastungen in Verbindung stehen. Eine Vielzahl der Untersuchungen kommt jedoch zu dem Ergebnis, dass durch nanotechnologische Anwendungen signifikante Umweltentlastungen ermöglicht werden.

Bei der Biotechnologie lässt sich im Hinblick auf mögliche Auswirkungen auf die energetische Wertschöpfungskette und die Energiewirtschaft in Deutschland ebenfalls feststellen, dass sie ein großes Potenzial für Energieeinsparungen, zur zusätzlichen Erzeugung von Energie, und vor allem durch den Einsatz biologischer Rohstoffe, zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen besitzt. Der Schwerpunkt der Auswirkungen biotechnologischer Anwendungen wird, was auch die betrachteten Anwendungen verdeutlichen, im Bereich der weißen Biotechnologie (industriellen Nutzung) und im Einsatz von biologischen Rohstoffen liegen. Bereits der betrachtete Einsatz von Mikroalgen könnte bis 2030 einen relevanten Beitrag zur Energieerzeugung leisten. Die zukünftigen Entwicklungen im Bereich der Bioraffinerien versprechen jedoch ein deutlich größeres und bedeutenderes Potenzial. Wie auch bei der Nanotechnologie sind bei biotechnologischen Anwendungen eine Vielzahl an technologischen Fortschritten und Optimierungen notwendig. Darüber hinaus müssen die Mehrzahl der biotechnologischen Anwendungen und Prozesse ihre Tauglichkeit für den Einsatz im industriellen Maßstab noch unter Beweis stellen. Im Bereich der Nutzung von biologischen Rohstoffen kommt den Faktoren Landverbrauch und Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion eine große Bedeutung zu. Diese sollten, ähnlich wie das Thema der möglichen negativen Auswirkungen von Nanopartikeln auf die Umwelt und den Mensch, bei den Untersuchungen zu den Möglichkeiten und Potenzialen der Biotechnologie Beachtung finden. Im Vergleich zu nanotechnologischen Anwendungen kann für die Biotechnologie festgestellt werden, dass die möglichen Auswirkungen auf die Energiewirtschaft bis 2030 noch relativ gering ausfallen, diese jedoch aufgrund einer Vielzahl von möglichen Anwendungen im Bereich der weißen Biotechnologie, dem Einsatz von Bioraffinerien und der Nutzung von biologischen Rohstoffen zukünftig eine sehr bedeutende Rolle einnehmen werden.

---

Als Ergebnis der Arbeit kann festgestellt werden, dass auch marktreife Anwendungen neuer Basisinnovationen, wie die Nano- und Biotechnologie, eine lange Zeit benötigen, bis sie zu signifikanten Auswirkungen auf die Energiewirtschaft führen bzw. bis Energieeinsparungen oder eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen nachweisbar werden. Im Hinblick auf die großen Herausforderungen beim Verbrauch von Ressourcen und Energie ist es notwendig, intensiv an innovativen Technologien zu forschen, um die positiven als auch negativen Auswirkungen bewerten zu können und eine schnelle Markteinführung bei positiver Bewertung zu ermöglichen.

Neue Basisinnovationen wie die Nano- und Biotechnologie werden die Energiewirtschaft nicht radikal ändern, aber durch die Entwicklung von innovativen Produkten, Prozessen und Anwendungen werden sie vor allem zukünftig einen bedeutenden Beitrag zur rationalen Energienutzung und zur Verbesserung der Energie- und Ressourceneffizienz leisten können.

## Literaturverzeichnis

/3Sat 2006/

3sat, Leichte Turbinen aus hitzebeständigem Titanaluminid, 3 Sat / nano, 2006.

/Ackermann 2007/

Ackermann, Ute, Zukunftsworkshop Mikrotechniken für eine effiziente Bioenergieerzeugung 15. Oktober 2007 - Konzeptpapier, VDI/VDE-IT, Dresden, 2007.

/Afeltowicz 2006/

Afeltowicz, Cezary, Untersuchung der Wirtschaftlichkeit silikonbasierter Antifouling Unterwasseranstriche bei seegehenden Containerschiffen, Berlin: Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 2006.

/Aigle et al. 2003/

Aigle, Thomas; Jörissen, Ludwig, Grundlagen der Brennstoffzellentechnik, Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e.V., 2003.

/Akhtar et al. 1998/

Akhtar, M.; Blanchette, R. A.; Myers, G.; Kirk, T. K., An overview of Biomechanical Pulping Research, Environmentally Friendly Technologies for the Pulp and Paper Industry, Raymond A. Young und Masood Akhtar, Editors, John Wiley & Sons, Hoboken, 1998.

/Alber 2006/

Alber, Stefan, Persönliche Mitteilung vom 04.07.2006.

/Altmann 2007/

Altmann, Jürgen, Military nanotechnology, London, New York: Routledge, 2007.

/AMBIO 2008/

Ambio, Advanced Nanostructured Surfaces for the Control of Biofouling (AMBIO), Projekt der Europäischen Union, 2008.

/Angerer et al. 2009/

Angerer, Gerhard; Marscheider-Weidemann, Frank; Lüllmann, Arne; Erdmann, Lorenz; Scharp, Michael; Handke, Volker; Marwede, Max, Rohstoffe für Zukunftstechnologien - Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung IZT gGmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2009.

/Antoniadis et al. 2004/

Antoniadis, Homer; Diekmann, Karsten, Stand der Displaytechnik mit organischen Leuchtdioden (OLEDs), Photonik (2004), Nr. 4, S. 40 - 42, 2004.

/AP-Bioprop 2011/

Ap-Bioprop, Subitec GmbH - Kohlendioxid binden, Energie gewinnen, 2011.

/Arnold 2011/

Arnold, Heinz, Energieeffizienz braucht Supraleitung, Energie und Technik, WEKA Fachmedien GmbH, 2011.

/Arpe 2007/

Arpe, Hans-Jürgen, Industrielle Organische Chemie - Bedeutende Vor- und Zwischenprodukte, Vol. 6., vollständig überarbeitete Auflage Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.

/Aspen 2008/

Aspen, Aerogels - case studies, Aspen Aerogels, INC., 2008.

- /Austermann-Haun 2008/  
Austermann-Haun, Ute, Anaerobverfahren – Übersicht, GWF Special Wasser - Abwasser 148 (2008), Nr. 14, 2008.
- /Bachmann 1998/  
Bachmann, G., Innovationsschub aus dem Nanokosmos - Technologieanalyse, Düsseldorf: VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien, Abteilung Zukünftige Technologien, 1998.
- /Bachmann et al. 2007/  
Bachmann, Gerd; Grimm, Vera; Hoffknecht, Andreas; Luther, Wolfgang; Christiane Ploetz; Reuscher, Günter; Teichert, Olav; Zweck, Axel, Nanotechnologie für den Umweltschutz, Düsseldorf: Zukünftige Technologien Consulting, VDI Technologiezentrum, 2007.
- /Bächtle 2009/  
Bächtle, Christoph, Wenn aus Pflanzen Plastik wird, 2009.
- /Bajpai 2004/  
Bajpai, Pratima, Biological Bleaching of Chemical Pulps, Critical Reviews in Biotechnology (2004), Nr. 24(1):1-58, 2004.
- /Bang et al. 2009/  
Bang, John Kornerup; Follér, Andreas; Buttazoni, Marco, Industrial biotechnology - more than green fuel in a dirty economy? Exploring the transformational potential of industrial biotechnology on the way to a green economy, WWF und Novozymes, 2009.
- /Bannwarth et al. 2007/  
Bannwarth, H.; Kremer, B. P.; Schulz, A., Basiswissen Physik, Chemie und Biochemie - Von Atom bis zur Atmung - für Biologen, Mediziner und Pharmazeuten, Berlin: Springer, 2007.
- /BASF 2004/  
BASF, Daten und Fakten 2004: BASF Gruppe, Stand: April 2004, BASF AG, Ludwigshafen, 2004.
- /BASF 2005/  
BASF, Label Eco-Efficiency Analysis Ultradur® High Speed, BASF Aktiengesellschaft, Ludwigshafen, 2005.
- /BASF 2007/  
BASF, Nanoschaum: Presse-Information- Chemie baut Zukunft, BASF, Ludwigshafen, 2007.
- /BASF 2008/  
BASF, Nanowürfel: Weltrekorde in den Disziplinen Oberfläche und Porosität, BASF Aktiengesellschaft, 2008.
- /BASF 2010/  
BASF, Nanowürfel dienen als Speichermedium für Wasserstoff, MaterialsGate, Dr.-Ing. Christoph Konetschny, Büro für Material- und Technologieberatung, 2010.
- /BAST 2006/  
BAST, Verkehrs- und Unfalldaten: Kurzzusammenstellung der Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland,, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2006.
- /Bauer 2009/  
Bauer, Uwe, Pilotprojekt Mikroalgen - Möglichkeiten der biologischen Verwertung von CO<sub>2</sub> aus Kraftwerksabgasen, Vortrag im Rahmen des 60. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Gasttechnologisches Kolloquium, TU Bergakademie Freiberg, 2009.



- /BCG 2006/  
Bcg, Innovationsstandort Deutschland – quo vadis? Wie gut wir sind, wo unsere Chancen liegen und wie wir die Zukunft meistern können, München: The Boston Consulting Group GmbH, 2006.
- /BDZ 2010/  
Bdz, Zahlen und Daten, Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V., Berlin, 2010.
- /BDZ 2011/  
Bdz, Zahlen und Daten, Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V., Berlin, 2011.
- /Beck 2006/  
Beck, T., Zum Geburtstag alles Gute, Supraleiter!, Stuttgarter Zeitung Nr. 92, 2006.
- /Bernreuter 2002/  
Bernreuter, Johannes, Ein riesiges Potenzial - Killerargumente widerlegen: "Photovoltaik bleibt in Deutschland unbedeutend", PHOTON das Solarstrom-Magazin, S. 57-60, 2002.
- /Bertz 2011/  
Bertz, Corinna, Millionen-Förderung für neue Energiespeicher, Informationsdienst Wissenschaft 2011.
- /Bettien et al. 2008/  
Bettien, K.-D.; Engelhart, M.; Friedmann, H.; Märkl, H.; Michels, J.; Popp, L.; Ranfft, W.; Richter, H.; Weiland, P.; Wiesner, J., Innovationspotentiale der fermentativen Gewinnung von Bioenergieträgern - Positionspapier der ProcessNet-Expertengruppe Bioenergie bei der DECHEMA e.V., DECHEMA e.V., Frankfurt/Main, 2008.
- /BFE 2003/  
Bfe, Technologie-Monitoring, Bern: Bundesamt für Energie, 2003.
- /BfR 2006/  
Bfr, Nano particles were not the cause of health problems triggered by sealing sprays!, Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR), 2006.
- /BG-ETEM 2011/  
Bg-Etem, Allgemeinbeleuchtung - in Zukunft LED?, Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, 2011.
- /Bhat 2000/  
Bhat, M. K., Cellulases and related enzymes in biotechnology, Biotechnology Advances (2000), Nr. 18, S. 355-383, 2000.
- /BIC 2009a/  
Bic, Innovationspreis 2007 Industrie, BIO-Circle™ Compact - biologische Teilereinigung die nächste Generation, CB Chemie und Biotechnologie GmbH, Gütersloh, 2009a.
- /BIC 2009b/  
Bic, Biologischer Teilereiniger Bio-Circle™, CB Chemie und Biotechnologie GmbH, Gütersloh, 2009b.
- /BINE 2001/  
Bine, Vakuumdämmung, Projekt-Info 4/01, BINE Informationsdienst des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2001.
- /BINE 2002/  
Bine, Antireflexglas für solare Anwendungen, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Bonn, 2002.

- /BINE 2004/  
Bine, Vakuum-Isolation in Fassadenelementen, BINE Informationsdienst, Projektinfo 08/04, 2004.
- /BINE 2011/  
Bine, Dämmen durch Vakuum - Hocheffizienter Wärmeschutz für Gebäudehülle und Fenster, BINE Informationsdienst, Themeninfo I/2011, 2011.
- /BINE 2012/  
Bine, Neue Wege in der Hausenergieversorgung, Mit Brennstoffzellen-Heizgeräten effizienter Strom und Wärme erzeugen, BINE Informationsdienst, Projektinfo 05/2012, 2012.
- /Binnenwies et al. 2003/  
Binnenwies, M.; Jäckl, M.; Willner, H., Allgemeine und Anorganische Chemie, Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 2003.
- /BioÖkonomieRat 2010/  
Bioökonomierat, Empfehlungen zum Aufbau einer wettbewerbsfähigen und nachhaltigen Bioökonomie - Beitrag der Industriellen Biotechnologie zum wirtschaftlichen Wandel in Deutschland. Positionspapier der Arbeitsgruppe Biotechnologie des BioÖkonomieRats, Berlin, 2010.
- /Biotechnologie 2007/  
Biotechnologie, Neue Technologien zur Energiegewinnung, 2007.
- /Biotechnologie 2011/  
Biotechnologie, Mit mikrobieller Brennstoffzelle Strom erzeugen, 2011.
- /Birnbaum et al. 2010/  
Birnbaum, U.; Bongartz, R.; Linssen, J.; Markewitz, P.; Vögele, S., Gemeinschaft STE Research Report - Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung, Fossil basierte Kraftwerkstechnologien, Wärmetransport, Brennstoffzellen, Forschungszentrum Jülich, Institut für Energieforschung, Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEF-STE), Jülich, 2010.
- /Bitnar et al. 2002/  
Bitnar, B.; Durisch, W.; Palfinger, G., Thermophotovoltaik – Solarzellen im Ofen, Baumgartner und Ossenbrinks. 2002.
- /Bitnar et al. 2003/  
Bitnar, Bernd; Palfinger, Günther; Gobrecht, Jens; Grützmacher, Detlev, Entwicklung von low band gap PV Zellen / Thermophotovoltaik TPV, ed. Paul Scherrer Institut Ch-5232 Villigen Psi, Bern: Bundesamt für Energie, 2003.
- /BK-Biopro 2010/  
Bk-Biopro, Grüne Gentechnik - die umstrittene Zukunftstechnologie, 2010.
- /Blesl et al. 2010/  
Blesl, Markus; Kempe, Stephan; Huther, Heiko, Verfahren zur Entwicklung einer digitalen Wärmebedarfskarte, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, AGFW e.V., Frankfurt am Main, 2010.
- /Blum et al. 2002/  
Blum, Ludger; Peters, Ralf, Zukünftiger Einsatz der Brennstoffzelle in der Hausenergieversorgung, Institut für Energieverfahrenstechnik, Forschungszentrum Jülich, 2002.
- /BMBF 2002/  
Bmbf, Standortbestimmung: Nanotechnologie in Deutschland, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bonn, 2002.

- /BMBF 2004/  
Bmbf, Nanotechnologie: Innovationen für die Welt von morgen, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bonn, Berlin, 2004.
- /BMBF 2005/  
Bmbf, Werkstoffwelten: Entdeckungen im Kosmos der Stoffe, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bonn, Berlin, 2005.
- /BMBF 2006/  
Bmbf, Zukunftstechnologien: Von der Idee zur Anwendung, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bonn, Berlin, Jülich, Düsseldorf, Karlsruhe, Köln, 2006.
- /BMBF 2007/  
Bmbf, Weiße Biotechnologie - Chancen für neue Produkte und umweltschonende Prozesse, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Referat Biotechnologie, Berlin, 2007.
- /BMBF 2008/  
Bmbf, Weiße Biotechnologie - Chancen für neue Produkte und umweltschonende Prozesse, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Referat Biotechnologie, Berlin, 2008.
- /BMBF 2009/  
Bmbf, "Wettbewerb Kommunen in neuem Licht" im Rahmen des Förderprogramms "Optische Technologien" Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2009.
- /BMBF 2010a/  
Bmbf, Ideen. Innovation. Wachstum - Hightech-Strategie 2020 für Deutschland, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Berlin, 2010a.
- /BMBF 2010b/  
Bmbf, Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 - Unser Weg zu einer bio-basierten Wirtschaft, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bonn, Berlin, 2010b.
- /BMBF 2011/  
Bmbf, Leuchtdioden (LED) - das Licht der Zukunft, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2011.
- /BMELV et al. 2012/  
Bmelv; Bmbf; Bmu; Bmwi, Roadmap Bioraffinerien, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin, 2012.
- /BMVBS 2009/  
Bmvbs, Verkehr in Zahlen 2008/2009, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Berlin, 2009.
- /BMWi 2012/  
Bmwi, Zahlen und Fakten: Energiedaten: Nationale und Internationale Entwicklung, Stand: 19.04.2012, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin, 2012.
- /Boeing 2003/  
Boeing, Niels, Nanomaterialien zerlegen Toilettendünste - und knacken Rohöl, 2003.
- /Boeing 2005/  
Boeing, Niels, Nanotechnik, Technology Review, S. 32-41, 2005.

- /Boeing 2013/  
Boeing, Niels, Risks and safety issues, in Nanotechnology and Energy: Science, Promises and its Limits, Jochen Lambauer, Alfred Voß und Ulrich Fahls Pan Stanford Publishing: Singapur. 2013.
- /Böing 2007/  
Böing, Raymund, Innovativer Beton, HeidelbergCement, Entwicklung und Anwendung, Leimen, 2007.
- /Bonazzi 2010/  
Bonazzi, Matteo, Communicating Nanotechnology. Why, to whom, saying what and how? An action-packed roadmap towards a brand new dialogue, European Commission, Directorate-General for Research, Technology and Development, Directorate Industrial Technologies, Unit G.4 — Nano- and converging Sciences and Technologies, 2010.
- /Bonnet et al. 1998/  
Bonnet, D.; Meyers, P., Cadmium-telluride-Material for thin film solar cells, Journal for Material Research (1998), Nr. 13, S. 2740-2753, 1998.
- /Borany et al. 2004/  
Borany, Johannes Von; Richter, Edgar, Materialforschung mit Ionen, Forschungszentrum Rossendorf FZR, 2004.
- /Bozell et al. 2007/  
Bozell, J. J.; Holladay, J. E.; Johnson, D.; White, J. F., Top Value Added Chemicals from Biomass - Volume II: Results of Screening for Potential Candidates from Biorefinery Lignin, Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), the National Renewable Energy Laboratory (NREL), Oak Ridge, Springfield, 2007.
- /Brake 2007/  
Brake, Matthias, Solarzellen aus der Druckerpresse, 2007.
- /Brand et al. 2007/  
Brand, Leif; Eickenbusch, Heinz; Hoffknecht, Andreas; Krauß, Oliver; Zweck, Axel; Pohle, Dirk, Innovations- und Marktpotential neuer Werkstoffe: Monitoringbericht 2007, Düsseldorf: Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH, 2007.
- /Braun et al. 2006/  
Braun, Matthias; Teichert, Olav; Zweck, Axel, Biokatalyse in der industriellen Produktion - Fakten und Potenziale der weißen Biotechnologie, Düsseldorf: Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH, 2006.
- /Breen et al. 1999/  
Breen, Alec; Singleton, Fred L, Fungi in lignocellulose breakdown and biopulping, Current Opinion in Biotechnology (1999), Nr. 10, S. 252-258, 1999.
- /Brendel et al. 2006/  
Brendel, Rolf; Bothe, Karsten; Rech, Bernd; Powalla, Michael; Oelting, Stefan; Lang, Johannes; Hug, Rolf, Dünnschicht-Solartechnik: Neue Technologien zur Kostensenkung der Photovoltaik, 2006.
- /BREW 2006/  
Brew, Medium and Long-term Opportunities and Risks of the Biotechnological Production of Bulk Chemicals from Renewable Resources - The Potential of White Biotechnologie, The BREW Project, Prepared under the European Commission's GROWTh Programme (DG Research), 2006.

- /Brink et al. 1999/  
Brink, R. Van Den; Wee, B. Van, Passenger car fuel consumption in the recent past: Why has passenger car fuel consumption no longer shown a decrease since 1990?, Stockholm: Paper prepared for the workshop Indicators of Transportation Activity, Energy and CO<sub>2</sub> emissions, May 9-11, 1999.
- /Brockhaus 2011/  
Brockhaus, Enzyklopädie Online, 2011.
- /Brodersen et al. 2003/  
Brodersen, J.; Rießen, S.; Antranikian, G.; Märkl, H., Umweltfreundliche Aufbereitung von Hühnerfedern mittels extremthermophiler Bakterien und thermostabilen Enzymen, Transkript Sonderband S. 17-19, 2003.
- /Brown 2002/  
Brown, Doug, U.S. Regulators want to know whether nanotech can pollute, Small times, 2002.
- /Brumfiel 2003/  
Brumfiel, Geoff, Nanotechnology: A little knowledge... Nature (2003), Nr. 424 (6946), S. 246-248, 2003.
- /BSI 2007/  
Bsi, Nanotechnologie, Bonn: Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, 2007.
- /Bullis et al. 2006/  
Bullis, K.; Wirth, R., Fantastische Farbenspiele, Technology Review (2006), Nr. 7, S. 84-86, 2006.
- /Bullis 2011/  
Bullis, Kevin, Ultracapacitors to Boost the Range of Electric Cars, Technology review, published by MIT, 2011.
- /Bundesregierung 2010/  
Bundesregierung, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage des Abgeordneten Dr. Dagmar Enkelmann, Eva Bulling-Schröter, Dr. Rosemarie Hein, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE - Drucksache 17/2375. Zukunft der stofflichen Nutzung von Biomasse in Bioraffinerien 2010.
- /Buttazzoni 2009/  
Buttazzoni, Marco, GHG Emission Reduction with Industrial Biotechnology: Assessing the Opportunities, WWF Denmark, Copenhagen, 2009.
- /Cabot 2008/  
Cabot, LNG and Cryogenic Insulation, Cabot Corporation, 2008.
- /Capgemini 2004/  
Capgemini, Interdisziplinäre Anwendungsfelder der Biotechnologie – Branchenbewertung für Baden- Württemberg: Herausgeber BIOPRO Baden-Württemberg GmbH, erstellt durch Capgemini Deutschland GmbH, 2004.
- /CHB-Biopro 2010/  
Chb-Biopro, Wir müssen alternative Rohstoffquellen erschließen, 2010.
- /ChemLin 2004/  
Chemlin, Halogeneffekt schützt Leichtbaustoffe vor Oxidation, 2004.
- /Cientifica 2007a/  
Cientifica, Nanotech and Cleantech Reducing Carbon Emissions Today, London: Cientifica Ltd, 2007a.
- /Cientifica 2007b/  
Cientifica, Nanotech: Cleantech Quantifying The Effect Of Nanotechnologies On CO<sub>2</sub> Emissions, London: Cientifica Ltd, 2007b.

- /Clark et al. 2008/  
Clark, James H.; Deswarte, Fabien, Introduction to Chemicals from Biomass, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
- /Cobb et al. 2004/  
Cobb, Michael D.; Macoubrie, Jane, Public perceptions about nanotechnology: Risks, benefits and trust, Journal of Nanoparticle Research (2004), Nr. 6, S. 395-405, 2004.
- /ColognePaper 2007/  
Colognepaper, Auf dem Weg in eine wissensbasierte Biotech-Wirtschaft - Herausforderung und Chance für Forschung, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft, Köln: veröffentlicht während der Konferenz "En Route to the Knowledge- Based Bio-Economy" anlässlich der deutschen EU-Ratspräsidentschaft, Köln, 2007.
- /Com 2009/  
Com, Preparing for our future: Developing a common strategy for key enabling technologies in the EU, Commission of the European communities, 2009.
- /Couto et al. 2006/  
Couto, Susana Rodríguez; Herrera, José Luis Toca, Industrial and biotechnological applications of laccases: A review, Biotechnology Advances (2006), Nr. 24, S. 500-513, 2006.
- /Curlee et al. 1989/  
Curlee, T.; Goel, R., The Transfer and Diffusion of New Technologies: A Review of the Economics Literature, Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1989.
- /Dahlhoff 2011/  
Dahlhoff, Peter, SdK AktienForum, Material Science, Bayer AG, 2011.
- /Daimler 2009/  
Daimler, Neuer Mercedes-Benz-Hybridbus im Praxistest, Daimler Communications, Mercedes-Benz - Eine Marke der Daimler AG, Stuttgart, 2009.
- /Daimler 2010a/  
Daimler, Forschungsfahrzeug F600 HYGNIUS, Daimler AG, Stuttgart, 2010a.
- /Daimler 2010b/  
Daimler, Drei Mercedes-Benz Citaro G BlueTec-Hybrid-Busse jetzt bei Stuttgarter Straßenbahnen im Einsatz, Daimler Communications, Mercedes-Benz - Eine Marke der Daimler AG, Stuttgart, 2010b.
- /Daimler 2011/  
Daimler, Hybridbus für Landkreis München, Daimler Communications, Mercedes-Benz - Eine Marke der Daimler AG, Stuttgart, München, 2011.
- /DBU 2004/  
Dbu, Deutscher Umweltpreis für Pionier der Weißen Biotechnologie - Einzelwürdigung Professor Garabed Antranikian, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, 2004.
- /DBU 2006/  
Dbu, Licht trotz Schatten - Mikrospiegel vereinen Gegensätze, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2006.
- /DBU 2007/  
Dbu, Vakuumrohr für die Solarthermie: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2007.
- /Dechema 2010/  
Dechema, Hochtemperaturwerkstoffe, Karl-Winnacker-Institut, DECHEMA, 2010.
- /Degussa 2004/  
Degussa, Winzige Rußpartikel machen Reifen leistungsfähiger: Tanz im magischen Dreieck, Degussa AG, heute Evonik Industries, 2004.



- /Degussa 2006a/  
Degussa, Lithium-Ionen-Batterie erstmals im Straßenverkehr getestet, Meldung in elements ScienceNewsletter 14/2006, Degussa AG, Düsseldorf, 2006a.
- /Degussa 2006b/  
Degussa, Mehr Freude am Sparen: Innovative Füllstoffe für neue Autoreifen, Degussa AG, heute Evonik Industries, 2006b.
- /dena 2008/  
Dena, 2. Preis: Energy Efficiency Award 2008. Leiber GmbH - Energierückgewinnung aus Industrieabwasser, dena, Deutsche Energie-Agentur, Berlin, 2008.
- /DESTATIS 2011/  
Destatis, GENESIS-Online, Datenbank, Statistisches Bundesamt Deutschland, Wiesbaden, 2011.
- /Dewald 2007/  
Dewald, Ulrich, Spannungsgeladenes Papier, Bild der Wissenschaft, 2007.
- /DFG 2004/  
Dfg, Nachhaltiges Bauen mit Ultra-Hochfestem Beton zur Leistungssteigerung, Umweltentlastung und Kostensenkung im Betonbau: DFG-Schwerpunktprogramm (Deutsche Forschungsgemeinschaft), 2004.
- /DFG 2006/  
Dfg, Jahresbericht 2006 - „Heiratsvermittler“ der Chemie: die Katalyse: DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft), 2006.
- /DLR 2008/  
Dlr, Forschungsthema Aerogele, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Materialphysik im Weltraum, 2008.
- /dpa 2009/  
Dpa, Nanolack bietet Hightech - Schutz für das Auto, BerlinOnline Stadtportal GmbH & Co. KG, 2009.
- /DTI\_ OST 1999-2002/  
Dti\_ Ost, Foresight. The Programme, Department of Trade and Industry (DTI), Office of Science and Technology (OST), UK, 1999-2002.
- /Dürre 2007/  
Dürre, Peter, Biobutanol: An attractive biofuel, Biotechnology Journal (2007), Nr. 2, S. 1525-1534, 2007.
- /EA-NRW 2006/  
Ea-Nrw, Erhebung: Singles verbrauchen Strom anders, Pressemitteilung der Energieagentur NRW, 2006.
- /Eberle 2000/  
Eberle, R., Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung im Automobilbau, Berlin: Institut für Straßen- und Schienenverkehr, TU Berlin, 2000.
- /Ecke 2008/  
Ecke, Martin, Mikroalgenproduktion im industriellen Maßstab - Betriebserfahrungen mit der 12.000 m<sup>2</sup> Photobioreaktoranlage in Klötze / Deutschland, Bioprodukte Prof. Steinberg GmbH, Hamburg, 2008.
- /Eckelman et al. 2008/  
Eckelman, Matthew J.; Zimmerman, Julie B.; Anastas, Paul T., Toward Green Nano E-factor Analysis of Several Nanomaterial Syntheses, Journal of Industrial Ecology 12 (2008), Nr. 3, S. 316-328, 2008.
- /Economist 2006/  
Economist, Has all the magic gone?, The Economist, 2006.

- /Edel 2003/  
Edel, Markus, Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung -Technologie, Entwicklungsstand, Einsatzmöglichkeiten, EnBW AG Energie-Vertriebsgesellschaft mbH, Stuttgart, 2003.
- /Edel 2006/  
Edel, Markus, Persönliche Mitteilung vom 03.08.2006.
- /Edwards 2006/  
Edwards, S. A., The Nanotech Pioneers: Where are they taking us?, Weinheim: Wiley, 2006.
- /Eibeck et al. 2010/  
Eibeck, Peter; Anderlik, Rainer, Polybutylenterephthalat (PBT), Carl Hanser Verlag, 2010.
- /Einsiedel 2005/  
Einsiedel, Edna, In the Public Eye: The Early Landscape of Nanotechnology among Canadian and U.S. Publics, 2005.
- /Eipper et al. 2006/  
Eipper, Andreas; Völkel, Mark, Filigrane Bauteile wirtschaftlich herstellen, Kunststoffe - Nanotechnologie (2006), Nr. 11, 2006.
- /Eipper et al. 2008/  
Eipper, Andreas; Stransky, Reinhard, Kleine Teilchen - großer Effekt, Carl Hanser Verlag, 2008.
- /EMPA 2008/  
Empa, Mit Vakuum fünf mal besser dämmen, Empa. Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, 2008.
- /EPA 2007/  
Epa, Nanotechnology White Paper, Washington, DC: Science Policy Council U.S. Environmental Protection Agency, 2007.
- /EPA 2009/  
Epa, Toxicological review of Cerium Oxide and Cerium Compounds, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2009.
- /ETAP 2007/  
Etap, Nanotechnology brings new Solutions for Carbon Capture, Environmental Technologies Action Plan (ETAP), 2007.
- /ETC 2003/  
Etc, The big down. From Genomes to Atoms, Atomtech: Technologies Converging at the Nano-scale, ETC Group, Winnipeg, 2003.
- /ETC 2005/  
Etc, Special Report-Nanotech's "Second Nature" Patents: Implications for the Global South, ETC Group, Winnipeg, 2005.
- /EU 2006/  
Eu, Richtlinie 2006/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2006 über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen und zur Aufhebung der Richtlinie 93/76/ EWG des Rates, Amtsblatt der Europäischen Union, 2006.
- /EU 2011/  
Eu, Commission Recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial, Europäische Kommission, Official Journal of the European Union, (2011/696/EU), Brüssel, 2011.
- /EUBP 2010/  
Eubp, Branchenverband der industriellen Hersteller, Verarbeiter und Anwender von Biokunststoffen und biologisch abbaubaren Werkstoffen (BAW), sowie daraus hergestellter Produkte in Europa, European Bioplastics e.V., Berlin, 2010.

/Exatec 2008/

Exatec, Using Exatec Polycarbonate Automotive Glazing to Reshape the Future of Automotive Exteriors, Exatec, 2008.

/Fahl et al. 2010/

Fahl, U.; Blesl, M.; Voß, A.; Achten, P.; Bruchof, D.; Götz, B.; Hundt, M.; Kempe, S.; Kober, T.; Kuder, R.; Küster, R.; Lambauer, J.; Ohl, M.; Remme, U.; Sun, N.; Wille, V.; Wissel, S.; Ellersdorfer, I.; Kesicki, F.; Frondel, M.; Grösche, P.; Peistrup, M.; Ritter, N.; Vance, C.; Zimmermann, T.; Löschel, A.; Bühler, G.; Hoffmann, T.; Mennel, T.; Wölfing, N., Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 : Energieprognose 2009, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, Stuttgart, 2010.

/Fahrendorf 2008/

Fahrendorf, Theodor, Mikroalgen zur Steigerung der Wertschöpfung an Biogasanlagen durch Aquakultur, Novagreen GmbH, Vechta, 2008.

/Fairley 2008/

Fairley, Peter, Wenn Diesel auf Nanotechnik trifft, Technology Review, 2008.

/FDA 2007/

Fda, Nanotechnology A Report of the U.S. Food and Drug Administration Nanotechnology Task Force July 25, 2007.

/Fehling et al. 2008/

Fehling, E.; Schmidt, M.; Stürwald, S., Ultra High Performance Concrete (UHPC), Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete: University of Kassel, 2008.

/Feynman 1960/

Feynman, Richard P., There's Plenty of Room at the Bottom An Invitation to Enter a New Field of Physics, Caltech Engineering and Science (1960), Nr. 23:5, S. 22-36, 1960.

/FGL 2006/

Fgl, Lichtforum 40: LED – die neue Lichtquelle, Fördergemeinschaft Gutes Licht, Frankfurt am Main, 2006.

/Fhg-ISE 2006/

Fhg-Ise, Jahresbericht 2005: Leistungen und Ergebnisse, Freiburg: Fraunhofer-Gesellschaft Institut für Solare Energiesysteme, 2006.

/Fichtner 2003/

Fichtner, Maximilian, Nano-Material für schnelle Wasserstoffspeicher, Vol. Nr. 5: Nanotechnik eine Publikation der AT-Fachverlag GmbH, 2003.

/Fischle 2005/

Fischle, Hans Jörg, Superkondensatoren, made by WIMASonderdruck 11/2005, Berlin: WIMA Spezialvertrieb elektronischer Bauelemente GmbH & Co.KG, 2005.

/fona 2008/

Fona, Organophile Nanofiltration für die nachhaltige Produktion in der Industrie, fona - Forschung für Nachhaltigkeit (BMBF), 2008.

/Förster et al. 2011/

Förster, Andreas; Krüger, Péter; Krug, Harald F.; Mathes, Björn; Steinbach, Christoph, 10 Jahre Forschung zu Risikobewertung, Human- und Ökotoxikologie von Nanomaterialien - Statuspapier des DECHEMA/VCI -Arbeitskreises „Responsible Production and Use of Nanomaterials“, DECHEMA e.V., Frankfurt am Main, 2011.

/Frank 2009/

Frank, N., Persönliche Mitteilung vom 23.09.2009.

- /Frater et al. 2008/  
Frater, Harald; Podbregar, Nadja; Lohmann, Dieter, WISSEN HOCH 12 2007/2008 – Das Wissensjahrbuch, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- /Frey 2007/  
Frey, Peter, Strom aus salzigem Wasser, Berliner Morgenpost, 2007.
- /Fröhlich 2007/  
Fröhlich, K., Projekt – Anwendungspotential der thermoelektrischen Stromerzeugung im Hochtemperaturbereich, Zürich: Jahresbericht 2007; ETH Zürich, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie, 2007.
- /Frondel 2004/  
Frondel, M., Energy Conservation, the rebound effect, and future energy and transport technologies: An introduction to energy conservation and the rebound effect, International Journal of Energy Technology and Policy 2 (2004), Nr. 3, S. 203 - 208, 2004.
- /Fthenakis et al. 2005/  
Fthenakis, Vasilis M.; Kim, Hyung-Chul, Energy Use and Greenhouse Gas Emissions in the Life Cycle of Thin Film CdTe Photovoltaics, ed. Brookhaven National Laboratory Upton National Photovoltaic Environmental Research Center, U.S.A., Boston: Proceedings of Symposium G-Life Cycle Analysis, MRS Fall Meeting, Boston, MS, 2005.
- /FZJ 2003/  
Fzj, Elektrolyte für Hochtemperatur-Brennstoffzellen, Forschungszentrum Jülich, Jülich, 2003.
- /Gaisser et al. 2002/  
Gaisser, Sibylle; Hoogeveen, Roeland; Hüsing, Bärbel, Überblick über den Stand von Wissenschaft und Technik im produktionsintegrierten Umweltschutz durch Biotechnologie (PIUS-BT), Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Karlsruhe, 2002.
- /Gaudon et al. 2005/  
Gaudon, M.; Menzler, N. H.; Djurado, E.; Buchkremer, H. P., YSZ electrolyte of anode-supported SOFCs prepared from sub micron YSZ powders, Journal of Materials Science 40 (2005), Nr. 14, S. 3735-3743, 2005.
- /Gausemeier et al. 1996/  
Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O., Szenario-Management: Planen und Führen mit Szenarien, Vol. 2, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1996.
- /Geitmann 2005/  
Geitmann, Sven, DaimlerChrysler plant Marktreife von Brennstoffzellenautos bis 2015, Energieportal24.de, 2005.
- /Gent et al. 2010/  
Gent, Ricardo; Reuter, Martin, Statusbericht zu möglichen Potenzialen von Bioraffinerien für die Bereitstellung von Rohstoffen in Industrie und Forschung - Zusammenfassung, Deutsche Industrievereinigung Biotechnologie, Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt am Main, 2010.
- /Gibbs 2005/  
Gibbs, L., Nanotechnology: Identifying and Managing Health, Safety and Environmental Risks, Presentation International Congress of Nanotechnology ICNT, 03.11.2005, San Fransisco, 2005.
- /GKSS 2005/  
Gkss, Osmose-Kraftwerk - Erneuerbare Energien auf dem Vormarsch, GKSS Forschungszentrum, 2005.

- /Goho 2008/  
Goho, Alexandra M., Better Bugs for Making Butanol - Engineered E. coli proves efficient at churning out the biofuel, Technology Review, 2008.
- /Gombert 2006/  
Gombert, Andreas, Persönliche Mitteilung vom 08.08.2006.
- /Granig 2005/  
Granig, Peter, Innovationsbewertung - Potentialprognose und -steuerung durch Ertrags- und Risikosimulation, Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, GWV Fachverlage GmbH, 2005.
- /GRE 2002/  
Gre, Energieeinsparung im Gebäudebestand: Bauliche und anlagentechnische Lösungen, Vol. 4, Berlin: Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung e.V., 2002.
- /Green 2008/  
Green, Martin, Auf dem Weg zur dritten Solarzellen-Generation, Alfons W. Gentner Verlags und der Solarpraxis AG, 2008.
- /Greiner et al. 2009/  
Greiner, Felix; Schlaak, Hemlut F.; Tschulena, Fguido; Korb, Winfried, Mikro-Nano-Integration - Einsatz von nanotechnologie in der Mikrosystemtechnik, Wiesbaden: HA Hessen Agentur GmbH, 2009.
- /Griehl et al. 2011/  
Griehl, Carola; Loettel, Wolfgang; Pulz, Otto; Kerner, Martin, Produkte und Anwendungen der Mikroalgenbiotechnologie sowie die Nachhaltigkeit der phototrophen Biotechnologie, Für das Netzwerk „Technologien zur Erschließung der Ressource Mikroalgen - TERM“, 2011.
- /Grimm et al. 2011/  
Grimm, Vera; Braun, Matthias; Teichert, Olav; Zweck, Axel, Biomasse - Rohstoff der Zukunft für die chemische Industrie - Übersichtsstudie, Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf, 2011.
- /Grimm et al. 2012/  
Grimm, Vera; Eickenbusch, Heinz, Rohstoffquelle Biomasse - Stand und Perspektiven, VDI Technologiezentrum GmbH im Auftrag der VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin, 2012.
- /Grobe et al. 2008a/  
Grobe, Antje; Schneider, Christian; Schetula, Viola; Rekić, Mersad; Nawrath, Sandra, Nanotechnologien: Was Verbraucher wissen wollen, Verbraucherzentrale Bundesverband e. V. - vzbv, Berlin, 2008a.
- /Grobe et al. 2008b/  
Grobe, Antje; Renn, Ortwin; Jäger, Alexander, Risk Governance of Nanotechnology Applications in Food and Cosmetics, International Risk Governance Council, Genf, 2008b.
- /Grobe et al. 2013/  
Grobe, Antje; Kreinberger, Nico, Public Perception of Nanotechnologies: Challenges and Recommendations for Communication Strategies and Dialogue Concepts, in Nanotechnology and Energy: Science, Promises and its Limits, Jochen Lambauer, Alfred Voß und Ulrich Fahls Pan Stanford Publishing: Singapur. 2013.
- /Groß 2006a/  
Groß, Frank, Anwendungsmöglichkeiten photokatalytischer Beschichtungen im Bereich von Gebäudefassaden, Saarbrücken, 2006a.
- /Groß 2006b/  
Groß, Frank, Persönliche Mitteilung vom 11.07.2006.



/Gruber 2011/

Gruber, E., Grundlagen der Zellstofftechnologie, Vorlesungsskriptum zum Lehrgang „Papiertechnik“ an der Dualen Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe, 2011.

/Grüne et al. 2005/

Grüne, M.; Kernchen, R.; Kohlhoff, J.; Kretschmer, T.; Luther, W.; Neupert, U.; Notthoff, C.; Reschke, R.; Wessel, H.; Zach, H.-G., Nanotechnologie: Grundlagen und Anwendungen, Euskirchen, Stuttgart: Fraunhofer Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen, 2005.

/Grüner 2007/

Grüner, Carmen, Es geht auch ohne TBT - Antifouling-Schiffsbeschichtungen im Wandel, 2007.

/Gsellmann et al. 2010/

Gsellmann, Julia; Simader, Günter; Hacker, Viktor, IEA - Advanced Fuel Cells - Austrian Participation in the IEA Implementing Agreement on Advanced Fuel Cells 2004-2008, Wien, 2010.

/Gummert et al. 2006/

Gummert, G.; Suttor, W., Stationäre Brennstoffzellen: Technik und Markt, Heidelberg: Müller (C.F.), 2006.

/Gutthann et al. 2005/

Gutthann, Franziska; Lorenzen, Kristina, Abschlussbericht über das Forschungsvorhaben „Untersuchungen zur Optimierung der sonnenlichtgetriebenen Wasserstoffproduktion mit Mikroalgen“ MBFSt Kennziffer 2420, Botanisches Institut der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Abt. Physiologie und Biotechnologie der Pflanzlichen Zelle, Kiel, 2005.

/HA 2005/

Ha, Merck KGaA – Know-how für die Nanotechnologie, Hessen Agentur GmbH, 3, 2005.

/HA 2007/

Ha, REWITEC: Beschichtungslösungen zur Minderung von Reibung und Verschleiß, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, 4/2007, 2007.

/Haas et al. 2007/

Haas, Karl-Heinz; Heubach, Daniel, NanoProduktion - Innovationspotenziale für hessische Unternehmen durch Nanotechnologien in Produktionsprozessen, HA Hessen Agentur GmbH, Wiesbaden, 2007.

/Hagemann 2007/

Hagemann, Ingo, Photovoltaik und Architektur - Positiver Imagerträger und innovative Technik für das zukunftsorientierte Bauen: altbauplus, Aachen - Fachveranstaltung 16. November 2007, Thema: „Außenwand spezial“, 2007.

/Hamm 2006/

Hamm, Michael, LED im Audi R8 - was ist die technische Herausforderung?, Automotive Lightning, Reutlingen, 2006.

/Hampicke 2009/

Hampicke, Ulrich, Grenzen des Wachstum energetischer Biomassenutzung, Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG), Güstrow, 2009.

/Hankamer et al. 2007/

Hankamer, Ben; Lehr, Florian; Rupprecht, Jens; Mussgnug, Jan H.; Posten, Clemens; Kruse, Olaf, Photosynthetic biomass and H<sub>2</sub> production by green algae: from bioengineering to bioreactor scale-up, Physiologia Plantarum (2007), Nr. 131, S. 10-21, 2007.



/Hansch et al. 2005/

Hansch, R.; Lavergnat, D.; Menzler, N. H.; Stöver, D., Nanocrystallized Yttria-Stabilized Zirconia for Solid Oxide Fuel Cell Applications, *Advanced Engineering Materials* 7 (2005), Nr. 3, S. 142-144, 2005.

/Happe et al. 2006/

Happe, Thomas; Müllner, Katrin, Biokraftstoffe aus Algen - Photobiologische Wasserstoffproduktion und CO<sub>2</sub>-Fixierung, AG Photobiotechnologie, Lehrstuhl Biochemie der Pflanzen, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2006.

/Harder et al. 2011/

Harder, Sjoerd; Spielmann, Jan; Intemann, Julia; Bandmann, Heinz, Hydrogen Storage in Magnesium Hydride: The Molecular Approach, *Angewandte Chemie* (2011), Nr. 123, S. 4212-4246, 2011.

/Harig et al. 1997/

Harig, H.; Grunwald, A.; Kaysser, W.A.; Langenbach, Ch.J.; Renz, R.; Schmid, G., Technikfolgenbeurteilung der Erforschung und Entwicklung neuer Materialien. Perspektiven in der Verkehrstechnik. Endbericht zum Vorprojekt, Vol. (Graue Reihe Nr. 4), Bad Neuenahr-Ahrweiler: Europäischen Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen, 1997.

/Hart 2006/

Hart, Peter D., Report Findings, Conducted on behalf of the Woodrow Wilson International Center for Scholars, Project on Emerging Nanotechnologies, Woodrow Wilson International Center for Scholars, New York, 2006.

/Hartmann 2006/

Hartmann, U., Faszination Nanotechnologie, München, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2006.

/Hauschildt 2004/

Hauschildt, Jürgen, Innovationsmanagement, 3. völlig überarbeitete und erweiterte Auflage, München: Vahlen Verlag, 2004.

/Heiden et al. 2001/

Heiden, Stefanie; Burschel, Carlo; Erb, Rainer, Biotechnologie als inderdisziplinäre Herausforderung, Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 2001.

/Heinrich et al. 2010/

Heinrich, Gert; Stöckelhuber, Klaus Werner, Neue Perspektiven für Werkstoff Gummi: Innovationspreis für Forschung zu elastomeren Nanokompositen Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V., 2010.

/Helsch 2006/

Helsch, Gundula, Haftfeste Antireflexschichten auf Borosilicatglas für Solarkollektoren, TU Clausthal Institut für Nichtmetallische Werkstoffe, 2006.

/Hempel 2008/

Hempel, Globic NCT – A wave of improvement: Broschüre der Firma Hempel, 2008.

/Hermann et al. 2007/

Hermann, B. G.; Blok, K.; Patel, M. K., Producing Bio-Based Bulk Chemicals Using Industrial Biotechnology Saves Energy and Combats Climate Change, *Environmental Science & Technology* 41 (2007), Nr. 22, S. 7915-7921, 2007.

/Heubach et al. 2005/

Heubach, Daniel; Beucker, Severin; Lang-Koetz, Claus, Einsatz von Nanotechnologie in der hessischen Umwelttechnologie: Innovationspotenziale für Unternehmen, ed. Fraunhofer Iao, Wiesbaden: HA Hessen Agentur GmbH, 2005.

/Hirscher 2011/

Hirscher, Michael, Hydrogen Storage by Cryoadsorption in Ultrahigh-Porosity Metal-Organic Frameworks, *Angewandte Chemie* (2011), Nr. 50, S. 581-582, 2011.

/HL 2006/

HL, Dokumentation Nano - Hier ist die Zukunft - Hessen im Dialog: Hessische Landesregierung, 2006.

/Hofmann 2006/

Hofmann, Thomas, Nanobeschichtungen für Architektur- und Solargläser, Vortrag vom 24.01.2006, VDI Technologiezentrum, Nanotecture 2006 – Anwendungen der Nanotechnologie in Architektur und Bauwesen, Düsseldorf, 2006.

/Holtmannspötter et al. 2006/

Holtmannspötter, Dirk; Rijkers-Defrasne, Sylvie; Glauner, Christoph; Korte, Sabine; Zweck, Axel, Aktuelle Technologieprognosen im internationalen Vergleich - Übersichtsstudie, Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf, 2006.

/Holtmannspötter et al. 2010/

Holtmannspötter, Dirk; Rijkers-Defrasne, Sylvie; Ploetz, Christiane; Thaller-Honold, Svetlana; Zweck, Axel, Technologieprognosen- Internationaler Vergleich 2010, Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf, 2010.

/Hoppenheidt et al. 2005/

Hoppenheidt, K.; Mücke, W.; Peche, R.; Tronecker, D.; Roth, U.; Würdinger, E.; Hottenroth, S.; Rommel, W., Entlastungseffekte für die Umwelt durch Substitution konventioneller chemisch-technischer Prozesse und Produkte durch biotechnische Verfahren, ed. Augsburg Bayerisches Institut Für Angewandte Umweltforschung Und -Technik – Bifa GmbH, Berlin: Umweltbundesamt, 2005.

/Hoshino et al. 2004/

Hoshino, Akiyoshi; Fujioka, Kouki; Oku, Taisuke; Suga, Masakazu; Sasaki, Yu F.; Ohta, Toshihiro; Yasuhara, Masato; Suzuki, Kazuo; Yamamoto, Kenji, Physicochemical Properties and Cellular Toxicity of Nanocrystal Quantum Dots Depend on Their Surface Modification, Nano Letters 4 (2004), Nr. 11, S. 2163-2169, 2004.

/Hug 2004/

Hug, Rolf, Solarzellenforschung in Freiburg: Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) arbeitet an besseren und billigeren Zellen, Solarserver, 2004.

/Hullmann 2001/

Hullmann, A., Internationaler Wissenstransfer und technischer Wandel - Bedeutung, Einflussfaktoren und Ausblick auf technologische Implifikationen am Beispiel der Nanotechnologie in Deutschland, Heidelberg: Physika-Verlag, 2001.

/IBZ 2010/

Ibz, Initiative Brennstoffzelle (IBZ), Herausgegeben von der Initiative Brennstoffzelle, Redaktion Calovini PR, Schwelm, 2010.

/Iden 2010/

Iden, Rüdiger, Der Umwelt zuliebe, Carl Hanser Verlag, 2010.

/IEA 2005/

Iea, Energy Technology Analysis: Prospects for Hydrogen and Fuel Cells, Paris: International Energy Agency, 2005.

/IEF 2008/

Ief, Wärmedämmschichten, Institut für Energieforschung (IEF), Forschungszentrum Jülich, 2008.

/IGV 2008/

Igv, Bioenergie aus Mikroalgen, IGV GmbH, 2008.

- /IHK-Braunschweig 2006/  
Ihk-Braunschweig, Haftfeste Antireflexschicht für Borosilikat-Glasrohre in solarthermischen Großkraftwerken, Braunschweig, 2006.
- /INA 2008/  
Ina, Mikrospiegelanordnungen zur Tageslichtlenkung,, Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik – Fachgebiet Technische Elektronik, Universität Kassel, 2008.
- /IPP 2005/  
Ipp, Osmosekraftwerk, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2005.
- /IPP 2007/  
Ipp, Osmose-Energie, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2007.
- /ISE 2007/  
Ise, Farbstoff- und Organische Solarzellen, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2007.
- /ISE 2009/  
Ise, Weltrekord: 41,1% Wirkungsgrad für Mehrfachsolarzellen am Fraunhofer ISE, Freiburg, 2009.
- /ItN 2006/  
ItN, Nanocomp PP für den Einsatz im Kraftwerksbereich, ItN Nanovation AG, 2006.
- /IWR 2005/  
Iwr, Wasserstoff, Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR) 2005.
- /IWR 2012/  
Iwr, Solar Frontier erzielt Rekord-Wirkungsgrad bei CIS-Dünnschicht-Modulen, Meldung des Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR) - Institut für Regenerative Energiewirtschaft Forschung, Wirtschafts- und Politikberatung, Netzwerke, Medien, 2012.
- /J&K 2010/  
J&K, Reinigungstische JOKE Biocleaner, Joisten & Kettenbaum GmbH & Co. KG, Bergisch-Gladbach, 2010.
- /Jäkel et al. 2013/  
Jäkel, Andreas; Li, Quingdang; Clobes, Jörg; Viereck, Volker; Hillmer, Hartmut, Active Windows for Daylight-Guiding Applications, in Nanotechnology and Energy: Science, Promises and its Limits, Alfred Voß Jochen Lambauer, Ulrich Fahls Pan Stanford Publishing: Singapur. 2013.
- /Jones 2007/  
Jones, Richard, Are natural resources a curse?, Nature Nanotechnology (2007), Nr. 2, S. 665-666, 2007.
- /Jopp 2003/  
Jopp, K., Nanotechnologie – Aufbruch ins Reich der Zwerge, Wiesbaden: Gabler, 2003.
- /Jopp 2006/  
Jopp, Klaus, Nanotechnologie — Aufbruch ins Reich der Zwerge, Vol. 2. Überarbeitete Auflage, Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GWV Fachverlage GmbH, 2006.
- /Jungbluth 2007/  
Jungbluth, Christian Herbert, Kraft-Wärme-Kopplung mit Brennstoffzellen in Wohngebäuden im zukünftigen Energiesystem, Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energieforschung (IEF), 2007.
- /Jungemann 2003/  
Jungemann, Thomas, Politik und Öffentlichkeit fordern Dieselpartikelfilter, 2003.

- /Jüstel 2006a/  
Jüstel, Thomas, Persönliche Mitteilung vom 07.08.2006.
- /Jüstel 2006b/  
Jüstel, Thomas, Neuartige Leuchtstoffe für Hochleistungs-LEDs, Prof. Dr. T. Jüstel, FB Chemieingenieurwesen, FH Münster, Abt. Steinfurt, 2006b.
- /Kahan et al. 2007/  
Kahan, D.M.; Slovic, P.; Braman, D.; Gastil, J.; Cohen, G., Nanotechnology Risk Perceptions: The Influence of Affect and Values, Woodrow Wilson International Center for Scholars, 2007.
- /Kaltschmitt et al. 2006/  
Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang; Wiese, Andreas, Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Vol. Vierte, aktualisierte, korrigierte und ergänzte Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2006.
- /Kamm 2008/  
Kamm, Birgit, Bioraffinerien- Konzepte und Anlagen, Forschungsinstitut biopos e.V. und Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Teltow-Seehof, 2008.
- /Kamm et al. 2006/  
Kamm, M.; Schönicke, P.; Kamm, B., Stoffliche Nutzung Nachwachsender Rohstoffe. Themenfeld 1: Die stoffliche industrielle Nutzung nachwachsender Rohstoffe, biorefinery.de GmbH, 2006.
- /Kätscher et al. 1999/  
Kätscher, Ralf; Ranke, Johannes; Bergenthal, Markus, Vorstudie zum Bewuchsschutz für Seeschiffe 2. Teil - Stand und Perspektiven des chemischen Bewuchsschutzes, Bremen: Zentrum für Umweltforschung und Umwelttechnologie (UFT), Universität Bremen Zentrum für Marine Umweltwissenschaften (MARUM), Universität Bremen, Gesellschaft für Angewandten Umweltschutz und Sicherheit im Seeverkehr (GAUSS), 1999.
- /Kim et al. 2011/  
Kim, Tae-Ho; Cho, Kyung-Sang; Lee, Eun Kyung; Lee, Sang Jin; Chae, Jungseok; Kim, Jung Woo; Kim, Do Hwan; Kwon, Jang-Yeon; Amaratunga, Gehan; Lee, Sang Yoon; Choi, Byoung Lyong; Kuk, Young; Kim, Jong Min; Kim, Kinam, Full-colour quantum dot displays fabricated by transfer printing, Nature Photonics (2011), Nr. 5, S. 176-182, 2011.
- /Klein 2002/  
Klein, Bernd, Leichtbau im Automobilbau, Universität Kassel, Fachbereich Maschinenbau, Fachgebiet Leichtbau-Konstruktion, Kassel, 2002.
- /Klemm 2004/  
Klemm, Helmut, Polycarbonat gewinnt - Die Fertigungstechnik für Kraftfahrzeug-Fensterscheiben aus Kunststoff ist zum Serienstart bereit, MM Das IndustrieMagazin (2004), Nr. 18, 2004.
- /Köhler et al. 2005/  
Köhler, D.; Höpler, K.; Schwärzer, M.; Zotz, M., Die Wärmepumpe in einem veränderten Markt, München: Studie der enwikon Energiewirtschaftliche Konzepte GmbH im Auftrag der EnBW AG, 2005.
- /Köhler 2001/  
Köhler, M., Nanotechnologie: Eine Einführung in die Nanostrukturtechnik, Weinheim u.a., 2001.

- /komm.passion 2004/  
Komm.Passion, Wissen und Einstellungen zur Nanotechnologie Höchste Zeit, die Weichen zu stellen, komm.passion GmbH, Berlin, Hamburg, Düsseldorf, Frankfurt, München, 2004.
- /König 2004/  
König, U., Beiträge der Nanotechnologie für umweltfreundliche Automobile, Symposium Nano meets Umwelttechnik, Fraunhofer IAO Stuttgart, Vortrag vom 02.07.2004, 2004.
- /Kou et al. 2011/  
Kou, Yan; Xu, Yanhong; Guo, Zhaoqi; Jiang, Donglin, Supercapacitive Energy Storage and Electric Power Supply Using an Aza-Fused p-Conjugated Microporous Framework, *Angewandte Chemie* (2011), Nr. 123, S. 8912-8916, 2011.
- /Kovalenko et al. 2011/  
Kovalenko, Igor; Zdyrko, Bogdan; Magasinski, Alexandre; Hertzberg, Benjamin; Milicev, Zoran; Burtovyy, Ruslan; Luzinov, Igor; Yushin1, Gleb, A Major Constituent of Brown Algae for Use in High-Capacity Li-Ion Batteries, *Science Express* 334 (2011), Nr. 6052, S. 75-79, 2011.
- /Kreschl et al. 2005/  
Kreschl, S.; Hipp, E.; Lexen, G., Effizienter Hybridantrieb mit Ultracaps für Stadtbusse., Vortrag beim 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik, Aachen, 2005.
- /Krewitt et al. 2004/  
Krewitt, W.; Pehnt, M.; Fishedick, M.; Temming, H. V., Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung: Ökobilanzen, Szenarien, Marktpotenziale, Berlin: ESV - Erich Schmidt Verlag GmbH & Co, 2004.
- /Kroll et al. 2009/  
Kroll, Alexandra; Pillukat, Mike H.; Hahn, Daniela; Schnekenburger, Jürgen, Current in vitro methods in nanoparticle risk assessment: Limitations and challenges, *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 72 (2009), Nr. 2, S. 370-377, 2009.
- /Kuckelkorn 2006/  
Kuckelkorn, Thomas, Hochtemperaturreceiver für solarthermische Kraftwerke, Symposium Material Innovativ, Universität Bayreuth, Vortrag vom 29.03.2006, Bayreuth, 2006.
- /Kuhlbusch et al. 2009/  
Kuhlbusch, T. A. J.; Krug, H. F.; Nau, K., NanoCare Health related Aspects of Nanomaterials Final Scientific Report, NanoCare Project Consortium, funded by Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Frankfurt am Main, 2009.
- /Kurzweil 2003/  
Kurzweil, Peter, Brennstoffzellentechnik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2003.
- /Kushnir et al. 2008/  
Kushnir, Duncan; Sandén, Björn A., Energy Requirements of Carbon Nanoparticle Production, *Journal of Industrial Ecology* 12 (2008), Nr. 3, S. 360-375, 2008.
- /Laan et al. 2011/  
Laan, D. C. Van Der; Lu, X. F.; Goodrich, L. F., Compact GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-8</sub> coated conductor cables for electric power transmission and magnet applications, *Superconductor Science and Technology* 24 (2011), Nr. 042001, 2011.
- /Lamparter 2010/  
Lamparter, Tilmann, Mikroalgen-Photosynthese für Biomasse Produktion, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, 2010.



- /Lange 2008/  
Lange, Edgar, Nanotechnologie Keramikseparator für Lithiumionen-Batterie, SciTechs – Magazin für Technologietransfer, Ausgabe 02/2008, 2008.
- /LANL 2006/  
Lanl, Estimated energy savings and financial impacts of nanomaterials by design on selected applications in the chemical industry: Los Alamos National Laboratory, 2006.
- /LED-Info 2006/  
Led-Info, Grundlagen – LED – Weisslicht LED – weisse LED, 2006.
- /Lee et al. 2008/  
Lee, Sang Yup; Park, Jin Hwan; Jang, Seh Hee; Nielsen, Lars K.; Kim, Jaehyun; Jung, Kwang S., Fermentative butanol production by clostridia, Biotechnology and Bioengineering 101 (2008), Nr. 2, S. 209-228, 2008.
- /Lekas 2005/  
Lekas, Deanna, Analysis of Nanotechnology from an Industrial Ecology Perspective Part II: Substance Flow Analysis Study of Carbon Nanotubes, Yale School of Forestry & Environmental Studies, 2005.
- /Lewis et al. 2005/  
Lewis, N. S.; Argyros, G. L., Solar Energy and Nanotechnology, California Institute of Technology, 2005.
- /Li et al. 2011/  
Li, Yuelong; Lee, Wonjoo; Lee, Doh-Kwon; Kim, Kyungkon; Park, Nam-Gyu; Ko, Min Jae, Pure anatase TiO<sub>2</sub> “nanoglue”: An inorganic binding agent to improve nanoparticle interconnections in the low-temperature sintering of dye-sensitized solar cells, Applied Physics Letters 98 (2011), Nr. 103301, 2011.
- /Linde 2010/  
Linde, Dampfreformierung, Linde, 2010.
- /Lindner 2010/  
Lindner, C., Produktion, Verbrauch und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2009 - Kurzfassung, Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH, Alzenau, 2010.
- /Link 2011/  
Link, Fritz, Optische Technologien Förderinitiative „LED-Leitmarktinitiative“ Wettbewerb „Kommunen in neuem Licht“, LED Netzwerk Schwarzwald (LENS), Bürgermeisteramt Königsfeld, 2011.
- /Lippold 2011a/  
Lippold, Björn, Die Geschichte der Biotechnologie, Die "Spontane Erzeugung von Lebewesen" und biotechnologische Lebensmittel - Frühe Anfänge in grauer Vorzeit, White Paper, Chemie.DE Information Service GmbH, Berlin, 2011a.
- /Lippold 2011b/  
Lippold, Björn, Der Regenbogen der Biotechnologie, White Paper, Chemie.DE Information Service GmbH, Berlin, 2011b.
- /Lloyd et al. 2003/  
Lloyd, Shannonm; Lave, Lester B., Life Cycle Economic and Environmental Implications of Using Nanocomposites in Automobiles, Environmental Science & Technology 37 (2003), Nr. 15, S. 3458-3466, 2003.
- /Lloyd et al. 2005/  
Lloyd, Shannonm; Lave, Lester B.; Matthews, H. Scott, Life Cycle Benefits of Using Nanotechnology To Stabilize Platinum-Group Metal Particles in Automotive Catalysts, Environmental Science & Technology 39 (2005), Nr. 5, S. 1384-1392, 2005.



/Lu et al. 2011/

Lu, Qi; Lattanzi, Michael W.; Chen, Yunpeng; Kou, Xiaoming; Li, Wanfeng; Fan, Xin; Unruh, Karl M.; Chen, Jingguang G.; Xiao, John Q., Supercapacitor Electrodes with High-Energy and Power Densities Prepared from Monolithic NiO/Ni Nanocomposites, *Angewandte Chemie* (2011), Nr. 123, S. 6979-6982, 2011.

/Lübbert 2005/

Lübbert, Daniel, *Das Meer als Energiequelle: Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages*, 2005.

/Lüdemann et al. 2005/

Lüdemann, Ralf; Schmidhuber, Helge; Wirth, Harry; Brendel, Rolf; Bothe, Karsten; Rech, Bernd; Powalla, Michael; Oelting, Stefan; Lang, Johannes, *Photovoltaik - Innovationen bei Solarzellen und Modulen*, FIZ Karlsruhe GmbH, Eggenstein-Leopoldshafen, 2005.

/Luther et al. 2004/

Luther, Wolfgang; Malanowski, Norbert; Bachmann, Gerd; Hoffknecht, Andreas; Holtmannspötter, Dirk; Zweck, Axel; Heimer, Thomas; Sanders, Hermann; Werner, Mattias; Mietke, Stephan; Köhler, Thomas, *Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt: Innovations- und Technikanalyse*, Düsseldorf: Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH, 2004.

/Luther 2007a/

Luther, Wolfgang, *Einsatz von Nanotechnologien in Architektur und Bauwesen*, ed. Zukünftige Technologien Consulting Vdi Technologiezentrum GmbH, Wiesbaden: HA Hessen Agentur GmbH, 2007a.

/Luther 2007b/

Luther, Wolfgang, *Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt*, in *Chancen und Risiken aktueller Technologien*, A. Gaszó, S. Greßler und F. Schiemers Springer Verlag: Wien New York. 2007b.

/Luther 2008/

Luther, Wolfgang, *Einsatz von Nanotechnologien im Energiesektor*, ed. Vdi Technologiezentrum GmbH, Wiesbaden: HA Hessen Agentur GmbH, 2008.

/Luther et al. 2011/

Luther, Wolfgang; Beismann, Heike; Seitz, Heike, *Nanotechnologie in der Natur - Bionik im Betrieb*, HA Hessen Agentur GmbH, Wiesbaden, 2011.

/Mack 2006/

Mack, Sebastian, *Herstellung und Charakterisierung von CSS-CdTe-Dünnschicht Solarzellen*, Jena: Diplomarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Physikalisch-Astronomische Fakultät, Institut für Festkörperphysik, 2006.

/Macoubrie 2005/

Macoubrie, Jane, *Informed Public Perceptions of Nanotechnology and Trust in Government*, Woodrow Wilson International Center for Scholars, 2005.

/Mahle 2011/

Mahle, *Filterwerkstoffe - Übersicht*, MAHLE Industriefiltration GmbH, Öhringen, 2011.

/MAN 2005/

Man, *Optimierter MAN-Ultracap-Bus im Linieneinsatz bei der VAG in Nürnberg: Umweltfreundliches Hybridkonzept mit Nutzung der Bremsenergie*, MAN Nutzfahrzeuge AG, 2005.

/Maynard 2006/

Maynard, Andrew D., *Safe handling of nanotechnology*, *Nature* (2006), Nr. 444, S. 267-269, 2006.

- /McCarthy et al. 2011/  
Mccarthy, M. A.; Liu, B.; Donoghue, E. P.; Kravchenko, I.; Kim, D. Y.; So, F.; Rinzler, A. G., Low-Voltage, Low-Power, Organic Light-Emitting Transistors for Active Matrix Displays, *Science* 332 (2011), Nr. 6029, S. 570-573, 2011.
- /McCullough 2011/  
McCullough, Dennis, Innovative und nachhaltige Lösungen für globale Megatrends, *kunststoffFORUM*, 2011.
- /McKie 2007/  
Mckie, Robin, Barnacle-busting paint makes ships' voyages greener, *The Observer*, 2007.
- /Melin et al. 2007/  
Melin, Thomas; Rautenbach, Robert, Membranverfahren – Grundlagen der Modul- und Anlagentechnik,, Vol. 3. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- /MEXT\_CST 2001/  
Mext\_Cst, The Seventh Technology Foresight - Future Technology in Japan towards the Year 2030, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Council of Science and Technology (CST), Japan, 2001.
- /Meyer et al. 2006/  
Meyer, Frank; Faber, Stefan; Novy, Anja, Nanocomp PP: Nanokeramische Schutzschichten für Kraftwerke im Praxistest, *VGB Powertech International Journal for Electricity and Heat Generation* 9 (2006), Nr. 86, S. 131-135, 2006.
- /MINEZ 1998/  
Minez, Technology Radar, Ministry of Economic Affairs (MINEZ), Niederlande, 1998.
- /Möller et al. 2009/  
Möller, Marting; Eberle, Ulrike; Hermann, Andreas; Moch, Katja; Stratmann, Britta, Nanotechnologie im Bereich der Lebensmittel, ed. Ta-Swiss Zentrum Für Technologiefolgen-Abschätzung, Zürich: Vdf Hochschulverlag, 2009.
- /Moscovic 2007/  
Moscovic, Jon M., Superconducting Cable Connects the Grid, *Transmission and distribution world*, 2007.
- /Möthrrath et al. 2007/  
Möthrrath; Sandquist; Köppchen; Krause, Polycarbonatanwendungen im Automobilbau, Bayer AG, 2007.
- /MPG 2002/  
Mpg, Nanozwiebeln bringen Styrol- Synthese auf Trab, *Max-Planck Gesellschaft*, 2002.
- /mPhase 2008/  
Mphase, Technology Background, mPhase Technologies, 2008.
- /Müller 2011/  
Müller, Bernd, Mehr Ertrag bei der Sonnenernte, in *ETH GLOBE, Das Magazin der ETH Zürich*, 2, 2011.
- /Müller et al. 2005/  
Müller, Christoph; Dreesmann, Lars; Mühlenbeck, Frank; Otto, Ralf; Werner, Markus, Einführung in die kommerzielle Biotechnologie, Stuttgart, Berlin: Steinbeis-Edition, 2005.

/Müllner 2008/

Müllner, Katrin Christine, Optimierung und technische Umsetzung der photobiologischen Wasserstoffherzeugung mit der Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii*, Fakultät für Biologie und Biotechnologie, Lehrstuhl Biochemie der Pflanzen in der Arbeitsgruppe Photobiotechnologie, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2008.

/MWV 2010/

Mwv, Struktur der Weiterverarbeitungsanlagen, Mineralölwirtschaftsverband e.V., Berlin, 2010.

/Nanoforum 2004/

Nanoforum, Nanotechnology helps solve the world's energy problems: Nanoforum.org, European Nanotechnology Gateway, 2004.

/NanotechReport 2003/

Nanotechreport, Nano gibt Gas, Nanotech Report (2003), Nr. 09, 2003.

/Nefiodow 1996/

Nefiodow, L. A., Der sechste Kondratieff: Wege zur Produktivität und Vollbeschäftigung im Zeitalter der Information, Sankt Augustin: Rhein-Sieg-Verlag, 1996.

/Nel et al. 2009/

Nel, Andre E.; Mädler, Lutz; Velegol, Darrell; Xia, Tian; Hoek, Eric M. V.; Somasundaran, Ponisseril; Klaessig, Fred; Castranova, Vince; Thompson, Mike, Understanding biophysicochemical interactions at the nano-bio interface, Nature Materials (2009), Nr. 8, S. 543-557, 2009.

/net-t 2006/

Net-T, Was Nano nicht alles kann – neue Akkus mit fünffacher Speicherkapazität, 2006.

/NIC 2001/

Nic, The Global Technology Revolution. Bio/Nano/Materials Trends and Their Synergies with Information Technology by 2015, National Intelligence Council (NIC), USA, 2001.

/Nidetzky et al. 2010/

Nidetzky, B.; Schwab, H., Einführung in die Biotechnologie, Präsentation der Technische Universität Graz, 2010.

/Nielsen et al. 2009/

Nielsen, P. H.; Kuilderd, H.; Zhou, W.; Lu, X., Enzyme biotechnology for sustainable textiles, Sustainable textiles - Life cycle and environmental impact, R. S. Blackburn, Editors, Woodhead Publishing Limited, Oxford, Cambridge, New Dehli, 2009.

/Niggemann 2006/

Niggemann, Michael, Persönliche Mitteilung vom 08.08. 2006.

/Nitsch 2008/

Nitsch, Joachim, Weiterentwicklung der Ausbaustrategie Erneuerbare Energien Leitstudie 2008, in Zusammenarbeit mit der Abteilung „Systemanalyse und Technikbewertung“ des DLR-Instituts für Technische Thermodynamik; im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, 2008.

- /Nitsch et al. 2010/  
Nitsch, Joachim; Pregger, Thomas; Scholz, Yvonne; Naegler, Tobias; Sterner, Michael; Gerhardt, Norman; Oehsen, Amany Von; Pape, Dr. Carsten; Saint-Drenan, Yves-Marie; Wenzel, Bernd, Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global „Leitstudie 2010“, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, 2010.
- /NNI 2000/  
Nni, National Nanotechnology Initiative, The Initiative and its Implementation Plan, National Science and Technology Council Committee on Technology Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology, 2000.
- /NNI 2005/  
Nni, Nanoscience Research for Energy Needs, Report of the National Nanotechnology Initiative Grand Challenge Workshop 2004, 16.-18.03.2004, Vol. 2. Auflage, Arlington: National Nanotechnology Initiative, 2005.
- /Noack 2007/  
Noack, André, Nanotechnologien für die optische Industrie - Grundlage für zukünftige Innovationen in Hessen, ed. Optence E. V., Wiesbaden: HA Hessen Agentur GmbH, 2007.
- /Nordan et al. 2005/  
Nordan, Matthew M.; Holman, Michael W., A prudent approach to nanotechnology environmental, health, and safety risks, *Industrial Biotechnology* 1 (2005), Nr. 3, S. 146-149, 2005.
- /Nordmann 2006/  
Nordmann, Alfred, Personalisierte Medizin? – Zum Versprechen der Nanomedizintechnik, *Hessisches Ärzteblatt* (2006), Nr. 5, S. 331-333, 2006.
- /NSTC 1999/  
Nstc, Nanotechnology Shaping the World Atom by Atom, National Science and Technology Council, Committee on Technology The Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology, Washington, D.C., 1999.
- /NSTC\_NSET 2002/  
Nstc\_Nset, Converging Technologies For Improving Human Performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science, National Science and Technology Council (NSTC), Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology (NSET), USA, 2002.
- /ntcgmbh 2008/  
Ntcgmbh, Nanotechnologie, Nano TechCoatings GmbH, 2008.
- /Nusser et al. 2007/  
Nusser, M.; Hüsing, B.; Wydra, S., Potenzialanalyse der industriellen, weißen Biotechnologie, Karlsruhe: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Innovations- und Technikanalyse (ITA) erstellt durch Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), 2007.
- /Oberdörster et al. 2002/  
Oberdörster, G.; Sharp, Z.; Atudorei, V., Extrapulmonary translocation of ultrafine carbon particles following whole-body inhalation exposure of rats, *Toxicology and Environmental Health* 20 (2002), Nr. 65, S. 1531-1543, 2002.
- /Oberdörster et al. 2004/  
Oberdörster, G.; Sharp, Z.; Atudorei, V.; Elder, A.; Gelein, R.; Kreyling, W.; Cox, C., Translocation of Inhaled Ultrafine Particles to the Brain, *Inhalation Toxicology* (2004), Nr. 16, S. 437-445, 2004.

/Oberdörster et al. 2005a/

Oberdörster, G.; Oberdörster, E.; Oberdörster, J., Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles, *Environmental Health Perspectives* 113 (2005a), Nr. 7, S. 823-839, 2005a.

/Oberdörster et al. 2005b/

Oberdörster, Günter; Maynard, Andrew; Donaldson, Ken; Castranova, Vincent; Fitzpatrick, Julie; Ausman, Kevin; Carter, Janet; Karn, Barbara; Kreyling, Wolfgang; Lai, David; Olin, Stephen; Monteiro-Riviere, Nancy; Warheit, David; Yang, Hong, Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy; A report from the ILSI Research Foundation/Risk Science Institute Nanomaterial Toxicity Screening Working Group, *Particle and Fibre Toxicology* 2 (2005b), Nr. 8, 2005b.

/ObservatoryNano 2008/

Observatorynano, Nanocomposites, 2008.

/OECD 1998/

Oecd, Biotechnology for clean industrial products and processes - Towards industrial sustainability, Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD), Paris, 1998.

/OECD 2001/

Oecd, The Application of Biotechnology to Industrial Sustainability, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, 2001.

/OECD 2005/

Oecd, A Framework for Biotechnology Statistics, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2005.

/Oertel 2007/

Oertel, Dagmar, Industrielle stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe - Sachstandsbericht zum Monitoring "Nachwachsende Rohstoffe", Arbeitsbericht Nr. 114, TAB, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin, 2007.

/Oey et al. 2006/

Oey, C. C.; Djuricic, A. B.; Wang, H.; Man, K.K.Y.; Chan, W. K.; Xie, M. H.; Leung, Y. H.; Pandey, A.; Nunzi, J.-M.; Chui, P. C., Polymer-TiO<sub>2</sub> solar cells: TiO<sub>2</sub> interconnected network for improved cell performance, *Nanotechnology* 17 (2006), Nr. 3, S. 706-7013, 2006.

/OFRU 2010/

Ofru, Verfahren zur Aufbereitung von Lösemittel und Wasser, OFRU Recycling GmbH & Co. KG, Babenhausen, 2010.

/OIDA 2002/

Oida, Light Emitting Diodes (LEDs) for General illumination: An OIDA Technology Roadmap Update 2002, ed. Sandia National Laboratories Jeff Y. Tsao, Washington DC: Optoelectronics Industry Development Association, 2002.

/Oksholen 2007/

Oksholen, Tore, New membrane catches CO<sub>2</sub>, 2007.

/OLED100 2009/

Oled100, OLED100.eu - Project Report Three aesthetical perception case studies, Organic LED Lighting in European Dimensions funded under the IST priority, 2009.

/OLED100 2011/

Oled100, Organic LED lighting in European dimensions, 2011.

/OLED-A 2011/

Oled-A, Korean Government Tries to Position Korea as the Leader in OLED Technology, OLED Association, 2011.



/OLLA 2009/

Olla, OLLA Project Report - Final Activity Report, High brightness OLEDs for ICT & Next Generation Lighting Applications funded under the IST priority, 2009.

/Orthen et al. 2007/

Orthen, B.; Arndt, R.; Balderhaar, J.; Lotz, G.; Plitzko, S.; Wardenbach, P.; Wolf, T.; Gundert-Remy, U.; Gürtler, R.; Heinemeyer, G.; Hertel, R.; Kräkte, R.; Pfaff, K.; Richter-Reichhelm, H.; Ahlers, J.; Becker, H.; Dubbert, W.; Kolossa-Gehring, M.; Leuschner, C.; Märkel, K.; Marschner, A., Nanotechnologie: Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanomaterialien - Forschungsstrategie -, Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), BfR, Umweltbundesamt (UBA), 2007.

/Osterwalder et al. 2006/

Osterwalder, Neil; Capello, Christian; Hungerbühler, Konrad; Stark, Wendelin J., Energy consumption during nanoparticle production: How economic is dry synthesis?, Journal of Nanoparticle Research (2006), Nr. 8, S. 1-9, 2006.

/OSTP 1998/

Ostp, New Forces at Work. Industry Views Critical Technologies, Office of Science and Technology Policy (OSTP), USA, 1998.

/Oxonica 2005a/

Oxonica, Envirox: Fuel Economy, Stand: 2005, Oxonica Energy, Kidlington, 2005a.

/Oxonica 2005b/

Oxonica, Envirox Technical Notes: Catalytic Function of Cerium Oxide, Stand: 2005, Oxonica Energy, Kidlington, 2005b.

/Oxonica 2007/

Oxonica, ENVIROX™ Case Study - Stagecoach 2007, Oxonica, 2007.

/Oxonica 2008/

Oxonica, Reducing diesel fuel costs with ENVIROX™ fuel additive, Oxonica, 2008.

/Paddon et al. 2008/

Paddon, Paul; Bernhard, Michel, Sonnige Aussichten für Solarzellen – Virtuelles Prototyping von Nanostrukturen, Zeitschrift für Laserphotonik, 2008.

/Paschen et al. 2004/

Paschen, H; Coenen, C; Fleischer, T.; Grünwald, R.; Oertel, D.; Revermann, C., Nanotechnologie - Forschung, Entwicklung, Anwendung, Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2004.

/Paschen et al. 2003/

Paschen, Herbert; Coenen, Christopher; Fleischer, Torsten; Grünwald, Reinhard; Oertel, Dagmar; Revermann, Christoph, Nanotechnologie, TAB-Arbeitsbericht Nr. 092, Berlin, 2003.

/Paschmann 2011/

Paschmann, Hans, Fachtagung Betonseminar 2011, Hochschule Aachen, Fachbereich Bauingenieurwesen, Lehrgebiet Bausstoffkunde, 2011.

/Pastewski et al. 2009/

Pastewski, Nico; Lang-Koetz, Claus; Heubach, Daniel; Haas, Karl-Heinz, Materialeffizienz durch den Einsatz von Nanotechnologien und neuen Materialien, ed. Isc Fraunhofer Iao, Wiesbaden: HA Hessen Agentur GmbH, 2009.

/Patel 2011/

Patel, Prachi, The First Full-Color Display with Quantum Dots, Technology Review, published by MIT (2011), Nr. 2011.

/Pehnt et al. 2002/

Pehnt, Martin; Schurnberger, Werner, Energierevolution Brennstoffzelle?: Perspektiven, Fakten, Anwendungen, Weinheim: Wiley-VCH, 2002.



- /Peinemann et al. 2008/  
Peinemann, K.-V.; Skilhagen, S.-E.; Nielsen, W. K., Regenerative Energie: Strom aus Osmose-Kraftwerken, Physik in unserer Zeit Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2008), Nr. 2008.
- /Perlitz 2004/  
Perlitz, Uwe, Grüne Biotechnologie: Weg aus Sackgasse in Europa gesucht, Deutsche Bank Research, Frankfurt am Main, 2004.
- /Perlitz 2007/  
Perlitz, Uwe, Weiße Biotechnologie Schlummerndes Potenzial wird geweckt, Deutsche Bank Research, Frankfurt am Main, 2007.
- /Pester et al. 2009/  
Pester, W.; Trechow, P., Bordstrom direkt aus Autoabgas zapfen, VDI-Nachrichten (2009), Nr. 44, 2009.
- /Placke 2006/  
Placke, Daniel, Nanofaserbeschichtung von Filterwerkstoffen, Innovationsforum Nanobasierte Umwelttechnik, Jena, 2006.
- /PlasticEurope 2008/  
Plasticeurope, Kunststoffherzeugung in Deutschland 2006, PlasticEurope, 2008.
- /Pohl et al. 2005/  
Pohl, Christian; Kriebs, Kerstin; Simon, Ralf, Marktanalyse für Brennstoffzellen in der stationären Anwendung, TSB, 2005.
- /Poland et al. 2008/  
Poland, Craig A.; Duffin, Rodger; Kinloch, Ian; Maynard, Andrew; Wallace, William A. H.; Seaton, Anthony; Stone, Vicki; Brown, Simon; Macnee, William; Donaldson, Ken, Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study, Nature Nanotechnology (2008), Nr. 3, S. 423-428, 2008.
- /Pudenz 2011/  
Pudenz, Katrin, Reibungsverlust minimiert durch Nanoslide-Technologie, ATZ online, Springer Automotive Media, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.
- /Pushparaj et al. 2007/  
Pushparaj, Victor L.; Shaijumon, Manikoth M.; Kumar, Ashavani; Murugesan, Saravanababu; Ci, Lijie; Vajtai, Robert; Linhardt, Robert J.; Nalamasu, Omkaram; Ajayan, Pulickel M., Flexible energy storage devices based on nanocomposite paper, Proceedings of the National Academy of Sciences PNAS 104 (2007), Nr. 34, S. 13574–13577, 2007.
- /Putz 2009/  
Putz, Otto, Mikroalgen als Energieträger der Zukunft, in Biotechnologische Energiewandlung - Gegenwärtige Situation, Chancen und künftiger Forschungsbedarf Thomas Bleys acatech diskutiert, Springer Verlag: Berlin, Heidelberg. 2009.
- /Pytlik 2009/  
Pytlik, Walter, Downstream Processing: Aufreinigung mit Optimierungspotenzial, 2009.
- /Quaschnig 2008/  
Quaschnig, Volker, Erneuerbare Energien und Klimaschutz: Hintergründe-Techniken-Anlagenplanung- Wirtschaftlichkeit, München: Carl Hanser Verlag, 2008.
- /Radgen et al. 2006/  
Radgen, Peter; Cremer, Clemens; Warkentin, Sebastian; Gerling, Peter; May, Franz; Knopf, Stephan, Verfahren zur CO<sub>2</sub>- Abscheidung und Speicherung Abschlussbericht: Umweltbundesamt, 2006.

- /RAG 2007/  
Rag, Evergreen der Spezialchemie, Folio - Das Mitarbeitermagazin der RAG (2007), Nr. 2, 2007.
- /Rakau 2011/  
Rakau, Oliver, Deutschlands Biotechnologieregionen Konzentration setzt sich fort, Deutsche Bank Research, Frankfurt am Main, 2011.
- /Randel 2003/  
Randel, P., Nanoporöse Dämmstoffe auf Basis Fumed Silica, Vortrag vom 10.07.2003, 1. Fachtagung VIP-Bau, Rostock-Warnemünde, 2003.
- /Reetz 2011/  
Reetz, Manfred T., Zusätzliches Gasmolekül in der Bindetasche eines Enzyms ermöglicht Methanoxidation, Angewandte Chemie, 2011.
- /Reichenauer et al. 2008/  
Reichenauer, Gudrun; Ebert, Hans-Peter, Sol-Gel Derived Porous Materials - Efficient Use of Energy via Aerogels 6 Co, NanoS (2008), Nr. 01, S. 17 - 22, 2008.
- /Reisch 2007/  
Reisch, Michael, Halbleiter-Bauelemente, Vol. 2, Berlin: Springer Verlag, 2007.
- /Reuscher et al. 2008/  
Reuscher, Günter; Ploetz, Cristiane; Grimm, Vera; Zweck, Axel, Innovationen gegen Rohstoffknappheit, VDI Technologiezentrum, Zukünftige Technologien Consulting, Düsseldorf, 2008.
- /Rewitec 2008/  
Rewitec, Nanobeschichtung, REWITEC, 2008.
- /Ring 2010/  
Ring, Werner, Textile Faserstoffe, Gewerbliche Schule Metzingen, Metzingen, 2010.
- /Ripplinger 2008a/  
Ripplinger, Peter, Wertstoffe aus dem Flachplatten-Airlift-Reaktor, Subitec GmbH, Stuttgart, 2008a.
- /Ripplinger 2008b/  
Ripplinger, Peter, Es geht voran: Die neue Generation des Flat Panel Airlift-Reaktors zur Algenproduktion, Forum: Energie aus Algen, Hannover Messe, Forum Innovations for Industry, Hannover, 2008b.
- /Riva 2006/  
Riva, Sergio, Laccases: blue enzymes for green chemistry, Trends in Biotechnology 24 (2006), Nr. 5, 2006.
- /Roco et al. 2001/  
Roco, Mihail C.; Bainbridge, William Sims, Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology, National Science Foundation at the request of the National Science and Technology Council (NSTC), Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering, and Technology (NSET), Arlington, Virginia, 2001.
- /Röpke 2004/  
Röpke, Jochen, Nanotechnologie als Basisinnovation, Philipps-Universität Marburg, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Abteilung Volkswirtschaftslehre und Wirtschaftstheorie III, Prof. Dr. Jochen Röpke, 2004.
- /Rosner et al. 2010/  
Rosner, Vincent; Wagner, Hermann-Josef, Photobiologische Wasserstoffherzeugung Design natürlicher Systeme zur lichtgetriebenen H<sub>2</sub>-Produktion, International DAAD Alumni Summer School „Wasser und Energie“ 2010, 17. November 2010, Ruhr-Universität Bochum, 2010.

- /Rossmath 2009/  
Rossmath, Peter, Aerober und Anaerober Abbau, ACS Umwelttechnik GmbH & Co. KG, Rielasingen, 2009.
- /Rossmann et al. 2005/  
Rossmann, Torsten; Tropea, Cameron, Bionik - Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaft, Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2005.
- /RS 2004/  
RS, Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties, London: Royal Society, Royal Academy of Engineering, 2004.
- /Rüdenauer et al. 2004/  
Rüdenauer, Ina; Griebhammer, Rainer; Götz, Konrad; Birzle-Harder, Barbara, PROSA Waschmaschinen - Produkt-Nachhaltigkeitsanalyse von Waschmaschinen und Waschprozessen, Öko-Institut e.V., Gefördert vom BMBF, Freiburg, 2004.
- /Rüdenauer et al. 2006/  
Rüdenauer, Ina; Eberle, Ulrike; Griebhammer, Rainer, Ökobilanz und Lebenszykluskostenrechnung Wäschewaschen - Vergleich des Waschens bei durchschnittlichen Waschttemperaturen mit Waschen bei niedrigeren Waschttemperaturen, Öko-Institut e.V., im Auftrag der Procter & Gamble Service GmbH, Freiburg, 2006.
- /RWE 2008/  
RWE, Das RWE-Algenprojekt in Bergheim-Niederausem - Produktion von Mikroalgen unter Nutzung von Kraftwerksrauchgasen zur CO<sub>2</sub>-Einbindung, RWE Power Aktiengesellschaft Essen, Köln, 2008.
- /RWTH 2008/  
RWTH, Verbundprojekt Oxycoal- AC - Entwicklung eines CO<sub>2</sub>-emissionsfreien Kraftwerksprozesses, RWTH Aachen, Aachener Verfahrenstechnik (AVT), 2008.
- /Sandén et al. 2007/  
Sandén, Björn A.; Kushnir, Duncan, Energy balance of carbon nanoparticle applications: a technology assessment of production and use systems, EuroNanoForum, Düsseldorf, 2007.
- /Sauer et al. 2004/  
Sauer, H. M.; Spiekermann, St.; Cura, E.; Lie, L. H., Beschleunigte Klebstoffhärtung mit Mikrowellen und Nanoferriten., Adhäsion — kleben & dichten 48 (2004), Nr. 5, S. 12–14, 2004.
- /Scheper 1998/  
Scheper, T., Biotechnologie am Wirtschaftsstandort Deutschland - ein Beitrag zur Nachhaltigkeit. Vortrag im Rahmen der 11. Osnabrücker Umweltgespräche der deutschen Bundesstiftung Umwelt zum Thema: Umweltentlastung durch Biotechnologie und Management - Neue Wege zu Produktivitätssteigerung und Kostensenkung, Osnabrück, 1998.
- /Schiermeister et al. 2003/  
Schiermeister, N.; Schwenkschuster, L.; Decker, D.; Eichhorn, K., Leuchtdioden-Systeme im Scheinwerfer, ATZ (Automobiltechnische Zeitung) 105 (2003), Nr. 9, Sonderdruck, S. 1-11, 2003.
- /Schlandt 2009/  
Schlandt, Jakob, Streit um Gift in Solarzellen entzweit die Branche, Berliner Zeitung, 2009.

- /Schmidt et al. 2007/  
Schmidt, Michael; Teichmann, Thomas, Ultra-High-Performance Concrete: Basis for sustainable structures, Central Europe towards Sustainable Building (CESB) 07, Prague: iiSBE, 2007.
- /Schönberger et al. 2003/  
Schönberger, Harald; Schäfer, Thomas, Beste verfügbare Techniken in Anlagen der Textilindustrie, Umweltbundesamt, Forschungsbericht 200 94 329, UBA-FB 000325, Berlin, 2003.
- /Schuh et al. 2003/  
Schuh, E.; Heine, E.; Daâloul, N.; Höcker, H.; Breier, R.; Mondschein, A.; Apitz, A.; Pée, K.-H. Van; Scheibner, K., Oxidative Enzyme in der Textilindustrie, 2003.
- /Schulenburg 2006/  
Schulenburg, Mathias, Nanotechnologie: Innovationen für die Welt von morgen, Bonn, Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2006.
- /Schumpeter 1947/  
Schumpeter, Joseph A., The Creative Response in Economic History, Economic History (1947), Nr. 7, 1947.
- /Scott et al. 2002/  
Scott, G. M.; Akhtar, M.; Swaney, R. E.; Houtman, C. J., Recent Developments in Biopulping Technology at Madison, WI, in Biotechnology in the Pulp and Paper Industry, L. Viikari und R. Lanttos Elsevier Science B. V.: Amsterdam. 2002.
- /Scott et al. 2000/  
Scott, Gary M; Akhtar, Masood; Kirk, T. Kent, An Update on Biopulping Commercialization, Proceedings of the 2000 Pulping Conference,, Atlanta, GA: Tappi Press, 2000.
- /Scott 2003/  
Scott, Gary M., Scale Up of Biopulping, Faculty of Paper and Bioprocess Engineering, Empire State Paper Research Institute, State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, New York, 2003.
- /Seiler et al. 2004/  
Seiler, Petra; Holtmannspötter, Dirk; Albertshausen, Ulrich, Internationale Technologieprognosen im Vergleich - Übersichtsstudie, Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf, 2004.
- /Shen et al. 2009/  
Shen, Li; Haufe, Juliane; Patel, Martin K., Product overview and market projection of emerging bio-based plastics PRO-BIP 2009, Group Science, Technology and Society (STS), Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation Utrecht University, commissioned by European Polysaccharide Network of Excellence (EPNOE) und European Bioplastics, Utrecht, 2009.
- /Sommerlatte et al. 2007/  
Sommerlatte, Jana; Nielsch, Kornelius; Böttner, Harald, Thermoelektrische Multitalente Nanostrukturierte Materialien versprechen effiziente thermoelektrische Konverter, Physik Journal 6 (2007), Nr. 5, S. 35-41, 2007.
- /SRU 2011/  
Sru, Vorsorgestrategien für Nanomaterialien - Sondergutachten, Berlin, 2011.
- /Statkraft 2009/  
Statkraft, Energiegewinnung durch Osmose: Weltweit erster Prototyp nimmt Betrieb auf, Pressemitteilung der Statkraft AS, 2009.
- /Steele et al. 2001/  
Steele, B. C. H.; Heinzl, A., Materials for fuel-cell technologies, Nature 414 (2001), Nr. 6861, S. 345-352, 2001.

/Steinfeldt et al. 2003/

Steinfeldt, Michael; Petschow, Ulrich; Hirschl, B., Anwendungspotenziale nanotechnologiebasierter Materialien. Analyse ökologischer, sozialer und rechtlicher Aspekte, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) gGmbH, Berlin, 2003.

/Steinfeldt et al. 2004/

Steinfeldt, Michael; Gleich, Arnim Von; Petschow, Ulrich; Haum, Rüdiger; Chudoba, Thomas; Haubold, Stephan, Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) gGmbH, 2004.

/Steinfeldt et al. 2007/

Steinfeldt, Michael; Gleich, Arnim Von; Petschow, Ulrich; Haum, Rüdiger, Nanotechnologies, Hazards and Ressource Efficiency - A Three-Tiered Approach to Assessing the Implications of Nanotechnology and Influencing its Development, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007.

/Steinfeldt et al. 2009/

Steinfeldt, Michael; Petschow, Ulrich, Umweltentlastungen durch Nanotechnologie - Faktor 10 mit hohen Risiken?, Ökologisches Wirtschaften (2009), Nr. 2, S. 39-42, 2009.

/Steinfeldt et al. 2010/

Steinfeldt, Michael; Gleich, Arnim Von; Petschow, Ulrich; Pade, Christian; Sprenger, Rolf-Ulrich, Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2010.

/Steinfeldt 2013/

Steinfeldt, Michael, Environmental impact and energy demand of nanotechnology, in Nanotechnology and Energy - Science, Promises and its Limits, Jochen Lambauer, Alfred Voß und Ulrich Fahls Pan Standord Publishing: Singapur. 2013.

/Sternberg 2011/

Sternberg, Kristin, Bioraffinerie in Deutschland, Vortrag im Rahmen des 19. C.A.R.M.E.N.-Symposium am 11. und 12. Juli 2011, Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing, 2011.

/Stiller 2005/

Stiller, Olaf, Innovationsdynamik in der zweiten industriellen Revolution - Die Basisinnovation Nanotechnologie, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Philipps-Universität Marburg, Marburg, 2005.

/Stobbe et al. 2009/

Stobbe, Lutz; Nissen, Nils F.; Proske, Marina; Middendorf, Andreas; Schlomann, Barbara; Friedewald, Michael; Georgieff, Peter; Leimbach, Timo, Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft, Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Karlsruhe, 2009.

/Stoneman 1995/

Stoneman, P., The Handbook of Economics of Innovation and Technological Change, Cambridge, Massachussets: Wiley-Blackwell, 1995.

/Strategierat 2006/

Strategierat, Nationaler Entwicklungsplan Version 1.1 zum „Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie: Strategierat Wasserstoff Brennstoffzellen, 2006.

/Subitec 2010/

Subitec, Die Grundprinzipien der Technologie der Subitec GmbH zur Herstellung von Mikroalgen, Subitec GmbH, Stuttgart, 2010.



- /Suckau 2011/  
Suckau, Kristin, Projekt „Super-Kon“ Neue Super-Kondensatoren für die Energiespeicherung, Halle, 2011.
- /Summerer 2003/  
Summerer, Exatec - Technologie-Plattform für Kfz-Verscheibungssysteme, Summerer Technologies, 2003.
- /Texocon 2008/  
Texocon, Einführung in die Nanotechnologie, Seminarreihe im Haus der Technik in Essen 20. 06. 2008, Essen: Texocon GmbH, 2008.
- /Theodore et al. 2005/  
Theodore, Louis; Kunz, Robert G., Nanotechnology: Environmental Implications and Solutions, Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience, 2005.
- /Thesenvitz et al. 2007/  
Thesenvitz, M.; Mohn, B.; Bohl, B., Prüfbericht: Nanoprotect, Frankfurt am Main: Fachhochschule Frankfurt am Main, Labor für Kraftfahrzeugtechnik, 2007.
- /Thieman et al. 2007/  
Thieman, William J.; Palladino, Michael A.; Lazar, Thomas, Biotechnologie, Vol. 1, München: Pearson Studium, 2007.
- /Thomson 2006/  
Thomson, E. A., MIT revamps energy system for more fuel-efficient cars, 2006.
- /Tolbert 2008/  
Tolbert, Sarah, Improved photovoltaic efficiency in semiconducting polymer/fullerene solar cells through control of fullerene self-assembly and stacking;; Research Project at the University of California in Los Angeles; Reference: UCLA Case No. 2008-662, 2008.
- /Tomson et al. 2003/  
Tomson, Mason; Colvin, V. L.; Cheng, Xuekun, Adsorption/Desorption of Pollutants to Nanoparticles, Center for Biological and Environmental Nanotechnology, Civil and Environmental Engineering and Chemistry Departments Rice University, 2003.
- /UBA\_CH 2004/  
Uba\_Ch, Handbuch für Emissionsfaktoren, Version 2.1, Bern: Umweltbundesamt Schweiz, 2004.
- /UH 2008/  
Uh, Umwandlung von Wärme in Elektrische Energie, Pressedienst Universität Hamburg, 2008.
- /Uhlig 2007/  
Uhlig, Ralf, Anti-Reflex-Schicht für transparente Hochtemperatur Receiver-Abdeckungen (ARTRANS): Abschlussbericht ARTRANS 2007.
- /Unselde 2006/  
Unselde, K., Persönliche Mitteilung vom 10.07.2006.
- /va-Q-tec 2009/  
Va-Q-Tec, Produktdatenblatt (va-Q-vip B), Stand: 6/2009, va-Q-tec AG, Würzburg, 2009.
- /VACI 2006/  
Vaci, European Research Project VACI on Vacuum Insulation, 2006.
- /Vaillant 2007/  
Vaillant, Zukunft Brennstoffzellen - Brennstoffzellenheizgeräte, Vaillant GmbH, 2007.
- /VDI-TZ 2006a/  
Vdi-Tz, future technologies update, Vol. Ausgabe 1/2006, Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure - Technologiezentrum, 2006a.



/VDI-TZ 2006b/

Vdi-Tz, Supraleitender Kurzschlussstrombegrenzer (SSB) – Vom Demonstrator zum marktfähigen Produkt Info Phys Tech Nr. 64/2006, Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure – Technologiezentrum, 2006b.

/VDI 2007/

Vdi, VDI-Innovationsklima-Index zum Technologiestandort Deutschland, ed. Zukünftigen Technologien Consulting (Ztc) Vdi Technologiezentrum GmbH: VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2007.

/VDZ 2007/

Vdz, Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2007, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Forschungsinstitut der Zementindustrie, 2007.

/Velte 2006/

Velte, Gabriele, Persönliche Mitteilung vom 03.07.2006.

/Viebahn et al. 2010/

Viebahn, Peter; Esken, Andrea; Höller, Samuel; Luhmann, Jochen; Pietzner, Katja; Vallentin, Daniel; Dietrich, Lras; Nitsch, Joachim, RECCS plus Regenerative Energien (RE) im Vergleich mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Ablagerung (CCS) - Update und Erweiterung der RECCS-Studie, Forschungsvorhaben gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Wuppertal, 2010.

/vip-bau 2008/

Vip-Bau, Vakuumisolationspaneele, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern), Würzburg, 2008.

/Wagner et al. 2006/

Wagner, Volker; Zweck, Axel, Nanomedizin - Innovationspotenziale in Hessen für Medizintechnik und Pharmazeutische Industrie, ed. Ztc Vdi Technologiezentrum, Wiesbaden: HA Hessen Agentur GmbH, 2006.

/Walsh 2007/

Walsh, Ben, Environmentally Beneficial Nanotechnologies - Barriers and Opportunities, Oakdene Hollins, report for the Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2007.

/Warheit et al. 2004/

Warheit, D. B.; Laurence, B. R.; Reed, K.L., Comparative Pulmonary Toxicity Assessment of Single-wall Carbon Nanotubes in Rats, Toxicological Sciences (2004), Nr. 77, S. 117-125, 2004.

/Warheit et al. 2007/

Warheit, David B.; Webb, Thomas R.; Colvin, Vicki L.; Reed, Kenneth L.; Sayes, Christie M., Pulmonary Bioassay Studies with Nanoscale and Fine-Quartz Particles in Rats: Toxicity is Not Dependent upon Particle Size but on Surface Characteristics, Toxicological Sciences 95 (2007), Nr. 1, S. 270-280, 2007.

/Weiß et al. 2004/

Weiß, Carsten; Eipper, Andreas, Neues leicht fließendes PBT durch Nanotechnologie, PLASTVERARBEITER 55. Jahrg. (2004), Nr. 10, S. 178-180, 2004.

/Weithäuser 2009/

Weithäuser, Marco, Flächen, Rohstoffe und Standorte für die Biogaseinspeisung – aktueller Stand und Perspektive, Deutsches Biomasse-Forschungs-Zentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig, 2009.

/Werner 2008/

Werner, J.H., Charakterisierung von CIS-Solarzellen, Institut für Physikalische Elektronik, Prof. Dr. rer. nat. habil. J.H. Werner, Stuttgart, 2008.

- /Werner et al. 2006/  
Werner, Matthias; Kohly, Wolfram; Simic, Mirjana; Forchert, Carl-Ernst; Rumsch, Wolf-Christian; Klimpel, Veit; Ditfe, Jessica, Nanotechnologien im Automobil - Innovationspotenziale in Hessen für die Automobil- und Zuliefer-Industrie, ed. Nmtc und Inpro, Wiesbaden: HA Hessen Agentur GmbH, 2006.
- /Wevers et al. 2002/  
Wevers, Marcus; Wechsler, D.; Zweck, Axel, Nanobiotechnologie I: Grundlagen und technische Anwendungen molekularer, funktionaler Biosysteme, Düsseldorf: Zukünftige Technologien-Consulting (ZTC) des VDI-Technologiezentrums, 2002.
- /WFU 2007/  
Wfu, Plastic solar cell efficiency breaks record at WFU nanotechnology center, Wake Forest University, News Service, 2007.
- /Wilk 2006/  
Wilk, Andreas, Persönliche Mitteilung vom 18.07.2006.
- /WIPO 2004/  
Wipo, Viscoelastic Coating Paste For Protecting Against Macrofouling And Method For Producing A Coating, World Intellectual Property Organization (WIPO), 2004.
- /Wolf 2011/  
Wolf, Andreas, Die Funktionsweise von Superkondensatoren, EuroTransportMedia Verlags- und Veranstaltungs-GmbH, 2011.
- /Wolf et al. 2005/  
Wolf, Oliver; Crank, Manuela; Patel, Martin; Marscheider-Weidemann, Frank; Schleich, Jachim; Hüsing, Bärbel; Angerer, Gerhard, Techno-economic Feasibility of Largescale Production of Bio-based Polymers in Europe, European Commission EUR 22103 EN, Brüssel, 2005.
- /Württemberg 2011/  
Württemberg, Jens, LEDs für Beleuchtungssysteme Das Fenster zu einem Milliardenmarkt beginnt sich zu öffnen, Elektroniknet.de WEKA Fachmedien GmbH, 2011.
- /Wuttig et al. 2008/  
Wuttig, Matthias; Salinga, Christian, Mit Nanometer dünnen Schichten Kilowattstunden sparen, RWTH- Aachen, Physikalisches Institut, Physik Neuer Materialien, 2008.
- /Yersin 2010/  
Yersin, Hartmut, Neue OLED-Technologien für Flachbildschirme und Beleuchtung, Universität Regensburg, Institut für Physikalische Chemie, Regensburg, 2010.
- /Zahoransky 2009/  
Zahoransky, Richard A., Energietechnik, Vol. 4. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2009.
- /ZDK 2008/  
Zdk, Kraftstoffverbrauch in CO<sub>2</sub>-Ausstoß umrechnen, Zentralverband Deutsches Kraftfahrzeuggewerbe e.V., Artikel des ZDK in der Zeitung "DeutscheHandwerksZeitung" (DHZ), Bad Wörishofen, 2008.
- /Zeiss 2011/  
Zeiss, BMBF-Verbundprojekt zu neuartiger Chipherstellertechnologie – Hauptmeilenstein erfolgreich absolviert, Presseinformation der Carl Zeiss Gruppe, 2011.
- /Zhao et al. 2011/  
Zhao, Xin; Hayner, Cary M.; Kung, Mayfair C.; Kung, Harold H., In-Plane Vacancy-Enabled High-Power Si–Graphene Composite Electrode for Lithium-Ion Batteries, Advanced Engineering Materials (2011), Nr. 1, S. 1079-1084, 2011.

---

/Zimmer et al. 2008/

Zimmer, René; Hertel, Rolf; Böhl, Gaby-Fleur, Public Perceptions about Nanotechnology Representative survey and basic morphological-psychological study Project, Federal Institute for Risk Assessment, (BfR-Wissenschaft 01/2009), Berlin, 2008.

/ZSW 2009/

Zsw, Europa-Rekord beim Wirkungsgrad für CIS-Dünnschicht-Solarzellen, Presseinformation des Zentrums für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), 2009.



## Anhang

**Tabelle A.1:** Energiebedarf und Treibhausgasemissionen von Kunststoffen und Biokunststoffen im Vergleich /Wolf et al. 2005/

Polymer		Energiebedarf [GJ/t]			Treibhausgasemissionen [kg CO <sub>2</sub> äq. /t]		
		Rohstoff	Prozess	Gesamt	Wachstum	Energie / Prozess	Netto
Kunststoffe	HDPE	49	31	80	0	1.700	1.700
	PET	39	38	77	0	4.300	4.300
	PS	48	39	87	--	--	--
	TPS	--	--	25	--	--	1.100
	TPS + 60 %	--	--	52	--	--	3.600
	PCL	--	--	--	--	--	--
	Zellophan	--	--	92	--	--	--
Zelluloseacetat	--	--	89	--	--	--	
Biokunststoffe	PLA (Getreide)	0	48,8	48,8	-2.190	3.390	1.200
	PLA (Bioraffinerie)	0	29,2	29,2	-2.190	1.890	-300
	PHA (Fermentation)	0	81	81	--	--	--
	PHA (Photosynthese)	0	90	90	--	--	--

Tabelle A.2: Bewertung von biotechnologischen Herstellungsverfahren /OECD 2001/

	Energie	Rohstoffe	Luftverschmutzung	Wasserverschmutzung	Betriebskosten
1	=	-75 % (Nicht Erneuerbare)	-50 %	-66 %	-50 %
2			-90 %	-33 %	-90 % (umweltbezogen)
3	Strom + Dampf -		-80 %	-80 %	beträchtliche Reduktion
4	=				-43 %
5					
6	-80 %		-	-	-
7		-	-	-	-54 % (Rohstoffe)
8	-		-		-
9					
10	-70 %				-40 %
11		-50 % (Grundwasser)		-80 %	-30 % (Grundwasser)
12	-15 %	- (Wasser)		-	-9 %
13	-30 bis -40 %				
14					
15					
16		-35 % (CL <sub>2</sub> ) -65 % (ClO <sub>2</sub> ) - (Recycling)		-	
17					
18	-		-		
19					
20					
21				-	erhöhte Produktivität



**Tabelle A.3:** Ausgewählte Beispiele für Einsparpotenziale von Treibhausgasen durch den Einsatz der industriellen Biotechnologie /Buttazzoni 2009/

<b>Nutzen der biotechnologischen Anwendung</b>	<b>Treibhausgasemission durch die Produktion mit Enzymen (Produktion, Transport, Nutzung)</b>	<b>Treibhausgasemissionen durch traditionelle Produktion</b>	<b>Einsparung an Treibhausgasemissionen pro Einheit</b>
<b>Lebensmittelindustrie</b>			
Verlängerte Nutzbarkeit bei Brot			29 - 54 t CO <sub>2</sub> pro Million Brote
Erhöhte Ausbeute bei der Mozzarella-Herstellung			230 kg CO <sub>2</sub> pro t Produkt
Verbesserte Extraktion von Weintrauben für die Rotweinherstellung	0,06 kg CO <sub>2</sub> pro t Wein	120 kg CO <sub>2</sub> pro t Wein	120 kg CO <sub>2</sub> pro t Wein
Malzersatz im Brauprozess	9,1 kg CO <sub>2</sub> pro 100 l Bier	12,5 kg CO <sub>2</sub> pro 100 l Bier	3,4 kg CO <sub>2</sub> pro 100 l Bier
Verbesserte Fischbearbeitung	100 kg CO <sub>2</sub> pro t Fisch	180 kg CO <sub>2</sub> pro t Fisch	80 kg CO <sub>2</sub> pro t Fisch
Verbessertes Schweine- und Hühnerfutter			20 kg CO <sub>2</sub> pro t Futter
<b>Traditionelle Industrien</b>			
Bleichen von Zellstoff	3 kg CO <sub>2</sub> pro kg Zellstoff	40 kg CO <sub>2</sub> pro kg Zellstoff	37 kg CO <sub>2</sub> pro kg Zellstoff
Entschlichten von Textilien	45 kg CO <sub>2</sub> pro t Fasern	910 kg CO <sub>2</sub> pro t Fasern	870 kg CO <sub>2</sub> pro t Fasern
Enzymatisches Bleichen (Fasern, Garn)			400 kg CO <sub>2</sub> pro t Fasern oder Garn
Lederveredelung (Weichen und Enthaaren)	5 kg CO <sub>2</sub> pro t Haut	133 kg CO <sub>2</sub> pro t Haut (Ziege) 194 kg CO <sub>2</sub> pro t Haut (Rind)	128 - 189 kg CO <sub>2</sub> pro t Haut
Geschirrspülmaschinen	5 g CO <sub>2</sub> pro Waschgang	85 g CO <sub>2</sub> pro Waschgang	80 g CO <sub>2</sub> pro Waschgang

**Tabelle A.4:** Ausgewählte Beispiele für Treibhausgaseinsparungen durch biotechnologische Verfahren /Hermann et al. 2007/

Produkt		Treibhausgas-einsparungen [t CO <sub>2</sub> /t]	Weltweit instal-lierte Kapazität [kt/Jahr]	Jährliche Treibhausgas-einsparungen [kt CO <sub>2</sub> /Jahr]
Essigsäure	Bestand	-2,4	8.300	9.570
	Zukünftig	1,2		
Acrylsäure	Zukünftig	1,5	2.900	4.380
Adipinsäure	Bestand	-5,2	2.400	7.880
	Zukünftig	3,3		
Butanol	Bestand	1,2	2.460	3.040
	Zukünftig	3,9		
Caprolactam	Zukünftig	5,2	3.900	20.100
Ethanol	Bestand	2,7	2.600	6.970
	Zukünftig	2,7		
Ethylen	Bestand	1,9	100.000	191.050
	Zukünftig	2,5		
Lysin	Bestand	2,1	640	1.370
	Zukünftig	3,6		
Polymilchsäure (PLA)	Bestand	2,3	11.100 PET	25.150
	Zukünftig	3,3		

**Tabelle A.5:** Ergebniszusammenfassung der Wirkungsgradabschätzungen für Vitamin B<sub>2</sub> (nach dem DSM-Verfahren) /Hoppenheidt et al. 2005/

	Einheit	Biotech. Prozess	Chem.-techn. Prozess	Biotech. Prozess	Chem.-techn. Prozess	Differenz (Bio.-chem.)
		Einwohnerwerte				
<b>Wirkungsgradkategorien, aggregiert</b>						
KEA	GJ	391	590	2,24	3,38	-1,14
Treibhauspotenzial	Mg CO <sub>2</sub> -Äq.	25,0	33,5	2,12	2,84	-0,72
Versauerungspotenzial	kg SO <sub>2</sub> -Äq.	115	229	2,84	5,63	-2,79
Eutrophierungspotenzial (terrestr.)	kg PO <sub>4</sub> -Äq.	11,4	15,2	2,19	2,91	-0,73
Eutrophierungspotenzial (aquat.)	kg PO <sub>4</sub> -Äq.	21,4	5,8	3,85	1,04	2,81
Ozonbildungspotenzial (POCP)	kg Eth-Äq.	8,6	20,3	0,99	2,35	-1,36

**Tabelle A.6:** Ergebniszusammenfassung der Wirkungsgradabschätzungen für Vitamin B<sub>2</sub> (nach dem BASF-Verfahren) /Hoppenheidt et al. 2005/

		<b>Biotech. Prozess</b>	<b>Chem.-techn. Prozess</b>	<b>Biotech. Prozess</b>	<b>Chem.-techn. Prozess</b>	<b>Differenz (Bio.-chem.)</b>
	<b>Einheit</b>			<b>Einwohnerwerte</b>		
<b>Wirkungsgradkategorien, aggregiert</b>						
KEA	GJ	917	973	5,25	5,58	-0,32
Treibhauspotenzial	Mg CO <sub>2</sub> -Äq.	34,8	51,8	2,94	4,39	-1,44
Versauerungspotenzial	kg SO <sub>2</sub> -Äq.	177	557	4,34	13,7	-9,34
Eutrophierungspotenzial (terrestr.)	kg PO <sub>4</sub> -Äq.	12,9	24,5	2,48	4,70	-2,22
Eutrophierungspotenzial (aquat.)	kg PO <sub>4</sub> -Äq.	26,8	10,1	4,85	1,81	3,01
Ozonbildungspotenzial (POCP)	kg Eth-Äq.	8,31	28,7	0,96	3,32	-2,36

**Tabelle A.7:** Ergebniszusammenfassung der Wirkungsgradabschätzungen für Weichen und Äschern /Hoppenheidt et al. 2005/

		<b>Enzym. Prozess</b>	<b>Chem.-techn. Prozess</b>	<b>Enzym. Prozess</b>	<b>Chem.-techn. Prozess</b>	<b>Differenz (Enz.-chem.)</b>
	<b>Einheit</b>			<b>Einwohnerwerte [10<sup>-3</sup>]</b>		
<b>Wirkungsgradkategorien, aggregiert</b>						
KEA	GJ	8,89	10,49	50,9	60,1	-9,15
Treibhauspotenzial	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	703	874	59,6	74,1	-14,51
Versauerungspotenzial	kg SO <sub>2</sub> -Äq.	2,32	3,00	57,0	73,8	-16,77
Eutrophierungspotenzial (terrestr.)	kg PO <sub>4</sub> -Äq.	0,20	0,24	39,0	46,6	-7,62
Eutrophierungspotenzial (aquat.)	kg PO <sub>4</sub> -Äq.	0,37	0,45	67,2	80,1	-12,89
Ozonbildungspotenzial (POCP)	kg Eth-Äq.	0,35	0,35	40,5	40,8	-0,31

**Tabelle A.8:** Ergebniszusammenfassung der Wirkungsgradabschätzungen für Zusatzstoffe bei der Tierproduktion /Hoppenheidt et al. 2005/

	Ohne Zusatz	Probiotika	Seltene Erden	Ohne Zusatz	Probiotika	Seltene Erden	Differenz (Probiotika - ohne Zusatz)	Differenz (Seltene Erden - ohne Zusatz)
Einheit	Einwohnerwerte [ $10^{-5}$ ]							
<b>Wirkungsgradkategorien, aggregiert</b>								
KEA	0,16	0,16	0,16	94,2	89,3	91,8	-4,95	-2,37
Treibhauspotenzial	83,7	79,9	19,0	709	677	669	-31,9	-39,6
Versauerungspotenzial	0,80	0,77	0,75	1976	1897	1848	-78,2	-128
Eutrophierungspotenzial (terrestr.)	0,15	0,14	0,14	2801	2691	2615	-110	-187
Eutrophierungspotenzial (aquat.)	0,0021	0,0021	0,0020	38,2	36,9	35,6	-1,36	-2,69
Ozonbildungspotenzial (POCP)	0,016	0,015	0,015	182	175	172	-7,11	-9,76

**Tabelle A.9:** Ergebniszusammenfassung der Wirkungsgradabschätzungen für enzymhaltige Waschmittel /Hoppenheidt et al. 2005/

	Modernes Waschmittel	Traditionelles Waschmittel	Modernes Waschmittel	Traditionelles Waschmittel	Differenz (Mod.-Trad.)
Einheit	Einwohnerwerte [ $10^{-5}$ ]				
<b>Wirkungsgradkategorien, aggregiert</b>					
KEA	13,36	25,53	7,65	14,63	-6,98
Treibhauspotenzial	0,74	1,57	6,28	13,28	-7,00
Versauerungspotenzial	2,48	5,27	6,08	12,94	-6,86
Eutrophierungspotenzial (terrestr.)	0,18	0,34	3,39	6,50	-3,11
Eutrophierungspotenzial (aquat.)	0,17	5,46	3,01	98,1	-95,1
Ozonbildungspotenzial (POCP)	0,34	0,47	3,90	5,45	-1,55

**Tabelle A.10:** Einsparungen durch ein biotechnologisches Verfahren beim sog. Scouring von Baumwolle /Nielsen et al. 2009/

Material	Einheit	Konventionelles Verfahren	Biotechnologisches Verfahren	Einsparungen
Enzym	kg	-	10	-10
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (27%)	kg	40	-	40
NaOH (100%)	kg	15	-	15
Durchdringungsmittel	kg	10	8	2
Komplexbildner	kg	5	-	5
Essigsäure (98%)	kg	5	0	5
Garn	kg	-	-	25
Dampf	t	3	0,5	2,5
Strom	kWh	300	150	150
Wasser	m <sup>3</sup>	30	10	20

**Tabelle A.11:** LCA Ergebnisse für das Scouring von Baumwolle /Nielsen et al. 2009/

Wirkungskategorie	Einheit	zusätzlich	eingespart
CO <sub>2</sub> eq.	kg	7	1000
SO <sub>2</sub> eq.	g	32	7600
PO <sub>4</sub> eq.	g	11	430
Fossiler Energiebedarf	MJ	93	12000
Landbedarf	m <sup>2</sup>	1	230
Wasser	m <sup>3</sup>	0,1	21

**Tabelle A.12:** Einsparungen durch ein biotechnologisches Verfahren beim Entfernen von Bleichmittelresten /Nielsen et al. 2009/

Material	Einheit	Einsparungen
Enzym	kg	-1
Essigsäure (98%)	kg	-3
Dampf	kg	1820
Strom	kWh	33
Wasser	m <sup>3</sup>	20

**Tabelle A.13:** LCA Ergebnisse für das Entfernen von Bleichmittelresten /Nielsen et al. 2009/

Wirkungskategorie	Einheit	zusätzlich	eingespart
CO <sub>2</sub> eq.	kg	8	420
SO <sub>2</sub> eq.	g	33	600
PO <sub>4</sub> eq.	g	4	55
Fossiler Energiebedarf	MJ	200	5400
Landbedarf	m <sup>2</sup>	0,13	0
Wasser	m <sup>3</sup>	0,02	21

**Tabelle A.14:** Sensitive rohstoffabhängige Zukunftstechnologien mit Relevanz für die Energiewirtschaft /Angerer et al. 2009/

Zukunftstechnologie	Rohstoffe und Werkstoffe	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv
Dünnschicht-Solarzellen Energie- und materialeffiziente Photovoltaik	Halbleiter: Cu, In, Se, Ga, As, Cd, Ge, Si				x		x				x
PEM-Brennstoffzellen für Elektrofahrzeuge Brennstoffzelle als Traktionsstromquelle	Pt	x					x				x
SOFC-Brennstoffzellen für stationäre Anlagen Erzeugung von Strom und Wärme für Gebäude und Blockheizkraftwerke	Feststoffelektrolyt: Y, Zr, Sc, Ga, Ce, Sm, Gd, Ba Elektrode: La, Sr, Mn, Co, Cr, Ru, La, Ni, Pt			x			x				x
Thermoelektrische Energiewandlung Stromgewinnung aus Wärme mit thermoelektrischen Generatoren	Halbleiter: Te, Sb, Ge, Ag, Bi Drähte: Cu Keramikabdeckplatten			x			x				x
Elektrische Traktionsmotoren für Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge Innovative Elektromotoren für Kraftfahrzeuge	Spulen: Cu Magnete: Seltene Erden (Fe-B-Nd, SmCo)				x		x				x
Hybridelektrische Kraftfahrzeuge Autarke Vollhybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeuge mit Netzurückspeisung	Verbrennungsmotor: Stahl, Alu Elektromotor: Cu, Nd, Sm Elektronik: Cu, Si, Sn			x			x				x
LED für Hintergrundbeleuchtung in LCD Displays Quecksilberfreie und energiesparende Displaytechnik	LED: AlGaAs, InGaN, ZnSe Elektrode: W			x					x		x
Weißes LED Herstellung von weißem Licht	Dioden: GaAs, GaInN, AlInGaP, GaN				x		x				x
Sensitive schaltbare Gläser Semitransparente und schaltbare IR-Durchlässigkeit Verschattung/Wärmeschutz bei Fassaden/Fensterglas	Wärmereflexion: AgCl Wärmeschutz: In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Elektrode: ITO, WO <sub>3</sub>		x				x				x



**Tabelle A.15:** Intensive rohstoffabhängige Zukunftstechnologien mit Relevanz für die Energiewirtschaft /Angerer et al. 2009/

Zukunftstechnologie	Rohstoffe und Werkstoffe	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030						
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv			
Solarthermisches Kraftwerke Konzentration der Sonnenenergie mit Parabolrinnen auf ein Wärmeträgerfluid	Spiegel: Al, Ag			x			x					x		
Katalytischer Kraftstoffzusatz Kraftstoffadditiv zur integrierten katalytischen NO <sub>x</sub> -Reduktion	Ce	x						x					x	
Lithium-Ionen-Elektrozitätsspeicher Elektrozitätsspeicher mit höchster Leistungs- und Energiedichte für Fahrzeuge, mobile elektronische Geräte und Powertools	Co, Li							x						x

**Tabelle A.16:** Unkritische rohstoffabhängige Zukunftstechnologien mit Relevanz für die Energiewirtschaft /Angerer et al. 2009/

Zukunftstechnologie	Rohstoffe und Werkstoffe	Stand der Technik 2006				Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030		
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv
Organische Solarzellen Kostengünstige dünne, flexible polymerelektro- nische Solarzelle	Kunststoffe, ZnO <sub>2</sub> , ITO		x				x		x		
Farbstoffsolarzellen Technisch einfaches, kostengünstig im Siebdruck herstellbares Solarmodul	Photovoltaisch aktiver Stoff: Ru auf TiO <sub>2</sub> Elektroden: SnO <sub>2</sub> , ITO, Pt Glas, Ag	x					x		x		
Carbon Capture and Storage Abscheidung von CO <sub>2</sub> bei Verbrennungsprozes- sen und Lagerung	Hochwärmefeste Stähle: Cr, Ni, Co, Mo Prozesschemikalien: Amine Katalysatoren		x				x		x		
Carbon Nanotube (CNT) Wasserstoffspeicher	C	x				x			x		
Carbon Nanotubes (CNT) für Stromleitungen Verlustarme Elektrizitätsübertragung über Kabel aus Kohlenstoffnanoröhren	C	x				x			x		
Höchste Hochtemperatur-Supraleiter	Y-Ca-Cu-O, Bi-Sr-Ca-Cuprat, Tl-Ba-Ca- Cuprat, Hg-Ba-Ca-Cuprat		x				x		x		
Superkondensatoren zur Traktionsunterstützung für Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfah- zeuge, Pufferung von Elektrizität und schnelle Entladung bei Dynamikspitzen im Fahrbetrieb	C, Kohlenstoff-Aerogele, Ta, Al, Ti, Kunststoffe, organische Lösungsmittel		x				x		x		
Organische Leuchtdioden OLED Polytronische energieeffiziente organische Leuchtdioden für Beleuchtung und Displays	Kunststoffe, ITO, Ba, Ru, Mg, Ag, Glas				x		x		x		



Fortsetzung von **Tabelle A.16:** Unkritische rohstoffabhängige Zukunftstechnologien mit Relevanz für die Energiewirtschaft /Angerer et al. 2009/

Zukunftstechnologie	Rohstoffe und Werkstoffe	Stand der Technik 2006				Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	
Fermentative industrielle Ethanolgewinnung aus verholzter Biomasse Enzymatischer Aufschluss von Lignozellulose für die Herstellung von Ethanol-Kraftstoff und Chemieprodukten	Rostfreier Stahl (Fe, Cr, Ni, Co)			x			x			x		
Biokatalyse in der Bionik Enzymatisch gesteuerte Prozesse zur CO <sub>2</sub> -Fixierung und photosynthetischen Wasserstoffzeug	Behälter: Stahl, Cr, Cu	x					x				x	

**Tabelle A.17:** Anwendungen, Branchen und Marktvolumen von Plattformchemikalien mit besonderem Substitutionspotenzial für erdölbasierte Stoffe /Grimm et al. 2011/

Name	Anwendung	Branchen	Marktvolumen	
			2008	2020
Bernsteinsäure	Geschmacksverstärker Lösungsmittel Antibiotika Weichmacher Parfümherstellung Polyesterharz	Forschung und Entwicklung Gesundheitswirtschaft Chemie und Pharmazie Lederindustrie Ernährung Handel	Weltweit: 30.000 t/a	Weltweit: 180.000 t/a
1,4-Butandiol	Lösungsmittel Feuchthaltemittel Glycerinersatz Harz für Coatings Plastik	Bauwirtschaft Forschung und Entwicklung Gesundheitswirtschaft Lederindustrie Automobilindustrie	ca. 1,3 Mio. t/a BASF: 575.000 t/a	Nordamerikanischer Markt: 860.000 t/a
Fumarsäure	Lebensmittelzusatzstoff Säuerungsmittel Konservierungsmittel Komponente zur Herstellung von Polyesterharzen	Lebensmittelbranche Gesundheitswirtschaft Chemie und Pharmazie Automobilindustrie Bauwirtschaft Holz- und Möbelindustrie	Weltweit: 12.000 t/a bis 203.000 t/a	Keine Angaben
2,5-Furan-Dicarboxylsäure	Nylon Polyester Polyamide	Handel Chemie und Pharmazie Lederindustrie	Weltweit: 2,27 Mio t/a	Weltweit: 4 Mio t/a
Glutaminsäure	Lebensmittelzusatzstoff Geschmacksverstärker (Glutamat)	Gesundheitswirtschaft Chemie und Pharmazie Land- und Forstwirtschaft Ernährung Lederindustrie	Weltweit: 1,5 Mio t/a	Weltweit: 1,8 Mio. t/a

Fortsetzung von **Tabelle A.17**: Anwendungen, Branchen und Marktvolumen von Plattformchemikalien mit besonderem Substitutionspotenzial für erdölba-sierte Stoffe /Grimm et al. 2011/

Name	Anwendung	Branchen	Marktvolumen	
			2008	2020
3-Hydroxypropionsäure	Polymere (Polyester) Spezialchemikalien Coatings Plastikschaum Acrylfaser Konservierungsstoff (Lebensmit- tel)	Grundstücks- und Wohnungs- wesen Holz- und Möbelindustrie Kunststoff und Gummi Entsorgung und Recycling Lederindustrie Handel Nahrungsmittel	Keine Angaben	Keine Angaben
Milchsäureethylester	Lösungsmittel	Automobilindustrie Handwerk Kunststoff und Gummi	Weltweit: 91.000 t/a USA: 3.600 t/a	Weltweit: 107.500 t/a USA: 4.500 t/a
Polyhydroxyalkanoat (PHA)	Verpackungen Elastomere Biokunststoffe	Automobilindustrie Bauwirtschaft Gesundheitswirtschaft Handwerk Chemie und Pharmazie Ernährung	Weltweit: 80.000 t/a	Weltweit: 442.000 t/a
Polymilchsäure (PLA)	Verpackungen Gartenwerkzeug Chirurgisches Nahtmaterial Implantate	Bauwirtschaft Forschung und Entwicklung Gesundheitswirtschaft Chemie und Pharmazie Land- und Forstwirtschaft	USA: 229.000 t/a	USA: 3.600.000 t/a



Fortsetzung von **Tabelle A.17**: Anwendungen, Branchen und Marktvolumen von Plattformchemikalien mit besonderem Substitutionspotenzial für erdölba-sierte Stoffe /Grimm et al. 2011/

Name	Anwendung	Branchen	Marktvolumen	
			2008	2020
1,3-Propandiol	Kosmetik Lebensmittel Schmiermittel Treibstoffzusatz Farben und Lacke Polymer-Additiv (z. B. Polyurethane) Polyester	Automobilindustrie Kunststoff Nahrungsmittel Bauwirtschaft Handwerk Holz- und Möbelindustrie Lederindustrie	Weltweit: 80.000 t/a USA: 4.500 t/a	Weltweit 227.000 t/a
Tetrahydrofuran	Lösungsmittel (Harz, Plastik, Kleber) Inhaltsstoff in Kleber und Tinte	Feinmechanik und Optik Handel Holz- und Möbelindustrie Lederindustrie	Weltweit: 210.000 t/a	Weltweit: 250.000 t/a

**Tabelle A.18:** Herstellungsverfahren von Plattformchemikalien mit besonderem Substitutionspotenzial für erdölbasierte Stoffe /Grimm et al. 2011/

Name	Herstellungsverfahren	
	konventionell	biotechnologisch
Bernsteinsäure	katalytische Hydrierung von Maleinsäure bzw. Maleinsäureanhydrid	- erste Pilotanlagen: a) Fermentation von Fumarsäure durch Schimmelpilze ( <i>Aspergillus succinoproducens</i> ) b) Fermentation verschiedener Substrate durch angepasste (Metabolic Engineering) Bakterien, wie z. B. <i>Escherichia coli</i> , <i>Actinobacillus succinogenes</i> , <i>Corynebacterium glutamicum</i> oder <i>Anaerobiospirillum succiniciproducens</i>  - im Labormaßstab realisiert: a) Acetoxylierung von Butadien b) Oxidation von Butan zu Maleinanhydrid → Hydrierung c) Hydroformulierung von Allylalkohol d) Epoxidation von Butadien e) Biobasierte Bernsteinsäure → Butandiol f) Mischung aus 2-Pyrrolidon und N-Methylpyrrolidon  - erste Pilotanlagen: a) Fermentative Produktion von biobasierter Bernsteinsäure/Fumarsäure → katalytische Reduktion zu 1,4-Butandiol b) Fermentation von Zucker durch genmodifizierte <i>E. coli.</i> , Pilotanlage von Genomatica in San Diego, USA
1,4-Butandiol	Seit 1930: Reppe-Synthese über Acetylen, Hydrierung von Maleinsäureanhydrid, Hydrierung von 2-Butin-1,4-diol mittels Katalysator	
Fumarsäure	Thermische oder katalytische Isomerisierung von Maleinsäure (Katalysator Thiourea)	- in der industriellen Umsetzung: Fermentation von Glucose mit den Pilzen <i>Rhizopus arrhizus</i> oder <i>Mucor aspergillus</i> (Prozess bereits in den 1940er Jahren entdeckt, hohe Produktionskosten und niedrige Öl-Preise machten diesen Syntheseweg lange Zeit unattraktiv. Ab einem Öl-Preis von über 61 USD/Barrel gilt der fermentative Weg als wettbewerbsfähig)
2,5-Furan-Dicarboxylsäure	Oxidation von 2,5-substituierten Furanen oder katalytisch	- im Labormaßstab realisiert: Enzymatische Produktion - in der industriellen Umsetzung: Oxidative Dehydratisierung von Glucose → Hydroxymethylfurfural (HMF)
Glutaminsäure		- in der industriellen Umsetzung: Fermentation von Melasse oder Glucose (die Herstellung erfolgt seit den 1960er Jahren fast ausschließlich fermentativ; Bedarf stark steigend)

Fortsetzung von **Tabelle A.18:** Herstellungsverfahren von Plattformchemikalien mit besonderem Substitutionspotenzial für erdölbasierte Stoffe /Grimm et al. 2011/

Name	Herstellungsverfahren	
	konventionell	biotechnologisch
3-Hydroxypropionsäure	Synthese aus Acrolein (DuPont/Degussa) oder Hydroformylierung von Ethylenoxid (Shell). Stark steigende Ölpreise und fallende Glycerin-Preise machen die konventionellen Verfahren immer unattraktiver	<ul style="list-style-type: none"> <li>- im Labormaßstab realisiert: Fermentation von Glycerin zu 3-Hydroxypropionaldehyd</li> <li>- in der industriellen Umsetzung: Fermentation von Glucose (DuPont/Genecor, Cargill)</li> </ul>
Milchsäureethylester		<ul style="list-style-type: none"> <li>- in der industriellen Umsetzung:               <ol style="list-style-type: none"> <li>a) Veresterung von Milchsäure mit Ethanol</li> <li>b) Vertec Biosolvents verwendet Milchsäureethylester, Limonen und Fettsäuremethylester (Sojaölbasis) in seinen Produkten VertecBio Gold und VertecBio Citrus. Diese Lösungsmittel bieten eine umweltfreundliche Alternative zu herkömmlichen fossilen Lösungsmitteln (zum Beispiel Methylenchlorid, Methylethylketon, N-Methyl-pyrrolidon)</li> </ol> </li> <li>- im Labormaßstab realisiert:               <ol style="list-style-type: none"> <li>a) Bakterielle Fermentation von Glucose</li> <li>b) Monsanto und andere Firmen untersuchen die direkte Polymer-Produktion in der Pflanze. Zusätzlich wird daran gearbeitet PHBV (= Poly(3-Hydroxybutyrat-co-3-hydroxyvalerat)) mit solchen Organismen zu produzieren, die Mehrfachzucker aus weniger reinen Biomassequellen herstellen können.                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- erste Pilotanlagen:                       <ol style="list-style-type: none"> <li>a) Metabolix und Procter &amp; Gamble verwenden rekombinante Bakterienstämme (Escherichia coli) zur Fermentation von Glucose.</li> <li>- in der industriellen Umsetzung:                           <ol style="list-style-type: none"> <li>a) Metabolix betreibt seit 2010 eine 50 kt-Anlage in Iowa, Vertrieb unter den Markennamen Tired.</li> <li>b) Tianjin Bio Green /DSM hat in 2009 eine Anlage in China eröffnet, 10.000 t/Jahr</li> </ol> </li> </ol> </li> </ul></li></ol> </li> </ul>
Polyhydroxyalkanoat (PHA)		

Fortsetzung von **Tabelle A.18:** Herstellungsverfahren von Plattformchemikalien mit besonderem Substitutionspotenzial für erdölbasierte Stoffe /Grimm et al. 2011/

Name	Herstellungsverfahren	
	konventionell	biotechnologisch
Polymilchsäure (PLA)		<p>-erste Pilotanlagen:</p> <p>a) in Guben: große PLA-Anlage unter Beteiligung der Uhde GmbH und Pyramid Bioplastic mit einer Kapazität von 60 kt</p> <p>- in der industriellen Umsetzung:</p> <p>a) Milchsäure → Polymerisation zur Polymilchsäure oder Veresterung von Lactid mit Alkohol</p> <p>b) Im April 2002 wurde die erste Anlage zur Produktion von PLA im großtechnischen Maßstab in Blair (Nebraska) von NatureWorks in Betrieb genommen. Die Anlage hat eine heutige Kapazität von ca. 140.000 Tonnen PLA.</p> <p>c) Biomer, eine biotechnologische Firma in Krailling, Deutschland hat begonnen, Polylactid in kleinen Mengen kommerziell zu produzieren. Das Produkt wird für durchsichtige Verpackungsfilme und andere spezielle Materialien verwendet.</p> <p>d) Seit 1998 baut Toyota Bioplastik-Bauteile in die Fahrzeugmodelle Prius und Raum ein.</p> <p>e) Futerro (50/50 Joint Venture zwischen Total Petrochemicals und Galactic) hat in Escanaffles/Belgien seine erste Anlage zur Herstellung von (PLA)- Biokunststoffen in Betrieb genommen. Kapazität: 1.500 t/a</p>

Fortsetzung von **Tabelle A.18:** Herstellungsverfahren von Plattformchemikalien mit besonderem Substitutionspotenzial für erdölbasierte Stoffe /Grimm et al. 2011/

Name	Herstellungsverfahren	
	konventionell	biotechnologisch
1,3-Propandiol	<p>Katalytische Oxidation Ethylenoxid → Hydroxypropionaldehyd → Hydrierung → 1,3-Propandiol (Shell) oder aus Acrolein (Degussa/Dupont)</p>	<p>- im Labormaßstab realisiert: a) Bakterielle Fermentation von Glycerin Genencor International und DuPont haben eine Methode entwickelt, auf metabolischem Weg (<i>E. coli</i>) aus Glucose kostengünstig 1,3-Propandiol herzustellen. b) Glycerin → Biokonversion mittels <i>Clostridium butyricum</i> → Malonsäure c) Glucose → Fermentation in Mischkultur d) Glucose → 2-Phasen-Fermentation mit Mikroorganismen - erste Pilotanlagen: a) DuPont, Genencor und Tate &amp; Lyle haben einen rekombinanten Produktionsorganismus (Bio-Propandiol) und einen Fermentationsprozess aus Glucose (Mais) entwickelt. Dieses Verfahren wird seit 2000 in Decatur, Illinois angewandt. b) MeTabolic EXplorer baut erste Pilotanlage in Clermont Ferrand, France, für die 1,3-PDO Synthese via Fermentation von Glucose. Eine Anlage in Asien (50.000 t/a) ist in Planung - in der industriellen Umsetzung: Seit 2006 wird 1,3-Propandiol als Ausgangsstoff für die Kunststoffherstellung (Sorona) ausschließlich biotechnologisch in Loudon (Tennessee, USA) durch Kornhydrolyse produziert (Kapazität: 45,000 t/a). Eine Erweiterung der Anlage um 35 % in 2011 ist geplant</p>
Tetrahydrofuran	Cyclodehydrierung von 1,4-Butandiol	<p>- im Labormaßstab realisiert: a) Katalytische Reduktion von Succinylsäure → 1,4-Butandiol → Zyklisierung b) Katalytische Hydrierung von Fumarsäure c) Furan → Decarbonylierung von Furfural → katalytische Hydrierung</p>





## **Forschungsberichte des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung**

Bezugsadresse:                   Universität Stuttgart  
                                          Institut für Energiewirtschaft  
                                          und Rationelle Energieanwendung  
                                          - Bibliothek -  
                                          D-70550 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 87861  
Fax: 0711 / 685 87873  
E-Mail: bib@ier.uni-stuttgart.de

Bestellungen sind auch über Internet möglich:  
<http://www.ier.uni-stuttgart.de>

- Band 111      J. Lambauer  
**Auswirkungen von Basisinnovationen auf die Energiewirtschaft und die Energienachfrage in Deutschland - Am Beispiel der Nano- und Biotechnologie**  
März 2013, 303 Seiten, 15 €
- Band 110      R. Barth  
**Ökonomische und technisch-betriebliche Auswirkungen verteilter Elektrizitätserzeugung in Verteilungsnetzen – eine modellgestützte Analyse am Beispiel eines Mittelspannungsnetzes**  
März 2013, 234 Seiten, 15 €
- Band 109      D. Bruchof  
**Energiewirtschaftliche Verkehrsstrategie - Möglichkeiten und Grenzen alternativer Kraftstoffe und Antriebe in Deutschland und der EU-27**  
März 2012, 226 Seiten, 15 €
- Band 108      E. D. Özdemir  
**The Future Role of Alternative Powertrains and Fuels in the German Transport Sector - A model based scenario analysis with respect to technical, economic and environmental aspects with a focus on road transport**  
Januar 2012, 194 Seiten, 15 €
- Band 107      U. Kugler  
**Straßenverkehrsemissionen in Europa - Emissionsberechnung und Bewertung von Minderungsmaßnahmen**  
Januar 2012, 236 Seiten, 15 €
- Band 106      M. Blesl, D. Bruchof, U. Fahl, T. Kober, R. Kuder, B. Götz, A. Voß  
**Integrierte Szenarioanalysen zu Energie- und Klimaschutzstrategien in Deutschland in einem Post-Kyoto-Regime**  
Februar 2011, 200 Seiten, 15 €

- Band 105 O. Mayer-Spohn  
**Parametrised Life Cycle Assessment of Electricity Generation in Hard-Coal-Fuelled Power Plants with Carbon Capture and Storage**  
Dezember 2009, 210 Seiten, 15 €
- Band 104 A. König  
**Ganzheitliche Analyse und Bewertung konkurrierender energetischer Nutzungspfade für Biomasse im Energiesystem Deutschland bis zum Jahr 2030**  
Juli 2009, 194 Seiten, 15 €
- Band 103 C. Kruck  
**Integration einer Stromerzeugung aus Windenergie und Speichersystemen unter besonderer Berücksichtigung von Druckluft-Speicherkraftwerken**  
Mai 2008, 162 Seiten, 13 €
- Band 102 U. Fahl, B. Rühle, M. Blesl, I. Ellersdorfer, L. Eltrop, D.-C. Harlinghausen, R. Küster, T. Rehl, U. Remme, A. Voß  
**Energieprognose Bayern 2030**  
Oktober 2007, 296 Seiten, 18 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 101 U. Remme, M. Blesl, U. Fahl  
**Global resources and energy trade: An overview for coal, natural gas, oil and uranium**  
Juli 2007, 108 Seiten, 10 €
- Band 100 S. Eckardt  
**Energie- und Umweltmanagement in Hotels und Gaststätten: Entwicklung eines Softwaretools zur systematischen Prozessanalyse und Managementunterstützung**  
Mai 2007, 152 Seiten, 13 €
- Band 99 U. Remme  
**Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland: Sensitivitätsanalysen mit einem linearen Optimierungsmodell**  
August 2006, 336 Seiten, 20 €
- Band 98 L. Eltrop, J. Moerschner, M. Härdtlein, A. König  
**Bilanz und Perspektiven der Holzenergienutzung in Baden-Württemberg**  
Mai 2006, 102 Seiten, 10 €
- Band 97 B. Frey  
**Modellierung systemübergreifender Energie- und Kohlenstoffbilanzen in Entwicklungsländern**  
Mai 2006, 148 Seiten, 13 €
- Band 96 K. Sander  
**Potenziale und Perspektiven stationärer Brennstoffzellen**  
Juni 2004, 256 Seiten, 18 €

- Band 95 M. A. dos Santos Bernardes  
**Technische, ökonomische und ökologische Analyse von Aufwindkraftwerken**  
März 2004, 228 Seiten, 15 €
- Band 94 J. Bagemihl  
**Optimierung eines Portfolios mit hydro-thermischem Kraftwerkspark im börslichen Strom- und Gasterminmarkt**  
Februar 2003, 138 Seiten, 10 €
- Band 93 A. Stuible  
**Ein Verfahren zur graphentheoretischen Dekomposition und algebraischen Reduktion von komplexen Energiesystemmodellen**  
November 2002, 156 Seiten, 13 €
- Band 92 M. Blesl  
**Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs**  
August 2002, 282 Seiten, 18 €
- Band 91 S. Briem, M. Blesl, M. A. dos Santos Bernardes, U. Fahl, W. Krewitt, M. Nill, S. Rath-Nagel, A. Voß  
**Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden-Württemberg**  
August 2002, 138 Seiten, 10 €
- Band 90 B. Frey, M. Neubauer  
**Energy Supply for Three Cities in Southern Africa**  
Juli 2002, 96 Seiten, 8 €
- Band 89 A. Heinz, R. Hartmann, G. Hitzler, G. Baumbach  
**Wissenschaftliche Begleitung der Betriebsphase der mit Rapsölmethylester befeuerten Energieversorgungsanlage des Deutschen Bundestages in Berlin**  
Juli 2002, 212 Seiten, 15 €
- Band 88 M. Sawillion  
**Aufbereitung der Energiebedarfsdaten und Einsatzanalysen zur Auslegung von Blockheizkraftwerken**  
Juli 2002, 136 Seiten, 10 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 87 T. Marheineke  
**Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken**  
Juli 2002, 222 Seiten, 15 €
- Band 86 B. Leven, C. Hoeck, C. Schaefer, C. Weber, A. Voß  
**Innovationen und Energiebedarf - Analyse ausgewählter Technologien und Branchen mit dem Schwerpunkt Stromnachfrage**  
Juni 2002, 224 Seiten, 15 €

- Band 85 E. Laege  
**Entwicklung des Energiesektors im Spannungsfeld von Klimaschutz und Ökonomie - Eine modellgestützte Systemanalyse**  
Januar 2002, 254 Seiten, 15 €
- Band 84 S. Molt  
**Entwicklung eines Instrumentes zur Lösung großer energiesystem-analytischer Optimierungsprobleme durch Dekomposition und verteilte Berechnung**  
Oktober 2001, 166 Seiten, 13 €
- Band 83 D. Hartmann  
**Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung aus regenerativen Energien**  
September 2001, 228 Seiten, 15 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 82 G. Kühner  
**Ein kosteneffizientes Verfahren für die entscheidungsunterstützende Umweltanalyse von Betrieben**  
September 2001, 210 Seiten, 15 €
- Band 81 I. Ellersdorfer, H. Specht, U. Fahl, A. Voß  
**Wettbewerb und Energieversorgungsstrukturen der Zukunft**  
August 2001, 172 Seiten, 13 €
- Band 80 B. Leven, J. Neubarth, C. Weber  
**Ökonomische und ökologische Bewertung der elektrischen Wärmepumpe im Vergleich zu anderen Heizungssystemen**  
Mai 2001, 166 Seiten, 13 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 79 R. Krüger, U. Fahl, J. Bagemihl, D. Herrmann  
**Perspektiven von Wasserstoff als Kraftstoff im öffentlichen Straßenpersonenverkehr von Ballungsgebieten und von Baden-Württemberg**  
April 2001, 142 Seiten, 13 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 78 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (eds.)  
**Biogenic Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in Europe**  
Februar 2001, 248 Seiten, 15 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 77 W. Rüffler  
**Integrierte Ressourcenplanung für Baden-Württemberg**  
Januar 2001, 284 Seiten, 18 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 76 S. Rivas  
**Ein agro-ökologisches regionalisiertes Modell zur Analyse des Brennholzversorgungssystems in Entwicklungsländern**  
Januar 2001, 200 Seiten, 15 € (*z. Zt. vergriffen*)

- Band 75 M. Härdtlein  
**Ansatz zur Operationalisierung ökologischer Aspekte von "Nachhaltigkeit" am Beispiel der Produktion und Nutzung von Triticale (×*Triticosecale* Wittmack)-Ganzpflanzen unter besonderer Berücksichtigung der luftgetragenen N-Freisetzungen**  
 September 2000, 168 Seiten, 13 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 74 T. Marheineke, W. Krewitt, J. Neubarth, R. Friedrich, A. Voß  
**Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken**  
 August 2000, 118 Seiten, 10 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 73 J. Sontow  
**Energiewirtschaftliche Analyse einer großtechnischen Windstromerzeugung**  
 Juli 2000, 242 Seiten, 15 €
- Band 72 H. Hermes  
**Analysen zur Umsetzung rationeller Energieanwendung in kleinen und mittleren Unternehmen des Kleinverbrauchersektors**  
 Juli 2000, 188 Seiten, 15 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 71 C. Schaefer, C. Weber, H. Voss-Uhlenbrock, A. Schuler, F. Oosterhuis, E. Nieuwlaar, R. Angioletti, E. Kjellsson, S. Leth-Petersen, M. Togeby, J. Munksgaard  
**Effective Policy Instruments for Energy Efficiency in Residential Space Heating - an International Empirical Analysis (EPISODE)**  
 Juni 2000, 146 Seiten, 13 €
- Band 70 U. Fahl, J. Baur, I. Ellersdorfer, D. Herrmann, C. Hoeck, U. Remme, H. Specht, T. Steidle, A. Stuible, A. Voß  
**Energieverbrauchsprognose für Bayern**  
 Mai 2000, 240 Seiten, 15 €  
 Kurzfassung, 46 Seiten, 5 €
- Band 69 J. Baur  
**Verfahren zur Bestimmung optimaler Versorgungsstrukturen für die Elektrifizierung ländlicher Gebiete in Entwicklungsländern**  
 Mai 2000, 154 Seiten, 13 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 68 G. Weinrebe  
**Technische, ökologische und ökonomische Analyse von solarthermischen Turmkraftwerken**  
 April 2000, 212 Seiten, 15 €
- Band 67 C.-O. Wene, A. Voß, T. Fried (eds.)  
**Experience Curves for Policy Making - The Case of Energy Technologies**  
 April 2000, 282 Seiten, 18 €

- Band 66 A. Schuler  
**Entwicklung eines Modells zur Analyse des Endenergieeinsatzes in Baden-Württemberg**  
 März 2000, 236 Seiten, 15 €
- Band 65 A. Schäfer  
**Reduction of CO<sub>2</sub>-Emissions in the Global Transportation Sector**  
 März 2000, 290 Seiten, 18 €
- Band 64 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (eds.)  
**Biogenic Emissions of Greenhouse Gases Caused by Arable and Animal Agriculture - Processes, Inventories, Mitigation -**  
 März 2000, 148 Seiten, 13 €
- Band 63 A. Heinz, R. Stülpnagel, M. Kaltschmitt, K. Scheffer, D. Jezierska  
**Feucht- und Trockengutlinien zur Energiegewinnung aus biogenen Festbrennstoffen. Vergleich anhand von Energie- und Emissionsbilanzen sowie anhand der Kosten**  
 Dezember 1999, 308 Seiten, 20 €
- Band 62 U. Fahl, M. Blesl, D. Herrmann, C. Kemfert, U. Remme, H. Specht, A. Voß  
**Bedeutung der Kernenergie für die Energiewirtschaft in Baden-Württemberg - Auswirkungen eines Kernenergieausstiegs**  
 November 1999, 146 Seiten, 13 €
- Band 61 A. Greßmann, M. Sawillion, W. Krewitt, R. Friedrich  
**Vergleich der externen Effekte von KWK-Anlagen mit Anlagen zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme**  
 September 1999, 138 Seiten, 10 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 60 R. Lux  
**Auswirkungen fluktuierender Einspeisung auf die Stromerzeugung konventioneller Kraftwerkssysteme**  
 September 1999, 162 Seiten, 13 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 59 M. Kayser  
**Energetische Nutzung hydrothormaler Erdwärmevorkommen in Deutschland - Eine energiewirtschaftliche Analyse -**  
 Juli 1999, 184 Seiten, 15 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 58 C. John  
**Emissionen von Luftverunreinigungen aus dem Straßenverkehr in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung - Untersuchung von Emissions-szenarien am Beispiel Baden-Württembergs**  
 Juni 1999, 214 Seiten, 15 €
- Band 57 T. Stelzer  
**Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen - Lebensweg-analysen von Umweltwirkungen**  
 Mai 1999, 212 Seiten, 15 € (*z. Zt. vergriffen*)



- Band 56 R. Lux, J. Sontow, A. Voß  
**Systemtechnische Analyse der Auswirkungen einer windtechnischen Stromerzeugung auf den konventionellen Kraftwerkspark**  
 Mai 1999, 322 Seiten, 20 € (z. Zt. vergriffen)  
 Kurzfassung, 48 Seiten, 5 €
- Band 55 B. Biffar  
**Messung und Synthese von Wärmelastgängen in der Energieanalyse**  
 Mai 1999, 236 Seiten, 15 €
- Band 54 E. Fleißner  
**Statistische Methoden der Energiebedarfsanalyse im Kleinverbrauchersektor**  
 Januar 1999, 306 Seiten, 20 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 53 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (Hrsg.)  
**Approaches to Greenhouse Gas Inventories of Biogenic Sources in Agriculture**  
 Januar 1999, 252 Seiten, 18 €
- Band 52 J. Haug, B. Gebhardt, C. Weber, M. van Wees, U. Fahl, J. Adnot, L. Cauret, A. Pierru, F. Lantz, J.-W. Bode, J. Vis, A. van Wijk, D. Staniaszek, Z. Zavody  
**Evaluation and Comparison of Utility's and Governmental DSM-Programmes for the Promotion of Condensing Boilers**  
 Oktober 1998, 156 Seiten, 13 €
- Band 51 M. Blesl, A. Schweiker, C. Schlenzig  
**Erweiterung der Analysemöglichkeiten von NetWork - Der Netzwerkkeditor**  
 September 1998, 112 Seiten, 10 €
- Band 50 S. Becher  
**Biogene Festbrennstoffe als Substitut für fossile Brennstoffe - Energie- und Emissionsbilanzen**  
 Juli 1998, 200 Seiten, 15 €
- Band 49 P. Schaumann, M. Blesl, C. Böhringer, U. Fahl, R. Kühner, E. Läge, S. Molt, C. Schlenzig, A. Stuible, A. Voß  
**Einbindung des ECOLOG-Modells 'E<sup>3</sup>Net' und Integration neuer methodischer Ansätze in das IKARUS-Instrumentarium (ECOLOG II)**  
 Juli 1998, 110 Seiten, 10 €
- Band 48 G. Poltermann, S. Berret  
**ISO 14000ff und Öko-Audit - Methodik und Umsetzung**  
 März 1998, 184 Seiten, 15 €
- Band 47 C. Schlenzig  
**PlaNet: Ein entscheidungsunterstützendes System für die Energie- und Umweltplanung**  
 Januar 1998, 230 Seiten, 15 €

- Band 46 R. Friedrich, P. Bickel, W. Krewitt (Hrsg.)  
**External Costs of Transport**  
April 1998, 144 Seiten, 13 €
- Band 45 H.-D. Hermes, E. Thöne, A. Voß, H. Desprez, G. Weimann, G. Kamelander, C. Ureta  
**Tools for the Dissemination and Realization of Rational Use of Energy in Small and Medium Enterprises**  
Januar 1998, 352 Seiten, 20 €
- Band 44 C. Weber, A. Schuler, B. Gebhardt, H.-D. Hermes, U. Fahl, A. Voß  
**Grundlagenuntersuchungen zum Energiebedarf und seinen Bestimmungsfaktoren**  
Dezember 1997, 186 Seiten, 15 €
- Band 43 J. Albiger  
**Integrierte Ressourcenplanung in der Energiewirtschaft mit Ansätzen aus der Kraftwerkseinsatzplanung**  
November 1997, 168 Seiten, 13 €
- Band 42 P. Berner  
**Maßnahmen zur Minderung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aus der Lackanwendung - Vergleich zwischen Abluftreinigung und primären Maßnahmen am Beispiel Baden-Württembergs**  
November 1997, 238 Seiten, 15 €
- Band 41 J. Haug, M. Sawillion, U. Fahl, A. Voß, R. Werner, K. Weiß, J. Rösch, W. Wölfle  
**Analysis of Impediments to the Rational Use of Energy in the Public Sector and Implementation of Third Party Financing Strategies to improve Energy Efficiency**  
August 1997, 122 Seiten, 10 €
- Band 40 U. Fahl, R. Krüger, E. Läge, W. Ruffler, P. Schaumann, A. Voß  
**Kostenvergleich verschiedener CO<sub>2</sub>-Minderungsmaßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland**  
August 1997, 156 Seiten, 13 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 39 M. Sawillion, B. Biffar, K. Hufendiek, R. Lux, E. Thöne  
**MOSAIK - Ein EDV-Instrument zur Energieberatung von Gewerbe und mittelständischer Industrie**  
Juli 1997, 172 Seiten, 13 €
- Band 38 M. Kaltschmitt  
**Systemtechnische und energiewirtschaftliche Analyse der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland**  
April 1997, 108 Seiten, 10 €

- Band 37 C. Böhringer, T. Rutherford, A. Pahlke, U. Fahl, A. Voß  
**Volkswirtschaftliche Effekte einer Umstrukturierung des deutschen Steuersystems unter besonderer Berücksichtigung von Umweltsteuern**  
 März 1997, 82 Seiten, 8 €
- Band 36 P. Schaumann  
**Klimaverträgliche Wege der Entwicklung der deutschen Strom- und Fernwärmeversorgung - Systemanalyse mit einem regionalisierten Energiemodell -**  
 Januar 1997, 282 Seiten, 18 €
- Band 35 R. Kühner  
**Ein verallgemeinertes Schema zur Bildung mathematischer Modelle energiewirtschaftlicher Systeme**  
 Dezember 1996, 262 Seiten, 18 €
- Band 34 U. Fahl, P. Schaumann  
**Energie und Klima als Optimierungsproblem am Beispiel Niedersachsen**  
 November 1996, 124 Seiten, 10 €
- Band 33 W. Krewitt  
**Quantifizierung und Vergleich der Gesundheitsrisiken verschiedener Stromerzeugungssysteme**  
 November 1996, 196 Seiten, 15 €
- Band 32 C. Weber, B. Gebhardt, A. Schuler, T. Schulze, U. Fahl, A. Voß, A. Perrels, W. van Arkel, W. Pellekaan, M. O'Connor, E. Schenk, G. Ryan  
**Consumers' Lifestyles and Pollutant Emissions**  
 September 1996, 118 Seiten, 10 €
- Band 31 W. Rüdfler, A. Schuler, U. Fahl, H.W. Balandynowicz, A. Voß  
**Szenariorechnungen für das Projekt *Klimaverträgliche Energieversorgung in Baden-Württemberg***  
 Juli 1996, 140 Seiten, 13 €
- Band 30 C. Weber, B. Gebhardt, A. Schuler, U. Fahl, A. Voß  
**Energy Consumption and Air-Borne Emissions in a Consumer Perspective**  
 September 1996, 264 Seiten, 18 €
- Band 29 M. Hanselmann  
**Entwicklung eines Programmsystems zur Optimierung der Fahrweise von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen**  
 August 1996, 138 Seiten, 13 €
- Band 28 G. Schmid  
**Die technisch-ökonomische Bewertung von Emissionsminderungsstrategien mit Hilfe von Energiemodellen**  
 August 1996, 184 Seiten, 15 €

- Band 27 A. Obermeier, J. Seier, C. John, P. Berner, R. Friedrich  
**TRACT: Erstellung einer Emissionsdatenbasis für TRACT**  
August 1996, 172 Seiten, 13 €
- Band 26 T. Hellwig  
**OMNIUM - Ein Verfahren zur Optimierung der Abwärmenutzung in Industriebetrieben**  
Mai 1998, 118 Seiten, 10 €
- Band 25 R. Laing  
**CAREAIR - ein EDV-gestütztes Instrumentarium zur Untersuchung von Emissionsminderungsstrategien für Dritte-Welt-Länder dargestellt am Beispiel Nigerias**  
Februar 1996, 221 Seiten, 20 €
- Band 24 P. Mayerhofer, W. Krewitt, A. Trukenmüller, A. Greßmann, P. Bickel, R. Friedrich  
**Externe Kosten der Energieversorgung**  
März 1996, Kurzfassung, 40 Seiten, 3 €
- Band 23 M. Blesl, C. Schlenzig, T. Steidle, A. Voß  
**Entwicklung eines Energieinformationssystems**  
März 1996, 76 Seiten, 3 €
- Band 22 M. Kaltschmitt, A. Voß  
**Integration einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung in den konventionellen Kraftwerksverbund**  
Juni 1995, Kurzfassung, 51 Seiten, 3 €
- Band 21 U. Fahl, E. Läge, W. Rüffler, P. Schaumann, C. Böhringer, R. Krüger, A. Voß  
**Emissionsminderung von energiebedingten klimarelevanten Spurengasen in der Bundesrepublik Deutschland und in Baden-Württemberg**  
September 1995, 454 Seiten, 26 €  
Kurzfassung, 48 Seiten, 3 €
- Band 20 M. Fishedick  
**Erneuerbare Energien und Blockheizkraftwerke im Kraftwerksverbund - Technische Effekte, Kosten, Emissionen**  
Dezember 1995, 196 Seiten, 15 €
- Band 19 A. Obermeier  
**Ermittlung und Analyse von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen in Baden-Württemberg**  
Mai 1995, 208 Seiten, 15 €
- Band 18 N. Kalume  
**Strukturmodule - Ein methodischer Ansatz zur Analyse von Energiesystemen in Entwicklungsländern**  
Dezember 1994, 113 Seiten, 10 €

- Band 17 Th. Müller  
**Ermittlung der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen aus stationären Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung**  
November 1994, 142 Seiten, 10 €
- Band 16 A. Wiese  
**Simulation und Analyse einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland**  
Juni 1994, 223 Seiten, 15 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 15 M. Sawillion, T. Hellwig, B. Biffar, R. Schelle, E. Thöne  
**Optimierung der Energieversorgung eines Industrieunternehmens unter Umweltschutz- und Wirtschaftlichkeitsaspekten - Wertanalyse-Projekt**  
Januar 1994, 154 Seiten, 13 €
- Band 14 M. Heymann, A. Trukenmüller, R. Friedrich  
**Development prospects for emission inventories and atmospheric transport and chemistry models**  
November 1993, 105 Seiten, 10 €
- Band 13 R. Friedrich  
**Ansatz zur Ermittlung optimaler Strategien zur Minderung von Luftschadstoffemissionen aus Energieumwandlungsprozessen**  
Juli 1992, 292 Seiten, 18 €
- Band 12 U. Fahl, M. Fishedick, M. Hanselmann, M. Kaltschmitt, A. Voß  
**Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Minderungspotentiale energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen durch einen verstärkten Erdgaseinsatz in der Elektrizitätsversorgung Baden-Württembergs unter besonderer Berücksichtigung konkurrierender Nutzungsmöglichkeiten**  
August 1992, 471 Seiten, 26 €  
Kurzfassung, 45 Seiten, 5 €
- Band 11 M. Kaltschmitt, A. Wiese  
**Potentiale und Kosten regenerativer Energieträger in Baden-Württemberg**  
April 1992, 320 Seiten, 20 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 10 A. Reuter  
**Entwicklung und Anwendung eines mikrocomputergestützten Energieplanungsinstrumentariums für den Einsatz in Entwicklungsländern**  
November 1991, 170 Seiten, 13 €
- Band 9 T. Kohler  
**Einsatzmöglichkeiten für Heizreaktoren im Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland**  
Juli 1991, 162 Seiten, 13 €

- Band 8 M. Mattis  
**Kosten und Auswirkungen von Maßnahmen zur Minderung der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen aus Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg**  
Juni 1991, 188 Seiten, 13 €
- Band 7 M. Kaltschmitt  
**Möglichkeiten und Grenzen einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung am Beispiel Baden-Württembergs**  
Dezember 1990, 178 Seiten, 13 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 6 G. Schmid, A. Voß, H.W. Balandynowicz, J. Cofala, Z. Parczewski  
**Air Pollution Control Strategies - A Comparative Analysis for Poland and the Federal Republic of Germany**  
Juli 1990, 92 Seiten, 8 €
- Band 5 Th. Müller, B. Boysen, U. Fahl, R. Friedrich, M. Kaltschmitt, R. Laing, A. Voß, J. Giesecke, K. Jorde, C. Voigt  
**Regionale Energie- und Umweltanalyse für die Region Neckar-Alb**  
Juli 1990, 484 Seiten, 28 €
- Band 4 Th. Müller, B. Boysen, U. Fahl, R. Friedrich, M. Kaltschmitt, R. Laing, A. Voß, J. Giesecke, K. Jorde, C. Voigt  
**Regionale Energie- und Umweltanalyse für die Region Hochrhein-Bodensee**  
Juni 1990, 498 Seiten, 28 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 3 D. Kluck  
**Einsatzoptimierung von Kraftwerkssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung**  
Mai 1990, 155 Seiten, 10 €
- Band 2 M. Fleischhauer, R. Friedrich, S. Häring, A. Haugg, J. Müller, A. Reuter, A. Voß, H.-G. Wystreil  
**Grundlagen zur Abschätzung und Bewertung der von Kohlekraftwerken ausgehenden Umweltbelastungen in Entwicklungsländern**  
Mai 1990, 316 Seiten, 20 €
- Band 1 U. Fahl  
**KDS - Ein System zur Entscheidungsunterstützung in Energiewirtschaft und Energiepolitik**  
März 1990, 265 Seiten, 18 €