

Forschungsbericht

**Analyse der
Einsatzpotenziale von
Wärmeerzeugungstechniken in
industriellen
Anwendungen**

Michael Ohl

Analyse der Einsatzpotenziale von Wärmeerzeugungstechniken in industriellen Anwendungen

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

Vorgelegt von

Michael Ohl

geboren in Esslingen am Neckar

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

Tag der mündlichen Prüfung:	18. August 2016
-----------------------------	-----------------

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
der Universität Stuttgart

ISSN 0938-1228

2016

D 93 (Dissertation der Universität Stuttgart)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Voß möchte ich mich sehr herzlich bedanken für die Übernahme des Hauptberichts sowie die Anmerkungen und Hinweise im Zuge der Entstehung dieser Arbeit.

Großer Dank gebührt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Schmidt für die Übernahme der Mitberichterstattung. Ebenfalls zu großem Dank verpflichtet bin ich zudem Dr.-Ing. M. Blesl, u. a. auch für die Übernahme des Lektorats.

Allen Kolleginnen und Kollegen am IER und insbesondere der Abteilung ESA möchte ich Dank sagen für die gute Arbeitsatmosphäre, die Hilfsbereitschaft und die kreative Zusammenarbeit über die Jahre. Besonders hervorheben möchte ich die Kollegen Dipl.-Volkswirtin Birgit Götz, Dr. rer. pol. Robert Küster und Dr. rer. pol. Marcel Zürn für die Bereitstellung literarischer Quellen sowie ganz besonders auch für ihre stets wertvollen Beiträge im Rahmen zahlreicher und intensiver Diskussionen – zu fachlichen und anderen Fragestellungen gleichermaßen.

Michael Ohl

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XXI
Kurzfassung	XXIII
Abstract	XXV
1 Einleitung	1
1.1 Ziele und Vorgehensweise	2
2 Methoden der Technikuntersuchung	5
2.1 Komponentenbasierte Ermittlung des Stands der Technik.....	6
2.1.1 Parametrisierte Größenskalierung	7
2.2 Komponentenbasierte Entwicklung der technischen Potenziale.....	8
2.3 Komponentenbasierte Entwicklung der wirtschaftlichen Potenziale	8
2.3.1 Komponentenbasierte Lernkurvenanalyse.....	8
2.4 Methodik zur Bestimmung des einzelprozessspezifischen Wärmebedarfs und der Möglichkeiten der Wärmebereitstellung	12
2.5 Monte Carlo-Simulation	14
2.5.1 Grundlagen der Monte Carlo-Simulation	15
2.5.2 Anwendung der Monte Carlo-Simulation.....	17
3 Technische und wirtschaftliche Analyse ausgewählter derzeitiger und künftiger Wärmeerzeugungstechniken	19
3.1 Motor-Blockheizkraftwerk (BHKW)	19
3.1.1 Stand der BHKW-Technik.....	19
3.1.2 Komponentenbasierte Ermittlung der technischen Potenziale.....	24
3.1.3 Komponentenbasierte Ermittlung der wirtschaftlichen Kennwerte mit Größenskalierung	26
3.1.4 Zusammenfassung BHKW	27
3.2 MCFC-Brennstoffzellen	28
3.2.1 Stand der Technik der MCFC-Brennstoffzelle	32
3.2.2 Komponentenbasierte Ermittlung der technischen Potenziale.....	35
3.2.3 Komponentenbasierte Ermittlung der investitionskostenseitigen Potenziale mit Größenskalierung	37
3.2.4 Zusammenfassung Brennstoffzellen	39
3.3 Erdgasbrennwertkessel	40
3.3.1 Stand der Technik.....	40

3.3.2	Komponentenbasierte Ermittlung der technischen Potenziale.....	43
3.3.3	Komponentenbasierte Entwicklung der wirtschaftlichen Kennwerte mit Größenskalierung	44
3.3.4	Zusammenfassung Brennwertkessel	46
3.4	Organic Rankine Cycle-Anlagen (ORC-Anlagen)	46
3.4.1	Stand der Technik der ORC-Anlagen.....	46
3.4.2	Komponentenbasierte Ermittlung der technischen Potenziale.....	49
3.4.3	Komponentenbasierte Entwicklung der wirtschaftlichen Kennwerte mit Größenskalierung	50
3.4.4	Zusammenfassung ORC-Anlage.....	51
3.5	Wärmepumpen	52
3.5.1	Stand der Technik elektrische Wärmepumpe	54
3.5.2	Komponentenbasierte Ermittlung der technischen Potenziale.....	56
3.5.3	Komponentenbasierte Ermittlung der wirtschaftlichen Kennwerte	57
3.5.4	Zusammenfassung Wärmepumpe	58
4	Industrieller Nutzwärmebedarf ausgewählter Branchen und Betriebe in Deutschland gesamt	59
4.1	Methoden der Wärmeübertragung für industrielle Anwendungen	60
4.1.1	Direkte Abgasnutzung	60
4.1.2	Prozessdampferzeugung	61
4.1.3	Übertragung auf Fluidstrom (Luft, Wasser)	63
4.2	Ermittlung von Wärmebedarf und Dimensionierung der Wärmeerzeugungsanlagen für ausgewählte Anwendungsfälle in der Industrie in Deutschland	64
4.2.1	Papierfabriken	65
4.2.2	Brauereien	69
4.2.3	Zuckerfabriken	72
4.2.4	Automobilmontagewerke.....	75
4.3	Ergebnisse der einzelprozessbasierten Bestimmung des industriellen Wärmebedarfs nach Branchen und Betrieben für Deutschland gesamt	78
5	Detaillierte Technologiebewertung anhand exemplarischer Wärmeversorgungsaufgaben aus ausgewählten Branchen	81
5.1	Grundlagen der Analyse	81
5.2	Monte Carlo-Simulation	84
5.3	Papierfabriken	86
5.3.1	Große Papierfabrik	86
5.3.2	Mittelgroße Papierfabrik.....	91
5.3.3	Kleine Papierfabrik.....	94
5.4	Brauerei.....	98

5.4.1	Große Brauerei	98
5.4.2	Mittelgroße Brauerei	102
5.4.3	Kleine Brauerei	105
5.5	Zuckerfabrik.....	108
5.6	Automobilmontagewerke.....	112
5.6.1	Großes Automobilmontagewerk	113
5.6.2	Mittelgroßes Automobilmontagewerk.....	116
5.6.3	Kleines Automobilmontagewerk.....	119
5.7	Zusammenfassung der Technologiebewertung für die Fallbeispiele	122
6	Bestimmung der technischen Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in ausgewählten Branchen der Industrie in Deutschland.....	129
6.1	Ermittlung der technischen Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in Deutschland für Papierfabriken.....	129
6.2	Ermittlung der technischen Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in Deutschland für Brauereien.....	131
6.3	Ermittlung der technischen Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in Deutschland für Zuckerfabriken.....	132
6.4	Ermittlung der technischen Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in Deutschland für Automobilmontagewerke .	133
6.5	Zusammenfassung der Ermittlung der technischen Einsatzpotenziale für die betrachteten Branchen.....	134
7	Zusammenfassung	137
8	Literatur.....	145
9	Anhang I.....	151
10	Anhang II	153

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Vorgehensschema der komponentenweisen Bilanzierung der technischen und wirtschaftlichen Entwicklungspotenziale von Wärmeerzeugungstechniken für den industriellen Einsatz am Beispiel MCFC	5
Abbildung 2-2:	Kostenverlauf über der kumulierten Marktmenge für unterschiedliche Lernfaktoren	10
Abbildung 2-3:	Entwicklung der Stückkosten über verschiedene Phasen der Technikentwicklung	11
Abbildung 3-1:	Prinzipschema eines erdgasbetriebenen motorischen Blockheizkraftwerks (BHKW)	20
Abbildung 3-2:	Anlagenschema eines BHKW mit einer elektrischen Leistung von 180 kW _{el}	22
Abbildung 3-3:	Wirkungsgradpotenziale der BHKW-Technik heute bzw. im Jahr 2030 im Leistungsbereich bis 10 MW _{el}	25
Abbildung 3-4:	Leistungsgrößenbezogener Verlauf der spezifischen BHKW-Investitionskostenpotenziale für heute und 2030 im Bereich bis 10 MW _{el}	27
Abbildung 3-5:	Funktionsprinzip von Brennstoffzellen	29
Abbildung 3-6:	Anlagenschema einer MCFC-Brennstoffzelle	34
Abbildung 3-7:	Leistungsgrößenbezogener Verlauf der spezifischen MCFC-Investitionskostenpotenziale für heute und 2030 im Bereich bis 10 MW _{el}	38
Abbildung 3-8:	Anlagenschema Brennwertkessel für den Anwendungsfall Gebäudeversorgung	41
Abbildung 3-9:	Leistungsgrößenbezogener Verlauf der spezifischen Brennwertkesselinvestitionskosten für heute und 2030 im Bereich bis 500 kW _{th}	45
Abbildung 3-10:	T-s-Diagramm ORC-Anlage	47
Abbildung 3-11:	Schematischer Aufbau einer ORC-Anlage mit angeschlossener Niedertemperaturwärmenutzung	48
Abbildung 3-12:	Leistungsgrößenbezogener Verlauf der spezifischen Investitionskostenpotenziale der ORC-Anlage für heute und 2030 im Bereich bis 10 MW _{el}	51
Abbildung 3-13:	Prinzipskizze Kompressionswärmepumpe für Heizungsanwendungen .	53
Abbildung 3-14:	Leistungsgrößenbezogener Verlauf der spezifischen Wärmepumpeninvestitionskostenpotenziale für heute und 2030 im Bereich bis 10 MW _{th} heute und im Jahr 2030	58
Abbildung 4-1:	Temperaturverlauf der direkten Wärmeübertragung für unterschiedliche Zeitpunkte t	61
Abbildung 4-2:	Temperaturverlauf der Dampferzeugung	62

Abbildung 4-3:	Temperaturverlauf der Wärmeübertragung von Abgas- auf Fluidstrom	63
Abbildung 4-4:	Jahresdauerlinien des Nutzwärmebedarfs der verschiedenen Typen von Papierfabriken.....	67
Abbildung 4-5:	Verfahrensschema der Bierherstellung aus Sicht der betrieblichen Wärmeversorgung.....	70
Abbildung 4-6:	Jahresdauerlinien des Nutzwärmebedarfs der verschiedenen Typen von Brauereien	71
Abbildung 4-7:	Verfahrensschema der Zuckerproduktion aus Sicht der Wärmeversorgung	73
Abbildung 4-8:	Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs der Zuckerfabrik.....	74
Abbildung 4-9:	Wärmetechnisch relevante Verfahrensschritte der Automobilproduktion... ..	76
Abbildung 4-10:	Jahresdauerlinien des Nutzwärmebedarfs der verschiedenen Typen von Automobilmontagewerken	77
Abbildung 4-11:	Wärmebedarfsstruktur der Industriebranchen in Deutschland 2005 in Abhängigkeit des Temperaturniveaus	79
Abbildung 5-1:	Prinzipielle Vorgehensweise der Monte Carlo-Simulation am Beispiel der Wärmeerzeugungskosten der großen Papierfabrik.....	83
Abbildung 5-2:	Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten der großen Papierfabrik	88
Abbildung 5-3:	Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Papierfabrik groß“	91
Abbildung 5-4:	Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten der mittelgroßen Papierfabrik.....	92
Abbildung 5-5:	Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Papierfabrik mittel“	94
Abbildung 5-6:	Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten der kleinen Papierfabrik	96
Abbildung 5-7:	Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Papierfabrik klein“	97
Abbildung 5-8:	Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten der großen Brauerei.....	100
Abbildung 5-9:	Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Brauerei groß“	101

Abbildung 5-10:	Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten der mittelgroßen Brauerei	103
Abbildung 5-11:	Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Brauerei mittel“	104
Abbildung 5-12:	Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten der kleinen Brauerei.....	106
Abbildung 5-13:	Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Brauerei klein“	108
Abbildung 5-14:	Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten der Zuckerfabrik	110
Abbildung 5-15:	Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Zuckerfabrik“	112
Abbildung 5-16:	Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten des großen Automobilmontagewerks	114
Abbildung 5-17:	Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Automobilmontagewerk groß“	116
Abbildung 5-18:	Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten des mittelgroßen Automobilmontagewerks	117
Abbildung 5-19:	Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Automobilmontagewerk mittel“	119
Abbildung 5-20:	Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten des kleinen Automobilmontagewerks.....	120
Abbildung 5-21:	Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Automobilmontagewerk klein“	122
Abbildung 6-1:	Technische Einsatzpotenziale der untersuchten Wärmeerzeugungstechniken in den betrachteten Werken der Papierindustrie in Deutschland in Abhängigkeit der Werksgröße.....	130
Abbildung 6-2:	Technische Einsatzpotenziale der untersuchten Wärmeerzeugungstechniken in den betrachteten Montagewerken der deutschen Automobilindustrie in Abhängigkeit der Werksgröße	134

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Überblick Wirkungsgradentwicklung BHKW 180 kW _{el}	25
Tabelle 3-2:	Lernkurvenentwicklungsdaten BHKW 180 kW _{el}	27
Tabelle 3-3:	Basisdaten zu den einzelnen Brennstoffzelltypen	30
Tabelle 3-4:	Überblick Wirkungsgradentwicklung MCFC 250 kW _{el}	37
Tabelle 3-5:	Komponentenrahmendaten MCFC 250 kW _{el}	38
Tabelle 3-6:	Überblick Wirkungsgradentwicklung Erdgasbrennwertkessel 100 kW _{th}	44
Tabelle 3-7:	Komponentenrahmendaten Brennwertkessel 115 kW _{th}	45
Tabelle 3-8:	Wirkungsgradentwicklung der ORC-Anlage mit einer Leistung von 1,0 MW _{el}	50
Tabelle 3-9:	Komponentenrahmendaten einer ORC-Anlage mit einer Leistung von 1,0 MW _{el} , P _{th} =4,9 MW _{th}	51
Tabelle 3-10:	Kennzahlenentwicklung Wärmepumpe 143 kW _{th} nach Leistungszahl und Jahresarbeitszahl.....	57
Tabelle 3-11:	Komponentenrahmendaten Wärmepumpe 143 kW _{th}	57
Tabelle 4-1:	Wärmebedarfsdaten des Anwendungsfalls Papierfabrik	66
Tabelle 4-2:	Dimensionierungswerte der einzelnen Versorgungskonzepte im Anwen- dungsfall der Papierfabriken	68
Tabelle 4-3:	Wärmebedarfsdaten des Anwendungsfalls Brauerei.....	71
Tabelle 4-4:	Dimensionierungswerte der einzelnen Versorgungskonzepte im Anwen- dungsfall der Brauereien.....	72
Tabelle 4-5:	Wärmebedarfsdaten des Anwendungsfalls Zuckerfabrik.....	74
Tabelle 4-6:	Dimensionierungswerte der einzelnen Versorgungskonzepte im Anwendungsfall der Zuckerfabrik.....	75
Tabelle 4-7:	Wärmebedarfsdaten des Anwendungsfalls Automobilmontagewerk	77
Tabelle 4-8:	Dimensionierungswerte der einzelnen Versorgungskonzepte im Anwen- dungsfall der Automobilwerke.....	78
Tabelle 5-1:	Wertebereiche der exogenen wirtschaftlichen und ökologischen Rahmendaten für unterschiedliche Verbrauchsgrößenklassen für das Jahr 2030	85
Tabelle 5-2:	Technisch-wirtschaftliche Rahmendaten für die verschiedenen Größen- klassen der betrachteten Papierfabriken	86
Tabelle 5-3:	Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungs- kosten der großen Papierfabrik in €/MWh _{thNutz}	87
Tabelle 5-4:	Ergebnis der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Papierfabrik groß“ in kg CO ₂ /MWh _{thNutz}	89

Tabelle 5-5:	Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten der mittelgroßen Papierfabrik in €/MWh _{thNutz}	92
Tabelle 5-6:	Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Papierfabrik mittel“ in kg CO ₂ /MWh _{thNutz}	93
Tabelle 5-7:	Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten der kleinen Papierfabrik in €/MWh _{thNutz}	95
Tabelle 5-8:	Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Papierfabrik klein“ in kg CO ₂ /MWh _{thNutz}	96
Tabelle 5-9:	Technisch-wirtschaftliche Rahmendaten des Anwendungsfalls Brauerei....	98
Tabelle 5-10:	Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten der großen Brauerei in €/MWh _{thNutz}	99
Tabelle 5-11:	Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Brauerei groß“ in kg CO ₂ /MWh _{thNutz}	100
Tabelle 5-12:	Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten der mittelgroßen Brauerei in €/MWh _{thNutz}	102
Tabelle 5-13:	Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Brauerei mittel“ in kg CO ₂ /MWh _{thNutz}	103
Tabelle 5-14:	Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten der kleinen Brauerei in €/MWh _{thNutz}	105
Tabelle 5-15:	Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Brauerei klein“ in kg CO ₂ /MWh _{thNutz}	107
Tabelle 5-16:	Technisch-wirtschaftliche Rahmendaten Zuckerfabrik „groß“ für 2030 ...	109
Tabelle 5-17:	Ergebnis der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten der Zuckerfabrik in €/MWh _{thNutz}	109
Tabelle 5-18:	Ergebnis der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Zuckerfabrik“ in kg CO ₂ /MWh _{thNutz}	111
Tabelle 5-19:	Technisch-wirtschaftliche Rahmendaten Automobilmontagewerke.....	113
Tabelle 5-20:	Ergebnis der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten des großen Automobilmontagewerks in €/MWh _{thNutz}	113
Tabelle 5-21:	Ergebnis der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Automobilmontagewerk groß“ in kg CO ₂ /MWh _{thNutz}	115

Tabelle 5-22:	Ergebnis der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten des mittelgroßen Automobilmontagewerks in €/MWh _{thNutz} 117
Tabelle 5-23:	Ergebnis der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Automobilmontagewerk mittel“ in kg CO ₂ /MWh _{thNutz} 118
Tabelle 5-24:	Ergebnis der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten des kleinen Automobilmontagewerks in €/MWh _{thNutz} 119
Tabelle 5-25:	Ergebnis der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Automobilmontagewerk klein“ in kg CO ₂ /MWh _{thNutz} 121
Tabelle 5-26:	Heutige Wärmeerzeugungskosten für verschiedene Wärmeerzeugungssysteme und Anwendungsfälle in €/MWh _{thNutz} 123
Tabelle 5-27:	Heutige betriebliche CO ₂ -Emissionen für verschiedene Wärmeerzeugungssysteme und Anwendungsfälle in kg CO ₂ /MWh _{thNutz} 125
Tabelle 5-28:	Medianwerte der Wärmeerzeugungskosten für verschiedene Wärmeerzeugungssysteme und Anwendungsfälle für das Jahr 2030 in €/MWh _{thNutz} 126
Tabelle 5-29:	Medianwerte der betrieblichen CO ₂ -Emissionen für verschiedene Wärmeerzeugungssysteme und Anwendungsfälle für das Jahr 2030 in kg CO ₂ /MWh _{thNutz} 127
Tabelle 6-1:	Größenstruktur der Papierfabriken in Deutschland 2006 129
Tabelle 6-2:	Betriebsstruktur der Brauereien in Deutschland 2007 131
Tabelle 6-3:	Technische Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in der Brauindustrie in Deutschland in Abhängigkeit der Betriebsgröße... 131
Tabelle 6-4:	Größenstruktur der Zuckerfabriken in Deutschland 2005 132
Tabelle 6-5:	Technische Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in Zuckerfabriken in Deutschland 132
Tabelle 6-6:	Größenstruktur der Automobilmontagewerke in Deutschland 133
Tabelle 6-7:	Technische Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in den Betrieben der Papierfabriken, Brauereien, Zuckerfabriken und Automobilmontagewerke in Deutschland in Abhängigkeit der Betriebsgrößenklasse..... 134
Tabelle 9-1:	Betriebsgrößenverteilung der deutschen Papierindustrie 2006 151
Tabelle 9-2:	Größenverteilung der deutschen Brauindustrie 2007 151
Tabelle 10-1:	Prozessdaten des Wärmeverbrauchs ausgewählter Branchen..... 153

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

AFC	Alkaline fuel cell, alkalische Brennstoffzelle
BHKW	Blockheizkraftwerk
CIP	Cleaning in process, Reinigung bei laufendem Betrieb
Cov	Kovarianz
DMFC	Direct methanol fuel cell, Direktmethanolbrennstoffzelle
FC	Fuel cell, Brennstoffzelle
FCKW	Fluorkohlenwasserstoffe
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistung
HT	Hochtemperatur
JAZ	Jahresarbeitszahl
LCA	Life Cycle Analysis, ökologische Bilanz
LCC	Life Cycle Costing, Lebenszykluskostenanalyse
LF	Lernfaktor
LNG	Liquid natural gas, verflüssigtes Erdgas
MCFC	Molten carbonate fuel cell, Schmelzkarbonatbrennstoffzelle
MCS	Monte Carlo-Simulation
MEA	Membrane electrode assembly, Membran-Elektroden-Einheit
MSR	Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen
MT	Mitteltemperatur
NT	Niedertemperatur
ORC	Organic Rankine cycle, organischer Rankine-Prozess
PAFC	Phosphoric acid fuel cell, phosphorsaure Brennstoffzelle
PEMFC	Polymer electrolyte fuel cell, Polymerelektrolytbrennstoffzelle
SOFC	Solide oxide fuel cell, Festoxidbrennstoffzelle

Variablen

c	spezifische Wärmekapazität
h	Enthalpie
m	Masse
n	Molzahl
p	Druck
q	spezifische Wärmemenge
t	Tonne, Zeitpunkt
x	Verfahrenskoeffizient
A	Oberfläche

$A(x)$	Funktion A von x
K	Korrelationskoeffizient
Q	Wärmemenge
\dot{Q}	Wärmeleistung
$P(x)$	normiertes statistisches Gewicht der Größe x
β	Arbeitszahl
ε	Leistungszahl
λ	Luftzahl
η	Wirkungsgrad, Wärmenutzungsgrad
σ	Standardabweichung
Δ	Differenz
Δh_v	Verdampfungsenthalpie
Θ_{\ln}	logarithmische Temperaturdifferenz

Indizes

el	elektrisch
i	Komponente bzw. Reaktion
l	flüssig
min	Minimum
o	oben, obere(r)
th	thermisch
th_{Nutz}	Nutzwärme
u	unten, untere(r)
A	Abgasstrom
B	Betrieb
BZ	Brennstoffzelle
C	Carnot
D	Dampf
F	Fluid
P	isobar
R	Reaktion
Verd	Verdampfung
Ü	Überhitzung
W	Prozessgut

Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Schaffung und exemplarische Anwendung eines Bewertungsmodells für industrielle Wärmeversorgungsaufgaben in technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Hinsicht für heutige und künftige Generationen von Wärmeerzeugungstechniken unter Berücksichtigung der Anforderungen industrieller Wärmenutzungsprozesse sowie der Einflüsse exogener Parameter. Bei den betrachteten Wärmeerzeugungstechniken handelt es sich um das Erdgasmotor-BHKW, die Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (MCFC), die biomassebetriebene ORC-Anlage, den Erdgasbrennwertkessel und die Kompressionswärmepumpe, die in einem bis zum Jahr 2030 reichenden Betrachtungszeitraum untersucht werden.

Im ersten Schritt werden der heutige Stand und die sich bis 2030 ergebenden technischen und investitionskostenseitigen Potenziale der Wärmeerzeugungstechniken auf Basis der Einzelkomponenten ermittelt. Hierbei kommen auch komponentenbezogene Lernkurvenansätze zum Einsatz. Analog zur Erzeugungsseite erfolgt nutzungsseitig eine Auflösung des Wärmebedarfs der Industrie in Deutschland in seine Einzelprozesse.

Anhand ausgewählter Beispiele aus den vier Betriebsklassen Brauerei, Zuckerfabrik, Kfz-Montagewerk und Papierfabrik in jeweils unterschiedlichen Größenordnungen erfolgt anschließend eine exemplarische Bewertung der Wärmeerzeugungstechniken hinsichtlich der wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen des Einsatzes der einzelnen Wärmeerzeugungstechniken für den heutigen Stand und für das Jahr 2030. Dabei werden im Rahmen einer Monte Carlo-Simulation die jeweils bis 2030 bestehenden Unsicherheiten bei den endogenen und exogenen Rahmendaten, wie etwa Investitionskosten, Primärenergiepreise oder Zinssätze, anwendungsspezifisch erfasst und die sich ergebenden möglichen Wertebereiche und Eintrittswahrscheinlichkeiten für die beiden Zielgrößen Wärmeerzeugungskosten und direkte betriebliche CO₂-Emissionen ermittelt. Zusätzlich erlaubt die Monte Carlo-Simulation die Quantifizierung des Einflusses einzelner Parameter für den jeweiligen Anwendungsfall.

Neben der Ermittlung von Kosten- und Emissionsdaten können mit Hilfe der komponenten- und einzelprozessbasierten Monte Carlo-Simulation auch weitere Anwendungsfelder bearbeitet werden, wie bspw. die Fabrikplanung, die Energiemodellerstellung, die ökologische Bilanzierung, die Untersuchung der Auswirkungen politischer Maßnahmen zur Emissionsreduktion oder die Erstellung von Marktanalysen.

Den Abschluss der Untersuchung bildet die Ermittlung der jeweiligen technischen Einsatzpotenziale der einzelnen Wärmeerzeugungstechniken in den betrachteten Anwendungsgebieten. Im Ergebnis zeigt sich, dass die derzeitige Wärmeversorgung industrieller Produktionsanlagen bezüglich der wirtschaftlichen Betrachtung branchenunabhängig für Betriebe mit hohem Wärmebedarf und entsprechend hohen Leistungsgrößen überwiegend von BHKW sowie bei den Betrieben mit geringem Wärmebedarf von Brennwertkesseln dominiert wird. Aus ökolo-

gischer Sicht stellt dagegen die MCFC über alle betrachteten Betriebe derzeit die Versorgungstechnik mit den jeweils geringsten spezifischen direkten betrieblichen CO₂-Emissionen dar.

Die weitere Entwicklung zeigt, dass für die gegebenen Wertebereiche und Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Einflussgrößen der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken unabhängig von Einsatzfall zwar die Kosten der Wärmeerzeugung generell steigen, aber kaum Änderungen am Kostenranking der untersuchten Erzeugungstechniken zu erwarten sind. Somit können die für das Jahr 2030 zu erwartenden höheren Stromvergütungssätze und Wirkungsgradverbesserungen sowie Senkungen bei den Investitionskosten nicht die Auswirkungen steigender Preise für Primärenergie und CO₂-Zertifikate ausgleichen. Die einzige diesbezügliche Ausnahme stellt die MCFC dar, deren Erreichen wirtschaftlicher Konkurrenzfähigkeit in den gezeigten Anwendungen sich allerdings bis 2030 nicht als wahrscheinlich erweist. Eine Präsenz der MCFC im Markt für industrielle Wärmeversorgungssysteme innerhalb des betrachteten Zeitraums erscheint äußerst zweifelhaft.

Bei Betrieben mit hohem Niedertemperaturwärmeanteil, wie etwa in der Automobilmontage, ergeben sich insbesondere für ORC-Anlagen und auch für Wärmepumpen zukünftig deutlich bessere wirtschaftliche und ökologische Perspektiven als in den übrigen betrachteten Anwendungsfeldern.

Als wichtige Einflussgrößen auf die zukünftigen Kosten ergeben sich v. a. die für 2030 anzusetzenden Primärenergiepreise. Als weniger relevant erweisen sich dagegen allgemein die technischen Weiterentwicklungspotenziale, die zu erwartende Entwicklung der CO₂-Zertifikatspreise und, mit Ausnahme der MCFC, die Investitionskostenentwicklung. Es zeigt sich zudem, dass von den nominell möglichen Wirkungsgradsteigerungen unter den nutzerseitigen Anforderungen bezüglich der Prozessstruktur und des Betriebsablaufs sich nur geringe Anteile tatsächlich in den betrachteten Anwendungen niederschlagen.

Bezüglich der betrieblichen CO₂-Emissionen verliert die aus heutiger Sicht führende MCFC aufgrund sinkender Stromgutschriften ihren Vorsprung an das BHKW und die ORC-Anlage. Die KWK-Techniken BHKW und MCFC weisen aus diesem Grund für 2030 generell höhere betriebliche CO₂-Emissionen auf, während die übrigen Wärmeerzeugungstechniken in den untersuchten Anwendungsfällen leichte Rückgänge erwarten können.

Die Ermittlung der betriebsgrößenspezifischen Verteilungen der technischen Einsatzpotenziale zeigt für alle Techniken die jeweils höchsten Werte aller betrachteten Anwendungen in der Papierindustrie, dagegen fallen die Einsatzpotenziale in den Brauereien am geringsten aus. Für die untersuchten Anwendungen ergeben sich mit 43 GW_{th} die höchsten technischen Einsatzpotenziale für BHKW. Es lässt sich zeigen, dass die Höhe der Potenzialwerte der einzelnen Techniken neben den Produktionsmengen auch stark vom jeweiligen Temperaturangebot der Wärmeerzeugungstechniken sowie von der anwendungsseitigen Temperaturnachfrage der jeweiligen Einzelprozesse der Industriebetriebe abhängig ist.

Abstract

The creation of an assessment tool for present and future industrial heat supply systems in terms of their technical, economical, and environmental implications is the main target of this thesis. The heat production technologies highlighted comprise natural gas-fired motor block heat and power plant, molten carbonate fuel cell (MCFC), the natural gas-fired condensing boiler, the biomass-fired organic Rankine cycle (ORC) plant, and the compression heat pump. The period under review ranges to the year 2030 and also considers the given uncertainties about endogenous and exogenous parameters, such as energy prices, investment costs, or interest rates.

In the first step, the current technical and economical status of the technologies is identified, based on analyses of their single components. Besides estimating the technologies' efficiency potentials of 2030, the individual future investment costs are derived from the data gained also using the learning curve method.

In a second step, the process heat and temperature demand of the industry located in Germany is analysed based on its disintegration into single processes. In a combination of technical, economical, and environmental data the 2030 heat production costs and direct operational CO₂ emissions are estimated for defined industrial applications, like sugar plants, breweries, automobile plants and papermills. The given uncertainties about the 2030 input parameters are regarded in a Monte Carlo simulation tool. The results of this simulation model show occurrence probabilities and valuations for both heat production costs and direct operational CO₂ emissions.

Thus, it turns out, the current economical ranking of the technologies will not be subject to major changes, as the motor block heat and power plant is and will be leading the large scale heat applications, whereas the condensing boiler will keep its leading position with smaller industrial consumers. In all the applications regarded the heat production costs of all technologies except the MCFC will be higher than today. This means that higher electricity rates, lower investment costs, and technical improvement will unlikely be able to outweigh the effects of higher prices for primary energy and CO₂ certificates.

Despite declines in investment costs, the MCFC, as yet not commercially available, will have only little chance for market success until 2030, as the identified investment cost reductions will not be sufficient for competition with the other technologies highlighted. As a further feature of the model, the integrated sensitivity analysis module allows the determination of the relevance of single input parameters. For the cost estimations for the year 2030 it reveals the gas price development as the leading influence for every application field and every technology regarded. Furtherly, it turns out only a minor portion of the technical improvement achievable shows impact on the command variables highlighted for real applications.

As for plants with a high share of low temperature heat demand, e. g. the car assembly, particularly ORC plants and heat pumps feature better economical and ecological prospects than the in rest of the considered application fields.

In the ecological part of the analysis, particularly the MCFC and, to a smaller extent, the motor block heat and power plant as the current technologies with the lowest direct operational CO₂ emissions will suffer from lower electricity credits as the German grid mix expects rigorous declines of CO₂ emissions for the next years. In the ecological part of the analysis it turns out the development of the CO₂ emissions of the German grid mix is the most relevant parameter by far, whereas the impacts of technical improvement have negligible parts.

Finally, the identification of the technologies' operational potentials for the different industry sectors and plant capacities yields the highest figures for the paper industry, whereas the breweries reach the lowest ones. Resolved to the single technologies the block heat and power plants have the highest potentials through all of the branches of trade regarded. It turns out there is a coherence between a technology's application potential and the temperature demand of the industrial application.

Furtherly, it is shown that significant reduction in direct operational CO₂ emissions cannot be achieved by technical improvement of the heat production technologies. Instead, it will be necessary to extend the utilisation of CO₂-free fuels and power. Herefore, incentive measures can be useful.

Further potential applications of the developed, Monte Carlo simulation based method founding on the analyses of single components and processes can comprise factory planning, energy modelling, life cycle analysis, market analysis or the impact analysis of political measures, e. g. in the field of emission reduction strategies.

1 Einleitung

Mit einem Anteil von etwa 60 % am gesamten Endenergieverbrauch bildet die Wärmenachfrage in energetischer Hinsicht den mit Abstand größten Teilmarkt des deutschen Energiemarkts /VDEW 2005/. Der Wärmeverbrauch erstreckt sich auf die Bereiche Raumheizung, Warmwasserbereitung und Prozesswärme für die Sektoren Haushalte, Gewerbe-Handel-Dienstleistung (GHD), kommunale Verbraucher und Industrie. Die Deckung des Wärmebedarfs erfolgt aus verschiedenen Energieträgern und mittels verschiedener Umwandlungstechniken, die sowohl untereinander als auch mit Maßnahmen zur Senkung des Wärmebedarfs, wie z. B. verbesserter Wärmedämmung, konkurrieren. Durch steigende Primärenergiepreise und strengere Umweltauflagen verschärft sich der Wettbewerb der Techniken hinsichtlich des Primärenergiebedarfs und einer höheren Brennstoffflexibilität. Letzteres betrifft v. a. die Einsetzbarkeit neuer Energieträger, wie etwa der biogenen Gase. Daneben erweitert sich der Wettbewerb der Wärmeerzeugungssysteme auch durch zusätzlich auf den Markt drängende neue Techniken. An diese neuen Techniken, wie z. B. die verschiedenen Typen von Brennstoffzellen, sind hohe Erwartungen, u. a. bezüglich der erreichbaren Wirkungsgrade und der ökologischen Verträglichkeit, geknüpft.

Die Wirtschaftlichkeit einer Wärmeerzeugungstechnik stellt einen entscheidenden Faktor für deren Erfolg auf dem Wärmemarkt dar. Dabei spielen u. a. auch die Investitionskosten eine bedeutende Rolle. Diesbezüglich weisen neu auf den Markt kommende gegenüber den etablierten Techniken in der Regel zunächst deutliche Nachteile auf. Zu diesen Nachteilen zählen u. a. die meist nicht in ähnlicher Größenordnung vorhandene Serienfertigung oder noch nicht realisierte Einsparpotenziale, wie sie bspw. durch technische Vereinfachungen erreicht werden können. Die investitionskostenseitigen Nachteile können zum Zeitpunkt des Markteintritts oftmals auch durch höhere Wirkungsgrade nicht kompensiert werden. Hierdurch stehen neue Wärmeerzeugungstechniken unter einem Optimierungsdruck. Es stellt sich die Frage, welche Erwartungen in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht an neue Technologien in welchem Zeitrahmen realisierbar sind, und welche technischen und wirtschaftlichen Potenziale die bereits am Markt etablierten Techniken, mit deren Weiterentwicklung ebenfalls zu rechnen ist, ihrerseits noch aufweisen.

Weitere Einflussfaktoren auf die technischen und wirtschaftlichen Kennwerte von Wärmeerzeugungstechniken ergeben sich anwendungsabhängig. Insbesondere für die Prozesswärmebereitstellung in der Industrie spielen bspw. das prozessseitig benötigte und das erzeugungstechnikseitig lieferbare Temperaturniveau mit ihrem entsprechenden Einfluss u. a. auf die standortbezogene, installierbare Leistungsgröße und auf die Gesamtstruktur des jeweiligen betrieblichen Wärmeversorgungssystems eine gewichtige Rolle. Die einsetzbare Leistungsgröße hat ihrerseits wiederum technikspezifischen Einfluss auf die Höhe der spezifischen Investitionskosten. Zudem kann die jeweilige Art der Wärmeübertragung, die zwischen

Wärmeerzeugungstechnik und Wärmeanwendung geschaltet ist, ebenfalls die Wirtschaftlichkeit sowie die energetische und die ökologische Bilanz der Versorgungssysteme beeinflussen. In der betrieblichen Praxis der Industrie werden dabei zumeist Prozessdampfsysteme eingesetzt, die mit energetischen Verlusten behaftet sind. Die Höhe dieser Verluste ist u. a. auch vom lieferbaren Temperaturniveau des eingesetzten Wärmeerzeugungssystems abhängig. Neben den erzeugungs- und den anwendungsseitigen Einflussfaktoren bestimmen auch exogene Einflussfaktoren die ökonomische und ökologische Bilanz der industriellen Wärmenutzung. Hier sind u. a. die Primärenergiepreise, die Strompreise, der Zinssatz sowie die spezifischen CO₂-Emissionen des deutschen Strommix zu nennen.

1.1 Ziele und Vorgehensweise

Ziel der Arbeit ist die Schaffung und exemplarische Anwendung eines Berechnungstools zur Verknüpfung technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Rahmendaten aktueller und künftiger Wärmeversorgungssysteme für konkrete industrielle Einsatzfelder, wobei sich die Rahmendaten aus den Bereichen Wärmeerzeugungstechnik, Wärmeübertragungstechnik, Wärmeanwendung und exogenen Einflussfaktoren (bspw. Primärenergiepreise, Strommix Deutschland, Zinssatz) ergeben. Bei den untersuchten Erzeugungstechniken handelt es sich um das Erdgasmotor-Blockheizkraftwerk (BHKW), die Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (MCFC), den organischen Rankine Prozess (ORC-Anlage), den Erdgasbrennwertkessel und die Kompressionswärmepumpe.

Bei den zu bestimmenden Zielgrößen handelt es sich in wirtschaftlicher Hinsicht um die spezifischen Wärmebereitstellungskosten, bei der ökologischen Analyse um die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen. Der Zeithorizont umfasst die weitere Entwicklung bis zum Jahr 2030.

Hierzu werden im nachfolgenden Kapitel 2 zunächst die jeweils im Rahmen der durchgeführten Analysen angewandten Methoden beschrieben. In Kapitel 3 erfolgt die technische und wirtschaftliche Potenzialanalyse der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken, die im Wesentlichen auf den Methoden der Komponentenerlegung, der Lernkurvenanalyse und der variablen Skalierung beruht. Im anschließenden Kapitel 4 erfolgt die prozessbasierte Wärmebedarfsermittlung des industriellen Sektors, zudem werden die Einflüsse der verschiedenen Wärmeübertragungswege zwischen Wärmeerzeugung und Wärmenutzung erläutert und bilanziert. Außerdem werden mit den Papierfabriken, den Brauereien, der Zuckerfabrik und den Automobilmontagewerken für jeweils verschiedene Betriebsgrößen die Wärmebedarfsstrukturen bezüglich Mengen- und Temperaturanforderungen sowie dem zeitlichen Profil ermittelt und die entsprechenden Versorgungssysteme dimensioniert. Gegenüber bestehenden Untersuchungen, bspw. /Temming 2005/, erfolgt dabei anstelle der dauerlinien- eine lastgangbezogene Wärmebedarfsanalyse bei gleichzeitiger Berücksichtigung von temperaturabhängigen Prozessschemata und der jeweiligen Produktionsmenge. Zudem werden die prozessbezoge-

nen thermischen Verluste der zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeanwendung geschalteten Prozessdampfsysteme berücksichtigt. Für die genannten Anwendungsfälle erfolgt in Kapitel 5 zur Bestimmung des wirtschaftlichen und ökologischen Ist-Zustands sowie zur Abschätzung der im Jahr 2030 jeweils bestehenden Perspektiven eine Kopplung von Technik- und Bedarfsanalyse unter Berücksichtigung der dann zu erwartenden exogenen Rahmenbedingungen, deren Kennwerte aus der Literatur zugeführt werden. Die jeweils bestehenden Unsicherheiten der technischen, wirtschaftlichen und exogenen Rahmenbedingungen werden im Rahmen einer Monte Carlo-Simulation für ausgewählte Fallbeispiele aus der Industrie betrachtet. Neben der Ermittlung der Wertebereiche für die wirtschaftlichen und ökologischen Zielgrößen erfolgt auch eine Bestimmung der Relevanz der jeweiligen Einflussfaktoren.

Kapitel 6 ermittelt die sich ergebenden technischen Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeversorgungstechniken für die Anwendungen der Fallbeispiele in der Industrie in Abhängigkeit von der Betriebsgrößenklasse.

Abschließend erfolgt in Kapitel 7 die Zusammenfassung der erarbeiteten Ergebnisse sowie ein kurzer Ausblick.

2 Methoden der Technikuntersuchung

Die Methode der Technikuntersuchung beruht auf der Kombination verschiedener Verfahren und deren Anwendung in mehreren Schritten (vgl. Abbildung 2-1).

Zunächst wird für die untersuchten Anlagentypen der jeweilige Stand der Technik bestimmt. Anschließend erfolgt eine Aufteilung der Anlagentypen in Komponenten und Baugruppen, die Aufteilung der Investitionskosten auf die einzelnen Baugruppen und deren Skalierung über den betrachteten Leistungsbereich schließt sich an. Es folgt eine komponentenweise Ermittlung der technischen und wirtschaftlichen Potenziale der einzelnen Techniken, wobei für die wirtschaftliche Potenzialermittlung u. a. komponentenspezifische Lernkurvenansätze zum Einsatz kommen. Aus der Regruppierung der Bauteile ergibt sich schließlich die Anlage mit den integrierten technischen und wirtschaftlichen Potenzialwerten.

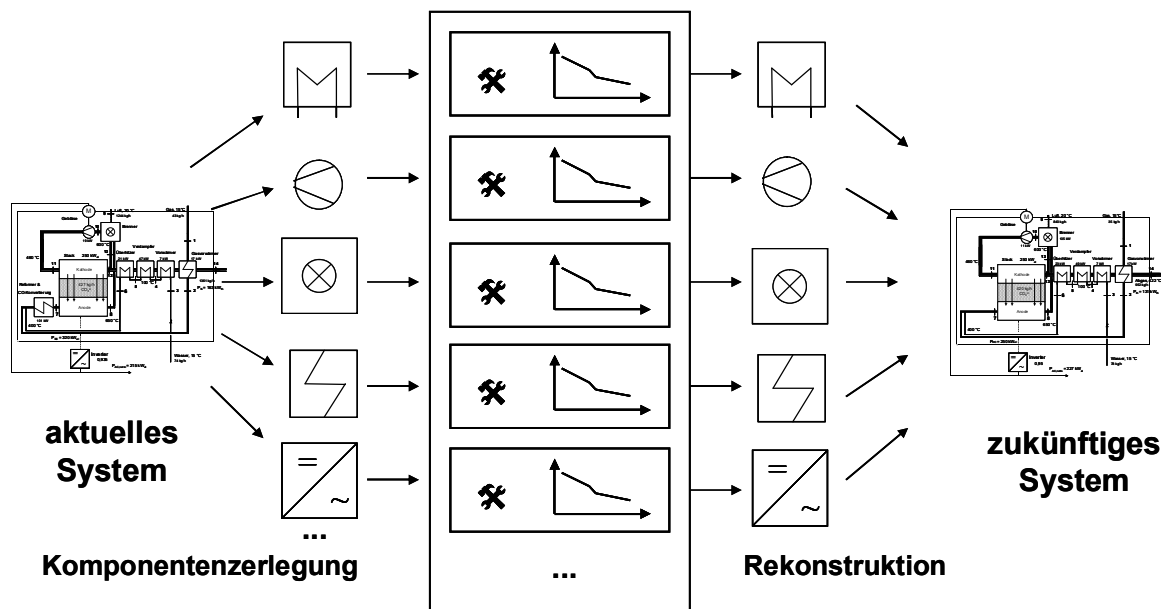


Abbildung 2-1: Vorgehensschema der komponentenweisen Bilanzierung der technischen und wirtschaftlichen Entwicklungspotenziale von Wärmeerzeugungstechniken für den industriellen Einsatz am Beispiel MCFC

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen werden diese technisch und wirtschaftlich optimierten Anlagen mit den Daten industrieller Anwendungsbeispiele gekoppelt, wobei die bestehenden Unsicherheiten bei der Umsetzung der ermittelten technischen und wirtschaftlichen Potenziale durch Integration der jeweiligen Betriebs- und Anlagendaten in einer Monte Carlo-Simulation berücksichtigt werden.

Die Gruppe der untersuchten Wärmeerzeugungstechniken besteht aus dem Erdgasbrennwertkessel, dem Erdgasmotorblockheizkraftwerk (BHKW), der Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (MCFC), der ORC-Anlage und der Wärmepumpe. Diese Techniken sind für verschiedene Leistungsbereiche, Anwendungen oder Brennstoffe konzipiert und weisen neben verschiede-

nen thermischen und elektrischen Wirkungsgraden auch unterschiedliche Investitionskosten-niveaus auf. Zudem besitzen alle betrachteten Techniken unterschiedliche technische und investitionskosten-spezifische Innovationspotenziale. Ein weiteres bedeutendes Kriterium stellt auch das Temperaturniveau der erzeugten Wärme dar, welches von den einzelnen Techniken für die angeschlossenen Anwendungen zur Verfügung gestellt werden kann.

Die in den einzelnen Untersuchungsschritten angewandten Methoden und deren Grundlagen werden nachfolgend vorgestellt.

2.1 Komponentenbasierte Ermittlung des Stands der Technik

In einem ersten Schritt wird für die behandelten Anlagentypen der jeweilige Stand der Technik ermittelt und dokumentiert. Zu den dabei betrachteten Werten zählen die spezifischen Investitionskosten der Gesamttechnik sowie die elektrischen und/oder thermischen Wirkungsgrade. Die Bestimmung dieser Daten erfolgt für je eine, für den industriellen Einsatz repräsentative Leistungsgröße jeder Technik. Die Datenskalierung über den gesamten Leistungsbereich erfolgt gemäß der in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Vorgehensweise. Die Ermittlung des Stands der Technik dient als Ausgangspunkt der in den weiteren Schritten folgenden Untersuchungen.

In einem zweiten Schritt der Technikuntersuchung werden die einzelnen Techniken in Baugruppen und Komponenten zerlegt.

Das Ziel der Fokussierung auf einzelne Komponenten anstelle des Gesamtsystems liegt in der besseren Analysierbarkeit der Eigenschaften kleinerer Einheiten und der Bestimmung ihres jeweiligen Einflusses auf das Gesamtsystem. Mit Hilfe der Komponentenzerlegung lassen sich sowohl die aktuelle Leistungsfähigkeit eines Systems in energetischer, technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Hinsicht beschreiben als auch zukünftige Entwicklungen abschätzen, die durch die Modifikation bzw. Optimierung einzelner Komponenten und die fortschreitende Serienproduktion der Anlagen entstehen.

Als Kriterien für die Aufteilung der Baugruppen dienen dabei die funktionelle Relevanz, die Datenverfügbarkeit, insbesondere von Kostenkennwerten über möglichst viele Jahre, sowie die Überschaubarkeit der Baugruppenanzahl einer Technik.

Zur Bestimmung der Dimensionierungsalgorithmen für die auf Komponentenbasis optimierten und regroupierten künftigen Generationen der einzelnen Techniken werden ggf. Stoff- und Energieflussanalysen vorgenommen, bei denen die wichtigsten Ströme bilanziert werden. Hiermit sollen die Rückwirkungen, die sich aus den möglichen technischen Verbesserungen der einzelnen Baugruppen für die Gesamttechnik ergeben, ggf. quantifiziert werden können. Die ermittelten Kennzahlen werden in eine Komponentenbibliothek eingestellt und stehen u. a. auch zur Modellierung von Versorgungsaufgaben bereit.

2.1.1 Parametrisierte Größenskalierung

Der Einfluss von Einzelkomponenten auf wichtige Systemkennziffern wie bspw. die spezifischen Investitionskosten wächst i. d. R. nicht direkt proportional mit der Anlagengröße. Mit Hilfe der an die Komponentenerlegung angeschlossenen variablen Skalierung können aus bestehenden Leistungsgrößen Aussagen über höhere bzw. kleinere Anlagengrößen gewonnen werden. Die mathematische Beschreibung der variablen Skalierung in Abhängigkeit von der Anlagenleistung erfolgt gemäß Gleichung (2-1):

$$x_2 = x_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{n_x} \quad (2-1)$$

mit

x_2 : Komponentengröße für System 2 (z. B. spezifische Investitionskosten)

x_1 : entsprechende Komponentengröße für System 1 (Referenzgröße)

P_2 : Gesamtsystemkenngröße 2 (i. d. R. Anlagenleistung)

P_1 : Gesamtsystemkenngröße 1 (Referenzanlagenwert)

n_x : Degressionskoeffizient der Komponente bzgl. Eigenschaft x

Die Summe der Eigenschaften aller I Komponenten bestimmt die Eigenschaft des Gesamtsystems 1 (vgl. Gleichung (2-2)).

$$\sum_{i=1}^I x_{1,i} = X_1 \quad (2-2)$$

In der Praxis sind hierzu die entsprechenden Zielwerte einer Basisleistungsgröße und die zugehörigen Degressionsexponenten zu ermitteln.

In der vorliegenden Untersuchung erfolgt zudem die Ausweitung der Größenskalierung auf die Komponentenebene, d. h. es werden nicht nur Gesamtanlagen, sondern zur genaueren Beschreibung des Größenverhaltens auch die einzelnen Baugruppen skaliert. Bei der Betrachtung der Gesamtsysteme addieren sich dann bei der Investitionskostenermittlung die entsprechenden Werte der einzelnen Komponenten auf.

Der Einsatz der Skalierung erlaubt somit deutlich präzisere Aussagen über die Systemeigenschaften, als bspw. lineare Ansätze. Damit kann eine höhere Genauigkeit bei der Abschätzung der technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen einer Leistungsänderung bspw. bei der Betrachtung konkreter Anwendungsfälle erreicht werden.

Bei den Skalierungsexponenten technischer Komponenten handelt es sich um über viele Jahre quasikonstante Werte /ASUE, verschiedene Jahre/. Die Ermittlung der jeweiligen Skalierungsexponenten erfolgt durch Auswertung von Literaturquellen.

Die Skalierung, bspw. der Investitionskosten, ist bislang v. a. bei der Gesamtsystembetrachtung üblich; im Rahmen dieser Arbeit findet die Methode auf Komponentenbasis Anwendung. Damit lassen sich u. a. auch die Rückwirkungen von Verbesserungen an einer Stelle einer Technik auf andere Baugruppen quantifizieren (Beispiel: effektivere Brennstoffzellenstacks führen zu geringeren erforderlichen Leistungsgrößen bei den Abwärmewärmetauschern).

2.2 Komponentenbasierte Entwicklung der technischen Potenziale

Nach der Bestimmung des Stands der Technik folgt als nächster Schritt die Bestimmung der Potenziale der untersuchten Anlagentypen.

Die Ermittlung der technischen Potenziale der betrachteten Techniken umfasst die Ableitung der jeweiligen komponenten- bzw. baugruppenspezifischen Optimierungspotenziale (best-available technology). Die Bestimmung erfolgt für alle Techniken über die Auswertung von Literaturdaten. Zudem können, insbesondere bei der Ermittlung maximal erreichbarer Wirkungsgradkennwerte, physikalische und chemische Grenzwerte als theoretische Maximalwerte genutzt werden. Der Zeithorizont zur Zielerreichung bzw. die Ermittlung des Umsetzungsgrads kann ebenfalls über die Literaturquellenauswertung erfolgen.

2.3 Komponentenbasierte Entwicklung der wirtschaftlichen Potenziale

Die Ermittlung der wirtschaftlichen Potenziale besteht im Wesentlichen aus zwei Ansatzpunkten. Zum einen fließen in die Potenziale die Ergebnisse der Lernkurven der jeweiligen Technikkomponenten ein. Als zweite Quelle dienen die ermittelten Komponenteneinsparungen, die sich als Technologiesprünge ebenfalls in der Lernkurve bemerkbar machen. Die Grundlagen dieser Vorgehensweise sind im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

2.3.1 Komponentenbasierte Lernkurvenanalyse

Die zukünftigen Investitionskosten technischer Systeme sind schwer exakt vorhersagbar. Allerdings lassen sich aus der Vergangenheit für technische Systeme ähnliche Entwicklungen beobachten, welche zur Abschätzung der Investitionskostenentwicklung herangezogen werden können. Dieses Vorgehen hat unter dem Stichwort „Lernkurvenanalyse“ Eingang in die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Energietechniken gefunden /Sander 2001/, /Claeson 2000/.

Die Lernkurvenanalyse erlaubt die Abschätzung der zeitlichen Entwicklung der Investitionskosten in Abhängigkeit von der ausgebrachten kumulierten Produktionsmenge. Die wesentlichen Kenngrößen des Lernkurvenansatzes sind die Kosten der gegenwärtigen oder vergange-

nen n-ten Produktionseinheit, einer zukünftigen q-ten Produktionseinheit und dem zugehörigen Lernexponenten.

Die mathematische Beschreibung der Lernkurve erfolgt gemäß dem in Gleichung (2-3) dargestellten Prinzip /Claeson 2000/:

$$K_q = K_n \cdot \left(\frac{q}{n}\right)^{-b} \quad (2-3)$$

mit

K_q Kosten der q-ten Produktionseinheit

K_n Kosten der n-ten Produktionseinheit

q zukünftige kumulierte Produktion

n kumulierte Produktion zu einem früheren Zeitpunkt

-b Mengenverhältnisexponent

Der Lernfaktor LF ergibt sich dann mit Gleichung (2-4) zu

$$LF = 2^{-b} \quad (2-4)$$

Der Lernfaktor gibt damit den Grad der Kostenreduktion an, der bei einer Verdoppelung der kumulierten Produktion zu erwarten ist. Bei einem Lernfaktor von 0,85 bzw. 85 % beträgt die Abnahme der Produktionskosten bei Verdoppelung der Produktion 15 %, d. h., je kleiner der Absolutwert des Lernfaktors, desto größer ist die Kostensenkung.

Im doppelt logarithmischen Schaubild ergibt sich die Lernkurve als eine angenäherte Gerade, deren Steigung von der Höhe des LF abhängt. Je höher der Lernfaktor, desto geringer fallen die Kostensenkungen aus und desto flacher verläuft die Gerade (vgl. Abbildung 2-2).

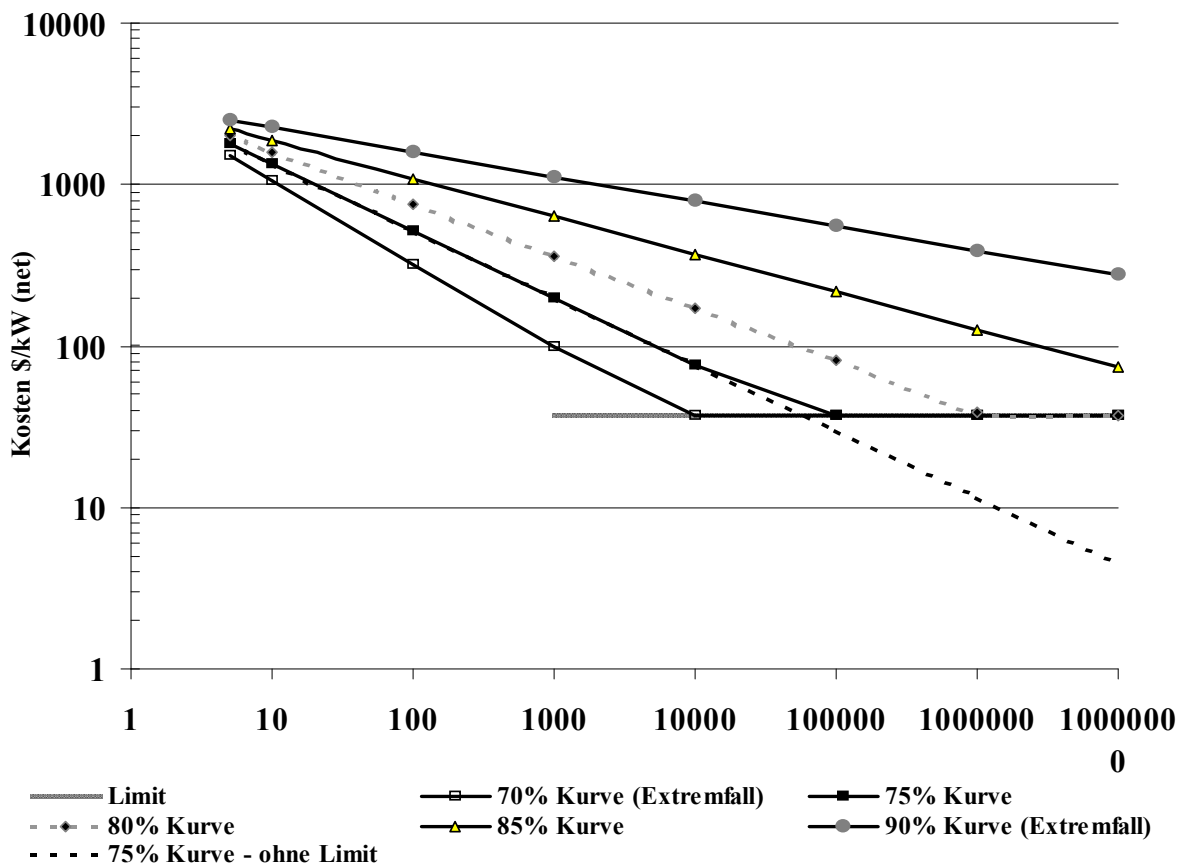


Abbildung 2-2: Kostenverlauf über der kumulierten Marktmenge für unterschiedliche Lernfaktoren /Sander 2001/

Typische Werte für Lernfaktoren bei technischen Produkten liegen im Bereich 65-95%, im Energieversorgungsbereich sind Werte von 80-100 % oder 0,8-1 üblich /Claeson 2000/. Ein weiterer Einflussfaktor auf den Lernfaktor ist der Innovationsgrad einer Technologie. So ist der Lernfaktor einer ausgereiften und lange marktverfügbaren Technologie höher als der einer erst seit kurzem in Gebrauch befindlichen Technologie, bei der noch höhere Verbesserungspotenziale und damit größere Kostensenkungsspielräume (bspw. durch Konzeptmodifikationen oder durch die Einführung bzw. Ausweitung der Serienfertigung) zu erwarten sind. Insgesamt bewertet ist der Lernkurvenansatz ein methodisches Hilfsmittel zur Charakterisierung der möglichen weiteren Entwicklung von Technologien. Für eine fundierte Abschätzung solcher Entwicklungen bedarf es der Ergänzung durch technisch-ökonomische Analysen der Kostenreduktionspotenziale und -bedingungen von Technologien. Dabei spielen viele Veränderungen, wie z. B. bei Werkstoffen, Produktionsverfahren, Installationsbedingungen oder allgemeine Technologiesprünge eine Rolle. Aufgrund solcher (unvorhergesehener) Entwicklungen kommt es zu reproduzierbaren Diskontinuitäten („knees“), die dadurch gekennzeichnet sind, dass sich der Anstieg der Geraden, welche die Produktkosten-Mengenrelation mit einem typischen Fortschrittsindex beschreibt, plötzlich stark verändert /Blesl et al. 2004/. Ein beispielhafter Verlauf dieser Diskontinuität ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

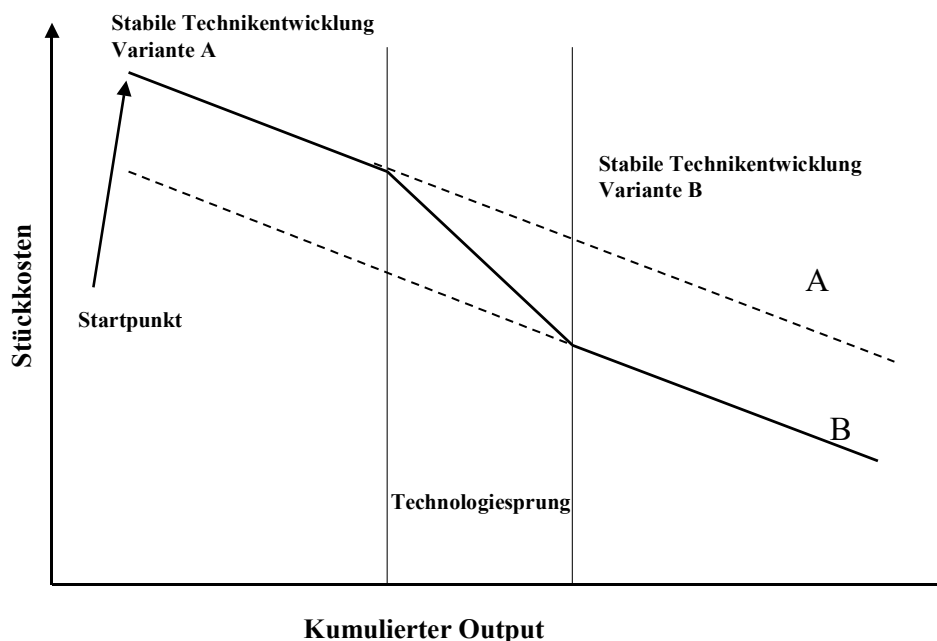


Abbildung 2-3: Entwicklung der Stückkosten über verschiedene Phasen der Technikentwicklung /Sander 2001/

Bestimmung von komponentenbasierten Entwicklungspotenzialen mit Hilfe der Lernkurve

Einen Ansatzpunkt zur Kombination des Lernkurvenansatzes mit der technisch-ökonomischen Analyse bietet die Unterteilung von Techniken in ihre Komponenten (z. B. können Brennstoffzellen in die Hauptkomponenten Stack, Wechselrichter, Wärmetauscher und Peripherie zerlegt werden.). Die verschiedenen Komponenten unterscheiden sich stark in ihrer Entwicklungsreife. Auch in innovative Techniken werden teilweise Komponenten eingebaut, die Bestandteil etablierter Technologien sind. Analog zur Untersuchung der Investitionskosten von Gesamtsystemen lässt sich auch der Lernkurvenansatz zur Betrachtung von Einzelkomponenten einsetzen /Blesl et al. 2004/. Mit Hilfe der Komponentenerlegung können die Grenzen der ökonomischen Entwicklungspotenziale der Techniken abgeleitet werden, da die Komponentenkosten nicht wesentlich unter den Kosten vergleichbarer Komponenten in alternativen Techniken liegen werden. Durch die Kombination von Lernkurvenansatz und Komponentenerlegung der Technik soll im Folgenden versucht werden, die verschiedenen Phasen des Lernkurvenansatzes zu begründen. Es wird abgeschätzt, bis zu welcher kumulierten Kapazität ein technischer und ökonomischer Fortschritt mit welchem Lernfaktor zu beobachten ist /Blesl et al. 2004/.

Bei vielen in den betrachteten Techniken eingesetzten Komponenten handelt es sich um Standardkomponenten, die auch in anderen Anwendungen vielfach genutzt werden (bspw. Wärmetauscher, die sowohl in BHKW als auch in MCFC oder weiteren Systemen genutzt werden können). Für den Einsatz in den betrachteten Techniken werden diese Standardkom-

ponenten in modifizierter Form übernommen. Wegen der erforderlichen Modifikationen für vergleichsweise geringe Stückzahlen können die Investitionskosten dieser Komponenten nicht unter die der eigentlichen Standardkomponenten sinken, die Standardkomponentenpreise bildet die Untergrenze des Lernkurveneffekts. Diese Kostenwerte werden als floor costs bezeichnet /Blesl et al. 2004/. Bei Erreichen des floor cost-Wertes wird die Lernkurvenentwicklung abgebrochen. Auch Standardkomponenten weisen in diesem Bereich keine weiteren nennenswerten Kostensenkungspotenziale mehr auf, d. h., der Wert des jeweiligen Lernfaktors tendiert gegen 1.

Für die Beurteilung des Kostenreduktionspotenzials der Einzelkomponenten werden die Kosten der heute bereits in industrieller Serienproduktion gefertigten Vergleichskomponenten recherchiert. Die Kombination zwischen Lernkurvenansatz und Bauteil- bzw. Komponentenzersetzung von Techniken ermöglicht somit eine konsistente Abschätzung der Kostenentwicklung von Einzeltechniken /Blesl et al. 2004/.

Dabei lässt sich durch die Untersuchung und anschließende Summierung der Einzelkomponenten ermitteln, welche Grenzkosten erreicht werden können, ob weitere Verbesserungen zum Erreichen eines bestimmten Kostenziels noch vorgenommen werden müssen und ob hierzu Technologiesprünge erforderlich sind.

Während bei marktetaablierten Techniken aufgrund der langen Weiterentwicklungs- und Produktionszeiten nicht mit Technologiesprüngen zu rechnen ist, weisen innovative Techniken oft entsprechende Ansatzpunkte auf. Dies geschieht in der Praxis oft über die Reduktion der Komponentenzahl, wodurch sich die Höhe der Investitionskosten vermindert. In diesen Fällen können die verbliebenen Komponenten durch Multifunktionalisierung die Aufgabe der eingesparten Komponenten übernehmen. Daraus folgt in der Regel eine deutliche Kostensenkung. Dieser Effekt kann allerdings meist nur bei neuen, noch nicht oder nur kurz am Markt etablierten Techniken erzielt werden.

2.4 Methodik zur Bestimmung des einzelprozessspezifischen Wärmebedarfs und der Möglichkeiten der Wärmebereitstellung

Für die Bestimmung der technischen Einsatzpotenziale von Wärmeerzeugungstechniken in der Industrie ist die möglichst genaue Kenntnis von Höhe und Temperaturstruktur des Wärmebedarfs unabdingbare Voraussetzung. In der Industrie ist die Deckung des Prozesswärmebedarfs das überwiegende Einsatzgebiet von Wärmeerzeugungstechniken. Der Prozesswärmebedarf ist charakterisiert durch verschiedene Verfahren, die unterschiedliche produktmengenspezifische Wärmemengen auf unterschiedlichen Temperaturniveaus benötigen. Aus diesem Grunde sind mitarbeiterzahlenbezogene Wärmebedarfsdaten, wie sie in der Literatur üblich sind (vgl. z. B. /Eikmeier et al. 2006/), für die Potenzialbestimmung nicht geeignet.

Die Nutzbarkeit einer Technik zur Wärmeversorgung eines industriellen Prozesses ist v. a. davon abhängig, ob das erforderliche Temperaturniveau aufgebracht werden kann. Daneben

spielen die Wärmekapazität des zu erwärmenden Mediums und das eingesetzte Verfahren eine Rolle bei der Bestimmung der Höhe des prozessspezifischen Wärmebedarfs.

Der Wärmebedarf des Prozesses W kann gemäß Gleichung (2-5) rechnerisch ermittelt werden:

$$q_W = x_W \cdot c_W \cdot (T_O - T_U) \quad (2-5)$$

mit

q_W	spezifischer Wärmebedarf des Prozesses W
x_W	Verfahrenskennwert des Prozesses W
c_W	Wärmekapazität des zu erwärmenden Mediums
T_O	obere Prozesstemperatur
T_U	untere Prozesstemperatur

Einflussfaktoren auf den prozessspezifischen Wärmebedarf, wie etwa Phasenänderungen, Teilstromerwärmungen oder endo- bzw. exotherme chemische Reaktionen, werden mit Hilfe des Verfahrenskennwerts x_W in der Bedarfsermittlung abgebildet. Die Ermittlung der einzelnen Temperaturwerte und der jeweiligen Verfahrenskoeffizienten x_W erfolgt überwiegend auf der Basis von Literaturdaten /BWPLUS 2008/ sowie von Branchenkontakten. Soweit möglich, enthalten diese Daten eine Mittelwertbildung für verschiedene Betriebe einer Kategorie, welche die unterschiedlichen Ausgangspositionen der Anlagentechnik (bspw. ältere und neuere Systeme) berücksichtigt.

Durch Korrelation mit dem Produktmengenstrom \dot{m}_P können die Absolutwerte der Wärmebedarfsleistung der einzelnen Prozesse ermittelt werden (vgl. Gleichung (2-6)).

$$\dot{Q}_W = q_W \cdot \dot{m}_P \quad (2-6)$$

Aus der Summe der Wärmebedarfsleistungen der innerhalb eines Betriebs eingesetzten Prozesse errechnet sich die Gesamtwärmeleistung \dot{Q}_B des Betriebs B (vgl. Gleichung (2-7)).

$$\dot{Q}_B = \sum_{w=1}^W \dot{Q}_W \quad (2-7)$$

Somit kann der Wärmebedarf eines Betriebs in Abhängigkeit des Produktionsvolumens ermittelt werden.

Einen weiteren wichtigen Aspekt der Wärmebedarfsermittlung stellt die Art der Wärmeübertragung dar, welche die gewählte Methode zur Übertragung der Wärme von der Erzeugungstechnik zum Werkstoff bzw. Produkt bezeichnet. Hierbei kann im Wesentlichen zwischen

den drei Arten direkte Abgasnutzung, Prozessdampferzeugung und Übertragung auf Fluide (v. a. Luft oder Wasser) unterschieden werden. Die entsprechende Art der Wärmeübertragung wird bei der Aufnahme der Prozessrahmendaten mit erfasst. Diese Daten kommen später bei der Dimensionierung konkreter Einsatzaufgaben und bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung zum Tragen. Die Relevanz dieses Aspekts besteht darin, dass, je nach prozessseitig vorgegebener Art der Wärmeübertragung, unterschiedliche Temperatur-, Leistungs-, und Wärmemengenverluste auftreten, welche bei der Anlagendimensionierung kompensiert werden müssen. Zudem sind unterschiedliche Zusatzanlagen erforderlich (insbesondere bei der Dampferzeugung), die sich in der Wirtschaftlichkeitsrechnung bemerkbar machen. Die bei der Übertragung, insbesondere auf Dampfnetze, auftretenden energetischen Verluste ziehen ebenfalls wirtschaftliche und ökologische Auswirkungen nach sich.

Bei der dargestellten Vorgehensweise wird die gesamte Industrie in Deutschland zunächst in Branchen (z. B. Lebensmittel) und weiter in Betriebsarten (z. B. Brauerei, Molkerei, etc.) unterteilt. Die jeweiligen Schlüsselprozesse werden identifiziert und die einzelnen Parameter für die Gleichungen (2-5) bis (2-7) ermittelt. Durch Kopplung dieser Daten mit den jeweiligen Jahresproduktionsmengen lassen sich der absolute und der temperaturspezifische Wärmebedarf der verschiedenen Betriebsklassen und Industriebranchen bestimmen.

Die Ergebnisse der prozessspezifischen Wärmebedarfsermittlung für die Industrie sind branchenspezifisch in Kapitel 4 zusammengestellt. Dabei liegt der Schwerpunkt der Betrachtung im Nieder- und Mitteltemperatursegment, da hier die untersuchten Wärmeerzeugungstechniken ihre nutzbaren Temperatursegmente haben. Die Weiternutzung der Daten zur Kopplung mit verschiedenen Wärmeverteilungssystemen sowie zur technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken anhand relevanter Fallbeispiele erfolgt anschließend in Kapitel 5. Die Bestimmung der technischen Einsatzpotenziale der Wärmeerzeugungstechniken in ausgewählten Betrieben der Industrie wird in Kapitel 6 thematisiert.

2.5 Monte Carlo-Simulation

Bei komplexen Gleichungssystemen mit vielen Einflussparametern und komplizierten mathematischen Verknüpfungen ist in der Regel die Bestimmung einer analytischen Lösung nicht möglich. Stattdessen finden in der Praxis Behelfslösungen auf Basis von Näherungsverfahren bzw. iterationsbasierte Methoden Anwendung.

Beispielhaft für Näherungsverfahren ist dabei die Monte Carlo-Simulation zu nennen, die über das „Gesetz der großen Zahl“ durch Einsetzen verschiedener Parameterkombinationen aus jeweils vorgegebenen Wertebereichen und Werteverteilungen Lösungsbereiche und Zielwerteverteilungen ermittelt. Im vorliegenden Fall dient die Monte Carlo-Simulation zur Berücksichtigung bestehender technikseitiger und exogener Unsicherheiten beim Betrieb

verschiedener Wärmeerzeugungssysteme für industrielle Anwendungen über einen definierten Betrachtungszeitraum.

2.5.1 Grundlagen der Monte Carlo-Simulation

Mit der Monte Carlo-Simulation (MCS) lassen sich Unsicherheiten und statistisches Verhalten simulieren. Die Monte Carlo-Simulation kann vor allem als Alternative zur analytischen Lösung mathematischer Probleme, zur Bestimmung der Verteilungseigenschaften von Zufallsvariablen oder zur Nachbildung von komplexen Prozessen, die nicht direkt analysiert werden können, genutzt werden.

Mathematisch betrachtet ist das System ein wahrscheinlichkeitsgewichteter Weg im Phasenraum (allg. Zustandsraum). Monte Carlo-Simulationen sind besonders geeignet, um statistische Mittelwerte einer Größe A (vgl. Gleichung (2-8)),

$$\langle A \rangle = \sum_{x \in \Omega} P(x) A(x) \quad (2-8)$$

oder hochdimensionale Integrale wie bspw. in Gleichung (2-9)

$$\int_{x \in \Omega} P(x) A(x) d^n x \quad (2-9)$$

zu berechnen. $P(x)$ soll in diesem Zusammenhang ein normiertes statistisches Gewicht sein. $A(x)$ ist der Wert der Größe A im Zustand x . Die Summation bzw. Integration verläuft hier über einen Raum Ω , z. B. dem Phasenraum/Wertebereich der Teilchen im System. Häufig ist der Raum Ω allerdings so groß, dass die Summation nicht vollständig durchgeführt werden kann. Stattdessen wird eine sogenannte „Markow-Kette“ $x_1, x_2, x_3 \dots$ von Zuständen in Ω erzeugt, deren Häufigkeit wie das vorgegebene Gewicht $P(x)$ verteilt ist. Bereiche des Raums Ω mit hohem Gewicht sind also häufiger in der Markow-Kette vertreten als Bereiche mit niedrigem Gewicht. Dies bezeichnet man auch als sogenanntes „importance sampling“. Somit lassen sich die Erwartungswerte von A einfach als arithmetisches Mittel der Größe A zu diesen Zuständen der Markow-Kette berechnen, also gemäß Gleichung (2-10) als

$$\langle A \rangle \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A(x_i) \quad (2-10)$$

Dieser Zusammenhang basiert auf dem „Gesetz der großen Zahlen“. Dabei muss allerdings sichergestellt sein, dass die Markow-Kette tatsächlich den gesamten Raum Ω bedeckt, es sich also um einen ergodischen Algorithmus handelt, und nicht nur ein Teil des Raumes abgetastet

wird. Dies kann in der Praxis durch den Einsatz einer entsprechenden Software und die Wahl einer ausreichend großen Anzahl an Ziehungen gewährleistet werden.

Die erhaltenen Ziehungsergebnisse können mit Hilfe einer Korrelationsanalyse weiter ausgewertet werden. Das Ziel der Korrelationsanalyse im Rahmen einer MCS besteht in erster Linie in der Bestimmung der Intensivität einer bestehenden Beziehung zwischen den einzelnen Input- und Outputgrößen, d. h., hiermit lassen sich Rückschlüsse auf die Signifikanz der einzelnen Parameter und deren Bandbreiten durch die Gewichtung des Beitrags jedes Einzelparameters auf die Varianz der Zielgröße ziehen.

Dabei werden bereits während der Simulation zwischen jedem Ausgangswert und dem Zielwert Korrelationskoeffizienten berechnet, mit denen sich das Ausmaß quantifizieren lässt, in dem sich Dateninput und Zielwert verändern /Grob, Mrzyk 1997/.

Hierzu wird gemäß Gleichung (2-11) mit Hilfe der jeweiligen Mittelwerte \bar{x} bzw. \bar{y} der Korrelationskoeffizient $K(X, Y)$ berechnet:

$$K(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma(x) \cdot \sigma(y)} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sigma(x) \cdot \sigma(y)} \quad (2-11)$$

mit

Cov Kovarianz
 σ Standardabweichung vom Mittelwert

Die Korrelationskoeffizienten aller Einzelparameter lassen sich auf diese Weise ermitteln und betragsmäßig auf 100 % normieren, so dass den einzelnen Parametern entsprechende Korrelationsgewichte zugeteilt werden können, welche die Rangfolge der Parameter untereinander bestimmen.

Bei hohen Korrelationswerten einzelner Parameter empfiehlt sich eine genauere Untersuchung des entsprechenden Dateninputs, wohingegen bei niedrigen Korrelationswerten eine Reduktion des Datenaufwands bzw. sogar ein Verzicht auf entsprechende Variationschritte erwogen werden kann /Grob, Mrzyk 1997/.

Weitere sich aus der MCS ergebende Kennwerte sind der Medianwert, Minimum und Maximum, die Frequenz und die Wahrscheinlichkeitsverteilung.

Der **Medianwert** einer Verteilung gibt an, bei welchem Zahlenwert der Zielgröße genau 50 % der Ziehungen einen höheren bzw. genau 50 % aller Ziehungen einen niedrigeren Wert als den Median ausweisen.

Das **Minimum** zeigt den geringsten sich ergebenden Zahlenwert der Zielgröße aus allen durchgeführten Ziehungen, wohingegen das **Maximum** den entsprechend größten Zahlenwert der Zielgröße darstellt.

Die **Frequenz** bzw. **Wahrscheinlichkeit** spiegelt die Anzahl bzw. den Anteil der Ziehungen wider, für die ein bestimmter Zielgrößenbereich erreicht wird. Aus der Zusammenfassung aller sich ergebenden Zielgrößenbereiche resultiert die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Simulationsrechnung.

2.5.2 Anwendung der Monte Carlo-Simulation

Der erste Schritt für die MCS in der Untersuchung zur Kostenstruktur der industriellen Wärmeversorgung ist die Erstellung eines softwarebasierten Berechnungsschemas (bspw. in MS-Excel), das alle Einflussfaktoren auf die Wärmeversorgungskosten (wie bspw. Investitionskosten, fixe und variable Betriebskosten, aber auch Wirkungsgrad- und CO₂-Emissionsdaten sowie Angaben zum zeitlichen Verlauf des Wärmebedarfs) enthält. Aus dieser Datensammlung werden die zu variierenden Parameter ausgewählt sowie deren Wertebereich, die Gewichtung der Werteverteilung (bspw. gleichmäßige oder Normalverteilung) und die Anzahl der Ziehungen festgelegt. Des Weiteren sind die Zielgrößen zu bestimmen, deren Wertebereich und Wahrscheinlichkeitsverteilung ermittelt werden sollen, in diesem Fall die spezifischen Wärmeversorgungskosten sowie die betrieblichen CO₂-Emissionen. Anschließend kann der Simulations- bzw. Ziehungsprozess gestartet werden und an den sich die Ausgabe und die Interpretation der Ergebnisse anschließen.

Zur Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit der Zielgröße „Wärmeversorgungskosten“ werden für die verschiedenen analysierten Wärmeerzeugungstechniken ausgewählte Parameter der Wärmeversorgungskostenberechnung für verschiedene industrielle Verbraucher, wie etwa die Investitionskosten der Wärmeerzeugungssysteme, die Brennstoffpreise, die CO₂-Zertifikatspreise oder die Zinssätze im Rahmen der MCS variiert. Aus diesen Simulationen resultieren Angaben über den zu erwartenden Kostenbereich industrieller Wärmeversorgungssysteme und die Eintrittswahrscheinlichkeiten der einzelnen Kostenschätzungen. Zudem sollen die jeweiligen Relevanzen (Korrelationen) der einzelnen Einflussparameter für die unterschiedlichen Anwendungsfelder bestimmt werden. Damit lassen sich die unterschiedlich starken Einflüsse der einzelnen Parametervariationen auf die Zielgröße quantifizieren.

Außerdem werden analog die sich v. a. aus den Unsicherheiten bei den Wirkungsgraddaten ergebenden Verteilungen der CO₂-Emissionen der einzelnen Versorgungsvarianten für die betrachteten Anwendungsfälle ermittelt.

Für die im Rahmen der Untersuchungen zur Wärmeversorgung industrieller Verbraucher durchgeführten Monte Carlo-Simulationen wurde das Softwarepaket Crystal Ball /Crystalball 2008/ eingesetzt, das als Erweiterungsmodul für MS-Excel verfügbar ist. Damit lassen sich neben den Wahrscheinlichkeitsverteilungen auch die Korrelationskoeffizienten der einzelnen Parameter ermitteln.

3 Technische und wirtschaftliche Analyse ausgewählter derzeitiger und künftiger Wärmeerzeugungstechniken

Im Folgenden werden die betrachteten Technologien zur Wärmeerzeugung gemäß den im vorhergehenden Kapitel erläuterten Methoden untersucht. Dabei wird im ersten Schritt das jeweilige Funktionsprinzip der Techniken erläutert. Anschließend wird der Stand der Technik dokumentiert und die Komponentenzerlegung, welche die Basis der weiteren Untersuchungen bildet, beschrieben. Die weiteren Analysen auf Komponentenbasis umfassen die Bestimmung der derzeitigen Investitionskosten sowie der technischen und investitionskostenseitigen Entwicklungspotenziale. Dabei werden zur Ermittlung der investitionskostenseitigen Technikpotenziale komponentenbasierte Lernkurven eingesetzt.

Als erste Wärmeerzeugungstechnik werden Erdgasmotor-Blockheizkraftwerke (BHKW) betrachtet.

3.1 Motor-Blockheizkraftwerk (BHKW)

Motor-Blockheizkraftwerke tragen ihren Namen aufgrund der kompakten Bauweise, in der die Hauptbestandteile Antriebs-, Generator- und Wärmenutzungseinheit zusammengefasst sind. BHKW können sowohl gasförmige Brennstoffe, wie etwa Erdgas, Biogas, Klärgas oder Deponiegas, als auch flüssige Brennstoffe, wie etwa Diesel, Palmöl oder Methanol nutzen. Die vorliegende Untersuchung beschränkt sich auf die Betrachtung motorischer Blockheizkraftwerke, die mit Erdgas betrieben werden.

Kernstück eines jeden Motor-BHKW ist ein Verbrennungsmotor, wie er aus dem automobilen Bereich bekannt ist. Die abgegebene mechanische Leistung wird beim BHKW jedoch nicht zum Antrieb von Fahrzeugen, sondern in einem Generator zur Stromerzeugung genutzt. Der erzeugte Strom kann entweder an Ort und Stelle verbraucht, bspw. in einer Industrieanlage, oder ins Netz eingespeist werden. Die beim Betrieb anfallende Abwärme kann ebenfalls genutzt werden, bspw. für die Bereitstellung von Prozess- oder Raumwärme.

Typische Einsatzgebiete von BHKW sind die gewerbliche Strom- und Wärmeversorgung, die Gebäudeversorgung oder die Notstrom- und die Inselversorgung.

3.1.1 Stand der BHKW-Technik

BHKW sind bereits seit vielen Jahren am Markt vertreten. Der marktverfügbare Leistungsbe-
reich reicht von 5 kW_{el} bis $10 \text{ MW}_{\text{el}}$. Dabei sind insbesondere die spezifischen Investitionskosten und der elektrische Wirkungsgrad stark von der Leistungsgröße abhängig, obgleich die Komponentenzusammensetzung für alle Leistungsgrößen weitgehend identisch ist /ASUE 2006/.

Bei der Stromerzeugung in BHKW kann nicht der gesamte Energieinhalt des Brennstoffs zur Stromerzeugung genutzt werden, stattdessen wird ein Teil der Primärenergie in Wärme umgewandelt, die zur Nutzung entnommen werden kann. Diese Abwärme fällt an mehreren Stellen im BHKW und auf unterschiedlichen Temperaturniveaus an. Dabei handelt es sich um die Wasserkühlung (80 °C), die Schmierölkühlung (80 °C) sowie die Hochtemperaturskoppelung der Abgaskühlung (ca. 500 °C). Die beiden Niedertemperaturstufen können etwa 55 % der anfallenden Wärmemenge liefern, auf den Abgasstrom entfallen ca. 45 % /Richter 2003/. Wegen der unterschiedlichen Temperaturniveaus der verschiedenen Abwärmemengen ist besondere Vorsicht bei der Anlagendimensionierung für konkrete Anwendungen erforderlich. Dies gilt insbesondere bei der Prozessdampferzeugung, wo die Niedertemperaturwärme (NT-Wärme) höchstens zur Vorwärmung verwendet werden kann. In vielen Fällen der industriellen Anwendung von BHKW kann die NT-Wärme aufgrund hoher Rücklauftemperaturen von Prozessdampf- bzw. Heißwasserkreisläufen sogar lediglich saisonal zur Raumwärmebereitstellung bzw. für die Versorgung von NT-Prozessen genutzt werden.

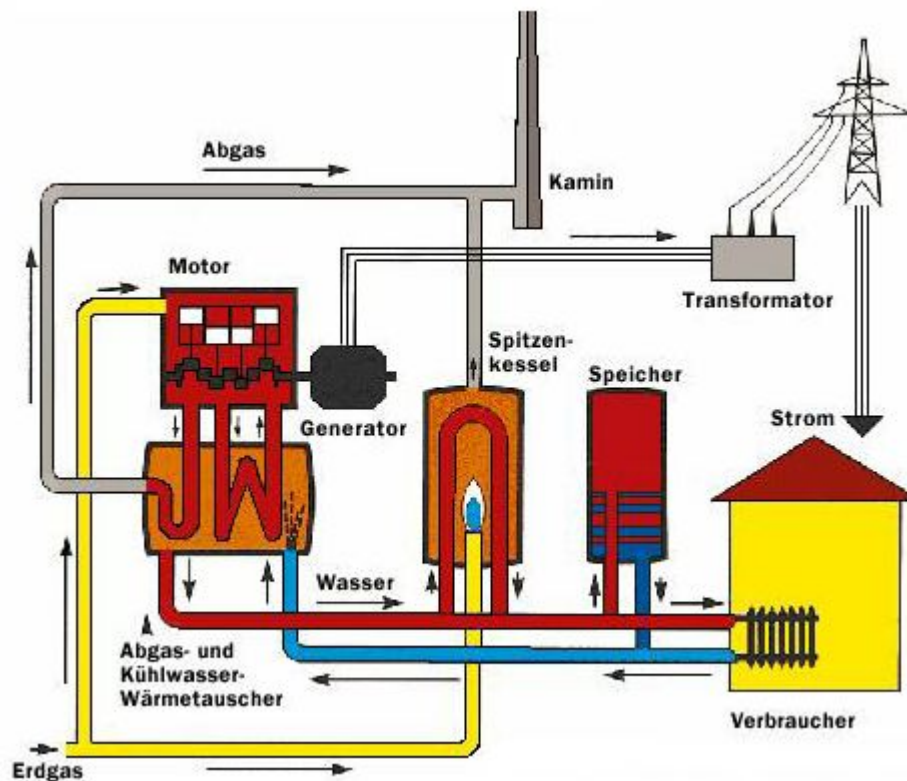


Abbildung 3-1: Prinzipschema eines erdgasbetriebenen motorischen Blockheizkraftwerks (BHKW) /Ruhrgas 2003/

In der Praxis erfolgt die Auslegung des BHKW nicht auf die tatsächlich auftretende thermische Maximallast, sondern in einem Bereich zwischen 70 und 90 %. Zur Spitzenlastabdeckung sowie zur Überbrückung von Stillstandszeiten wird das BHKW mit einem Spitzenlastkessel (bspw. mit Brennwerttechnik) gekoppelt. Der Spitzenlastkessel wird üblicherweise

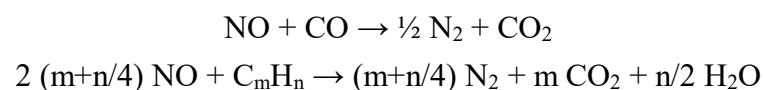
oberhalb der eingeplanten thermischen Maximallast dimensioniert, um auch für einen unerwarteten, kurzfristigen Mehrverbrauch Vorsorge zu treffen (Ausfallkessel).

Neben dem Verbrennungsmotor und dem Generator besitzt das BHKW mit den Wärmetauschern, der Steuerung und der Abgasreinigung weitere Baugruppen. Der schematische Aufbau eines BHKW ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

Komponenten

Für die Investitionskostenermittlung und die anschließende Lernkurvenanalyse wird das BHKW in die folgenden Baugruppen oder Komponenten untergliedert /ASUE 2006/.

- **KWK-Modul:** Das KWK-Modul umfasst den Motor mit Generator mit allen notwendigen Sicherheits- und Überwachungseinrichtungen sowie Anlagen zum Messen, Steuern und Regeln (MSR-Einrichtungen). Das Modul ist schall- und vibrationsgedämpft. Weiter enthält die Baugruppe komplett montierte und verrohrte Kühlwasserwärmetauscher, Abgaswärmetauscher sowie Vor- und Nachschalldämpfer, außerdem eine Kühlwasserpumpe und eine Gasregelstrecke, Startvorrichtungen sowie eine Leistungsregelung des Moduls.
- **Schalldämpfung:** Die Schalldämpfungseinheit besteht aus einer Schalldämmhaube sowie einer Schallschutzkabine zur Absenkung des Schalldruckpegels auf min. 75 dB (A) in 1 m Entfernung.
- **Abgasreinigung:** Kernstück der Abgasreinigung ist ein 3-Wege-Katalysator. Die prinzipiellen chemischen Reaktionen an einem 3-Wege-Katalysator sind die Reduktion von Stickoxiden (NO und NO₂) bei gleichzeitiger Oxidation von Kohlenwasserstoffen (C_mH_n) und Kohlenmonoxid (CO). Als Reaktionsprodukte entstehen Kohlendioxid (CO₂), Stickstoff (N₂) und Wasser (H₂O). Die Funktion des 3-Wege-Katalysators basiert auf der Abwesenheit von Sauerstoff im Abgas. Der Sauerstoff-Gehalt wird über eine Lambdasonde gemessen und der BHKW-Steuerung zugeführt. Ein Regelalgorithmus errechnet die Steuersignale und gibt diese an ein Stellventil in der Gaszufuhr aus, so dass der Motor mit stöchiometrischer Verbrennung betrieben wird ($\lambda = 1$). Bei dieser Betriebsweise ist kein Sauerstoff im Abgas vorhanden und die nachfolgenden Reaktionen können am 3-Wege-Katalysator stattfinden:



Die Auslegung des Katalysators erfolgt aufgrund der Motordaten wie Abgasmenge, Abgasemissionen und Abgastemperatur. Je nach Auslegung sind vor Eintritt in den Katalysator Mindesttemperaturen von 400° bis 500 °C notwendig.

Durch die Reaktionen im Katalysator erhöht sich die Abgastemperatur. Die Temperatur am Katalysatoraustritt beträgt im Hinblick auf die Standzeit nicht mehr als 650 °C /Schmitt Enertec 2009a/.

- **Schmierölver- und -entsorgung:** Diese Baugruppe besteht aus der Schmierölfüllung und den erforderlichen Leitungen inkl. Vorratsbehälter, Pumpen und automatischer Nachfülleinrichtungen.
- **Steuerung:** Die BHKW-Steuerung beinhaltet die Steuerung und Überwachung aller Funktionen des Aggregats. Sie ist mit einem Bedien- und Anzeigedisplay ausgerüstet, mit dem verschiedene Betriebsarten angewählt, sowie alle Soll- und Grenzwerte, Analogwerte und Regelparameter angezeigt und verändert werden können. Über ein Bussystem können mehrere Aggregate, bspw. auch ein Spitzenlastkessel, sowie eine zentrale Steuerung miteinander kommunizieren /Schmitt Enertec 2009b/.
- **Be- und Entlüftung:** Die Luftversorgung besteht aus der kompletten Lüftungsanlage inkl. Ventilatoren und Lüftungskanal /ASUE 2006/.

Das daraus resultierende Anlagenschema des BHKW mit den wichtigsten Bauteilen, Stoff- und Energieflüssen ist in Abbildung 3-2 dargestellt. Im Beispiel erfolgt die gesamte Wärmeauskopplung über einen Wärmekreislauf auf Niedertemperaturniveau, bspw. für Raumwärmeanwendungen.

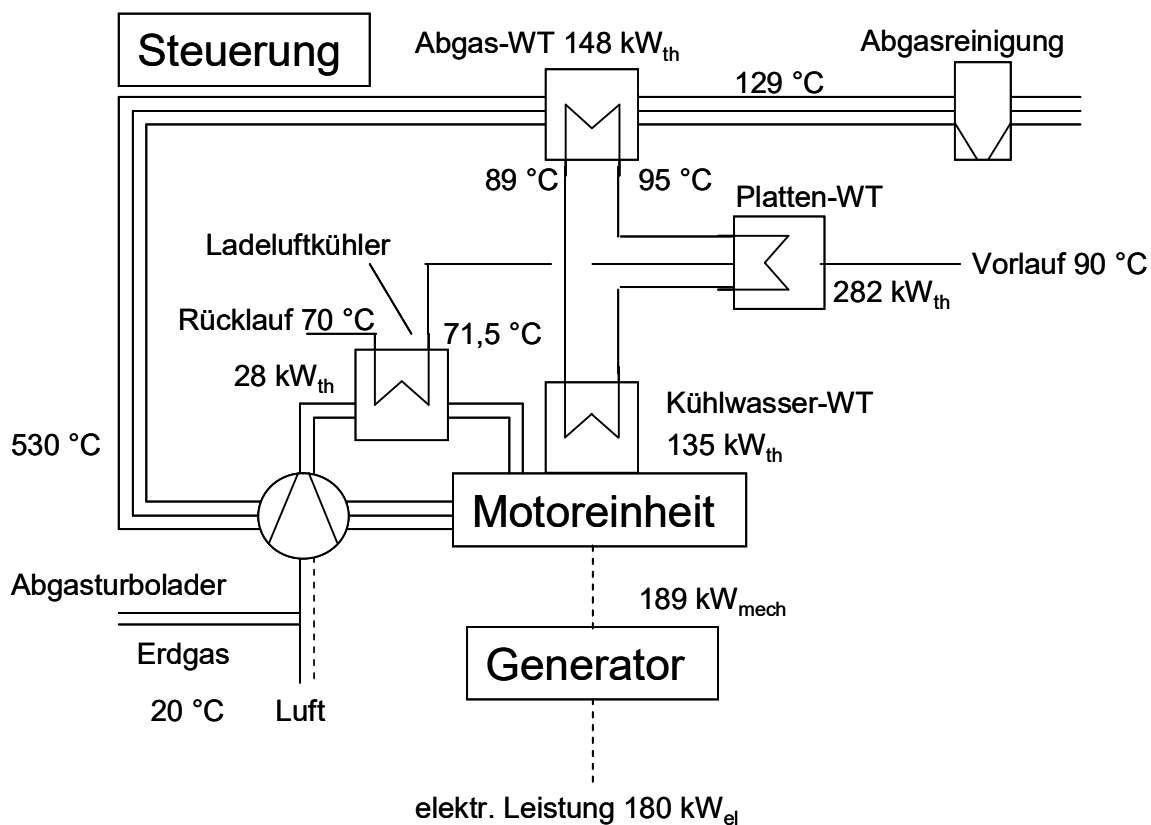


Abbildung 3-2: Anlagenschema eines BHKW mit einer elektrischen Leistung von 180 kW_{el}

Als Referenzgröße wird ein BHKW mit einer elektrischen Leistung von 180 kW_{el} und zunächst 311 kW_{th} betrachtet. Die Umrechnung der Kennwerte auf weitere Anlagengrößen erfolgt anhand der ermittelten Skalierungskennwerte.

Wirkungsgradbetrachtung

Auf heutigem Stand können BHKW mit einer Leistung von 180 kW_{el} einen elektrischen Wirkungsgrad von 35 % und einen thermischen Wirkungsgrad von 52 % /ASUE 2006/ erreichen. Für Anlagen mit einer Leistungsgröße von 6.790 kW_{el} beträgt der elektrische Wirkungsgrad 46 %, der thermische Wirkungsgrad liegt bei 39 % /ASUE 2006/.

Bei BHKW variieren die elektrischen und thermischen Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Leistungsgröße. Aus den Daten von /ASUE verschiedene Jahrgänge/ lassen sich langjährig quasistabile Skalierungsexponenten für den elektrischen Wirkungsgrad von 0,082 für den elektrischen und, bezogen auf den jeweiligen thermischen Wirkungsgrad, von -0,094 für den thermischen Wirkungsgrad ohne Brennwertnutzung ermitteln. So ergibt sich gemäß Gleichung (3-1) für den heutigen elektrischen Wirkungsgrad von BHKW näherungsweise der Zusammenhang:

$$\eta_{el} = 22,863 \cdot P_{el}^{0,082} \quad (3-1)$$

mit

η_{el} elektrischer Wirkungsgrad in %

P_{el} elektrische Leistung in kW_{el}

Für den entsprechenden thermischen Wirkungsgrad ohne Brennwertnutzung gilt demnach Gleichung (3-2):

$$\eta_{th} = 92,869 \cdot P_{el}^{-0,094} \quad (3-2)$$

mit

η_{th} thermischer Wirkungsgrad in %

P_{el} elektrische Leistung in kW_{el}

Der thermische Wirkungsgrad kann derzeit durch den Einsatz von Brennwertnutzungsstufen um maximal weitere fünf Prozentpunkte /ASUE 2006/ gesteigert werden. Der jeweilige Zuschlagswert für den erreichten Wirkungsgradzuwachs durch die Brennwertnutzung wird anwendungsbezogen addiert. Hintergrund ist, dass die Brennwertwärme auf einem sehr geringen Temperaturniveau unterhalb von 60 °C /Martinus et al. 2005/ anfällt und daher nur bei entsprechend intensiver Nutzung der anfallenden NT-Wärme des BHKW relevant wird.

Die Lernkurvenanalyse des elektrischen Wirkungsgrads ergibt auf Grundlage der Daten von /ASUE verschiedene Jahre/ und /Ruhrgas 2003/ eine Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads von BHKW bei Verdoppelung der kumulierten installierten Leistung um den Faktor 1,03. In der Vergangenheit konnte dieser geringe Fortschritt nicht auf konkrete Maßnahmen zurückgerechnet werden, sondern ergab sich durch Verbesserungen der mechanischen Verarbeitung, der Steuerung und veränderter Materialauswahl /Energytech 2002/.

3.1.2 Komponentenbasierte Ermittlung der technischen Potenziale

Nachfolgend werden die technischen Entwicklungspotenziale der BHKW-Technik auf Basis der im zurückliegenden Abschnitt vorgenommenen Komponentenzerlegung abgeschätzt.

Technische Entwicklungspotenziale BHKW

Das Primärziel der technischen Weiterentwicklung der BHKW-Technik ist die Steigerung des elektrischen Anlagenwirkungsgrads. Bei den BHKWs handelt es sich um eine technisch bewährte und am Markt etablierte Technik, bei der keine konkreten Ansatzpunkte für exakt quantifizierbare Fortschritte auszumachen sind. Stattdessen ist damit zu rechnen, dass auch in naher Zukunft allgemeine Technikfortschritte für die BHKW-Technik adaptiert werden, wie etwa eine verbesserte Steuersoftware (Lastmanagement) sowie geringere Reibungsverluste durch verstärkten Einsatz keramischer und nanotechnischer Beschichtungen im Motorblock. Im Generatorbereich werden bereits Wirkungsgrade von über 98 % erzielt /IGW 2009/, hier sind nur geringe weitere Optimierungspotenziale zu erwarten.

Die Brennwertnutzung ist in vielen Modellen über nahezu alle Größenkategorien bereits integriert /ASUE 2006/. Langfristig ist mit einer kompletten Verfügbarkeit der Brennwerttechnik in allen Modellen zu rechnen. Allerdings ist zu beachten, dass sich entsprechende Investitionen nur bei Abnahmestellen im Temperaturbereich der Kondensation bei etwa 47 °C amortisieren lassen. Somit können sämtliche Anwendungen mit Prozessdampferzeugung nicht vom Einsatz der Brennwerttechnik profitieren. Stattdessen ergeben sich sinnvolle Einsatzmöglichkeiten bei Raum- und Prozesswärmesystemen mit entsprechend geringer Rücklauftemperatur sowie zur Warmwasserbereitung.

Vom maximal erzielbaren Effekt der Brennwertnutzung bei Erdgaseinsatz, einer Steigerung des thermischen Wirkungsgrads um elf Prozentpunkte, sind fünf Prozentpunkte bereits erreicht /ASUE 2006/. Bei der Brennwertnutzung bestehen keine nennenswerten leistungsgrößenabhängigen Unterschiede des Wirkungsgradzugewinns (vgl. Kapitel 3.3). Durch Verbesserungen der Strömungsführung, bei der Materialauswahl (dünnere Wandstärken bei konstanter oder höherer thermischer und mechanischer Stabilität) und durch nanotechnische Beschichtungen /Lambauer et al. 2008/, die zu geringeren Reibungsverlusten führen, sind marginale Wirkungsgradverbesserungen von maximal drei Prozentpunkten zu erwarten (vgl. Kapitel 3.3). Da diese Veränderungen auch in der nicht-brennwertbezogenen Wärmeauskopp-

lung eingesetzt werden können, kann zusätzlich der eigentlich zu erwartende Rückgang des thermischen Wirkungsgrads infolge höherer Stromausbeute ausgeglichen werden.

In vielen BHKW ist die Abgasturboverdichtertechnik bereits integriert. Der Einsatz der Abgasverdichtung wird aus Gründen der Investitionskosten senkung weiter forciert, indem höhere Druckverhältnisse eingesetzt werden. Hieraus ergibt sich allerdings kein Wirkungsgradzuwachs, sondern auf Grund des Energiebedarfs des Verdichtungsschritts tendenziell Verluste, die auch in der bisherigen Entwicklung von den technischen Verbesserungen an anderen Stellen aufgefangen wurden (vgl. Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Überblick Wirkungsgradentwicklung BHKW 180 kW_{el} /ASUE 2006/, /eigene Berechnungen/, Ruhrgas 2003/, /Rumpel 1996/, /Rumpel 1997/, /Blesl et al. 2004/

Kategorie		heute	Potenzial 2030
Elektrische Leistung	[kW _{el}]	180	180
Thermische Leistung incl. Brennwertnutzung	[kW _{th}]	267/310	270/315
Elektr. Wirkungsgrad	[%]	35,0	36,6
Therm. Wirkungsgrad	[%]	57,0	60,0
Brennwertnutzung	[%]	5,0	8,0
Max. Gesamtwirkungsgrad	[%]	92,0	96,6

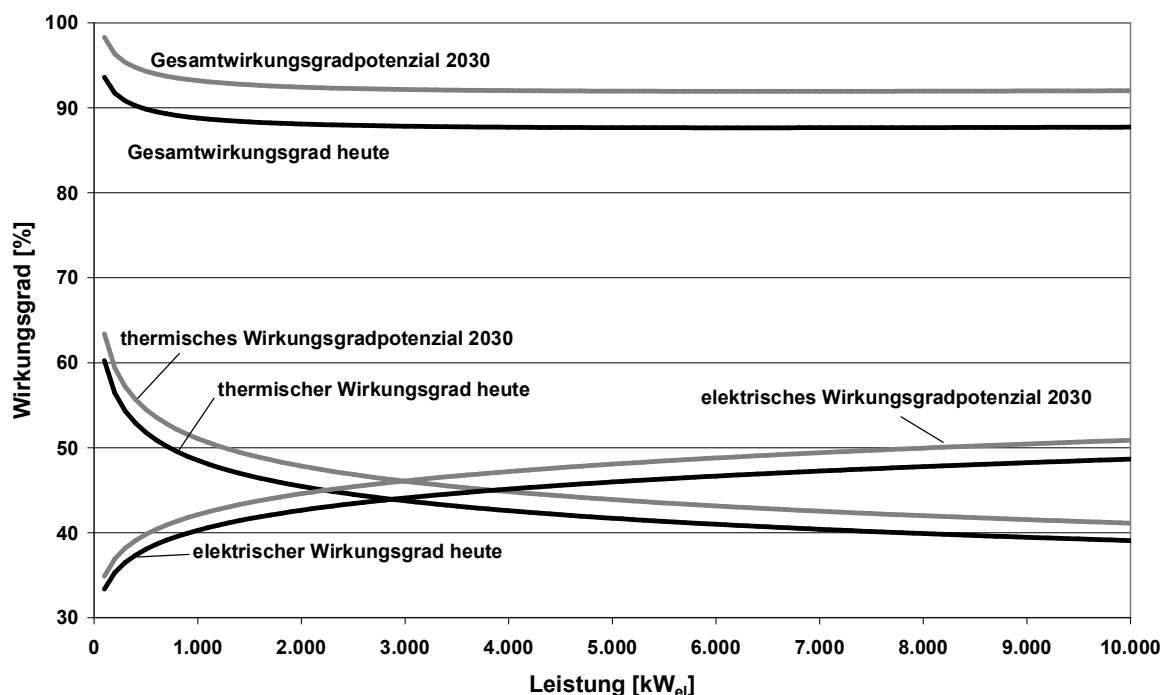


Abbildung 3-3: Wirkungsgradpotenziale der BHKW-Technik heute bzw. im Jahr 2030 im Leistungsbereich bis 10 MW_{el}

Ansatzpunkte für die v. a. aus wirtschaftlichen Gründen wünschenswerte Multifunktionalisierung einzelner Komponenten, die zu einer Reduktion der Zahl der verwendeten Bauteile

führt, sind bei BHKW derzeit nicht zu erkennen, d. h., es kann von einer konstant bleibenden Baugruppenzahl ausgegangen werden.

Es ergeben sich für den Betrachtungszeitraum Zuwachsmöglichkeiten vor allem aus der serienmäßigen Verfügbarkeit der Brennwertnutzung und leicht verbesserter Technik. Im Fall der untersuchten 180 kW_{el}-Anlage steigt der maximal mögliche thermische Wirkungsgrad von 57 auf 60 %. Dagegen fallen die möglichen Zuwächse beim elektrischen Wirkungsgrad von 35 auf 36,6 % etwas geringer aus.

Aus den Ergebnissen der Skalierung der BHKW-Leistung ergeben sich maximale elektrische Wirkungsgrade von 50,9 % für eine Anlagengröße von 10 MW_{el} in 2030. Für diese Anlagengröße steigt der thermische Wirkungsgrad bis 2030 von 39,1 % auf maximal 41,1 % (vgl. Abbildung 3-3).

3.1.3 Komponentenbasierte Ermittlung der wirtschaftlichen Kennwerte mit Größenskalierung

Die komponentenbasierte Ermittlung der wirtschaftlichen Kennwerte der BHKW-Technik mit Größenskalierung befasst sich mit der Entwicklung der spezifischen Investitionskosten der einzelnen Komponenten für unterschiedliche Anlagenleistungen. Hierzu wird eine Bestandsaufnahme der Investitionskosten auf Basis /ASUE 2006/, der Größenskalierungsfaktoren der Investitionskosten auf Basis /ASUE verschiedene Jahre/ sowie eine Lernkurvenanalyse der einzelnen BHKW-Komponenten auf Basis /ASUE verschiedene Jahre/ bzw. /Ruhrgas 2003/ durchgeführt. Die Größenskalierungsfaktoren der einzelnen Komponenten haben sich als zeitlich nahezu konstant /ASUE 1996/, /ASUE 2006/ erwiesen. Aus der Kombination der Lernkurvenfortschreibung mit etwaigen investitionskostenrelevanten Ansatzpunkten des technischen Fortschritts können dann die künftigen Investitionskosten für Erdgas-BHKW abgeschätzt werden.

Die Betrachtung der spezifischen Investitionskostenentwicklung erstreckt sich bis zum Jahr 2030. Da es sich bei der BHKW um einen ausgereifte, marktverfügbare Technik handelt, ist mit dem Verzicht auf einzelne Komponenten bzw. der weiteren Multifunktionalisierung einzelner Baugruppen nicht zu rechnen. Aus diesem Grund können sich für die BHKW Investitionskostenenkungen lediglich aus der Fortschreibung der komponentenspezifischen Lernkurvenreihen unter Berücksichtigung der floor costs ergeben. Dabei wird für die jährliche Zubaurate der durchschnittliche jährliche Anlagenzubau der letzten Jahre in Höhe von 858 MW_{el}/a /Ruhrgas 2003/ angesetzt. Dabei werden auch komponentenspezifische floor costs /Blesl et al. 2004/, /eigene Recherche/ berücksichtigt. Die entsprechenden Werte für die floor costs und die bis 2030 mit Hilfe des komponentenbasierten Lernkurvenansatzes abgeschätzten spezifischen Komponenteninvestitionskosten sind in Tabelle 3-2 aufgeführt. Die Berechnung der derzeitigen und künftigen spezifischen Investitionskosten weiterer BHKW-Leistungsgrößen erfolgt mit Hilfe der in Abschnitt 2.1.1 dargestellten Formel.

Tabelle 3-2: Lernkurvenentwicklungsdaten BHKW 180 kW_{el} /ASUE 2006/, /eigene Berechnungen/, /Ruhrgas 2003/, /Rumpel 1996/, /Rumpel 1997/, /Blesl et al. 2004/, /Energytech 2002/

Komponente	Spez. Investitionskosten heute	Skalierungsfaktor	Lernfaktor	Floor costs	Spez. Investitionskostenpotenzial 2030
	[€/kW _{el}]	[-]	[-]	[€/kW _{el}]	[€/kW _{el}]
KWK-Modul	436	0,63	0,80	-	314
Schalldämpfung	38	0,59	0,38	29	29
Abgasreinigung	9	0,20	0,02	7	7
Schmierölversorgung	14	0,59	0,30	12	12
Steuerung	91	0,59	0,96	50	86
Luftzu- und -abfuhr	107	0,97	0,77	80	80
Brennwertnutzung	32	0,72	1,00	30	32
SUMME	727	0,67	0,91	-	560

Die Entwicklung der Investitionskosten in der Skalierung über den gesamten Leistungsbe-
reich (vgl. Abbildung 3-4) ergibt bis 2030 einen Investitionskostenbereich zwischen 682
(100 kW_{el}) und 177 €/kW_{el} (10 MW_{el}).

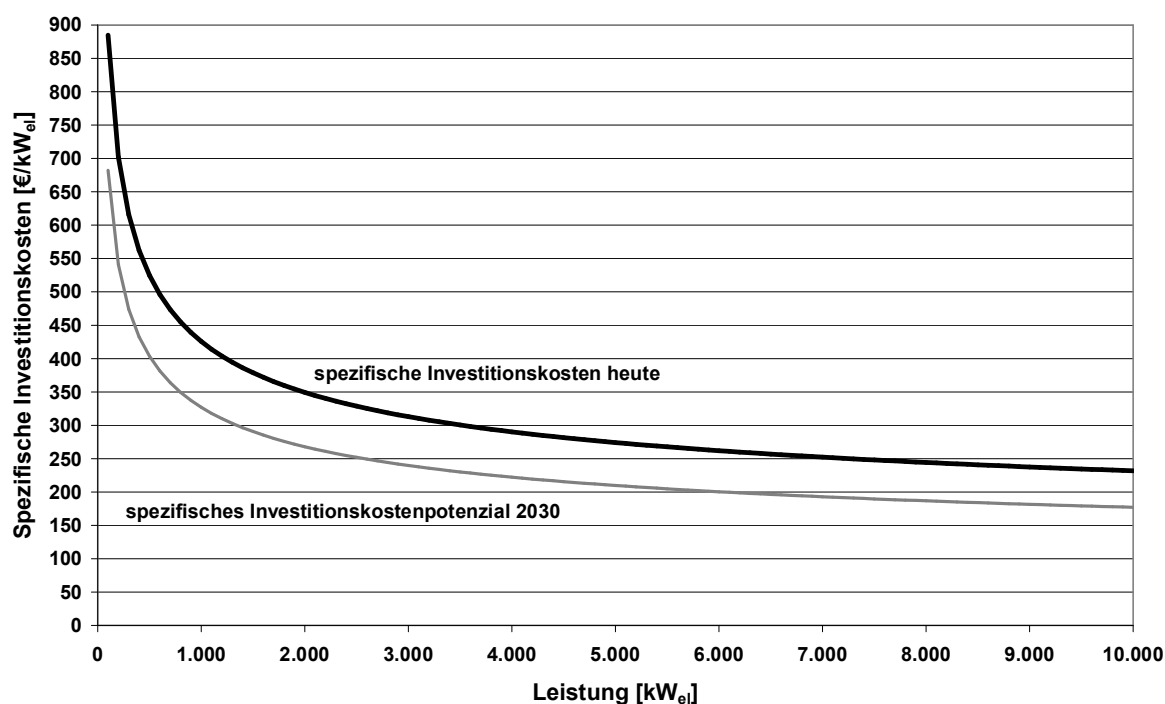


Abbildung 3-4: Leistungsgrößenbezogener Verlauf der spezifischen BHKW-Investitionskostenpotenziale für heute und 2030 im Bereich bis 10 MW_{el}

3.1.4 Zusammenfassung BHKW

Der derzeit am Markt verfügbare Leistungsbereich von Erdgas-BHKW reicht von Kleinstanlagen mit einer elektrischen Leistung von 5 kW_{el} bis zu einer Obergrenze von etwa 10 MW_{el}. Damit ist das Marktsegment bereits jetzt voll abgedeckt, für eine - ohnehin nur noch nach oben mögliche - Erweiterung des Leistungsspektrums gibt es keine Anzeichen.

Die auf dem heutigen Stand erreichbaren elektrischen Wirkungsgrade von Erdgasmotor-BHKW reichen leistungsgrößenabhängig von 20 (Kleinanlagen) bis etwa 48 % (10 MW_{el}). Die spezifischen Investitionskosten bewegen sich derzeit in einem Bereich zwischen etwa 900 €/kW_{el} für kleinere Anlagen (100 kW_{el}) und 230 €/kW_{el} für Großanlagen.

Wegen der Ausgereiftheit der Technik sind nur marginale Verbesserungspotenziale auszumachen, wobei der Fortschritt eher kontinuierlich denn punktuell erfolgt. Bei der Komponenten-zusammensetzung ist beim BHKW nicht mit signifikanten Änderungen zu rechnen. Bis 2030 sind für die Referenzgröße von 180 kW_{el} maximale elektrische Wirkungsgradverbesserungen auf 36,6 % möglich, durch den Skalierungseffekt wächst dieser Vorteil bei Großanlagen bis auf 50,9 % für Anlagenleistungen von 10 MW_{el} an. Der thermische Wirkungsgrad beträgt dann 60 % für die Referenzgröße bzw. 41 % bei 10 MW_{el}, wobei die Vorteile bei der Wärmeerzeugung vor allem durch die Vervollständigung der Brennwertnutzung in der gesamten Angebotspalette erzielt werden.

Für die BHKW-Technik ergeben sich mögliche Verbesserungen der Investitionskostenseite v. a. durch Lerneffekte, weniger durch Leistungssteigerungen in Folge weiterer Erhöhungen des Druckverhältnisses der Turboaufladung. Für Großanlagen von 10 MW_{el} sinken die spezifischen Investitionskosten bis 2030 von heute 230 €/kW_{el} bis auf bestenfalls 177 €/kW_{el}. Für kleinere Anlagen mit einer Leistung von 100 kW_{el} ergibt sich eine mögliche Kostenreduktion von 885 auf 682 €/kW_{el}.

3.2 MCFC-Brennstoffzellen

Das Prinzip der Brennstoffzelle wurde bereits im 19. Jahrhundert von Grove entdeckt, jedoch bald vom dynamoelektrischen Prinzip in den Hintergrund gedrängt. Erst ihr Einsatz bei Welt-raummissionen brachte die Brennstoffzelle wieder zurück ins Blickfeld. Mittlerweile werden Brennstoffzellen wegen der hohen erzielbaren elektrischen Wirkungsgrade und der damit verbundenen geringen spezifischen Emissionen für unterschiedliche stationäre, mobile oder portable Anwendungen thematisiert. Durch den Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellen können die Nachteile der Energieerzeugung auf fossiler Basis – die Endlichkeit der Primär-energiequellen und die erheblichen ökologischen Auswirkungen - gemindert werden /Ohl 2002/.

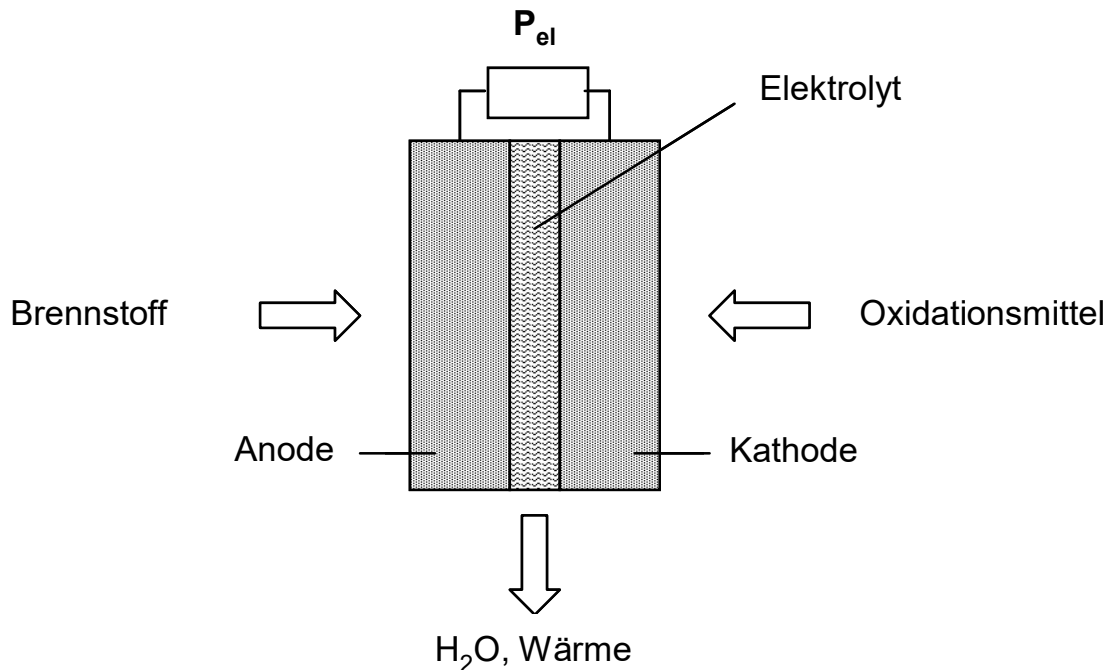


Abbildung 3-5: Funktionsprinzip von Brennstoffzellen /Ohl 2002/

Die Brennstoffzellentechnologie basiert auf der chemischen Synthese von Wasser aus Wasserstoff und Sauerstoff. Unter normalen Bedingungen läuft dieser Vorgang unkontrolliert ab, und die Energie der Bindungselektronen geht als Reaktionsabwärme verloren. In Brennstoffzellen dagegen werden diese Elektronen aufgefangen und ins Stromnetz abgegeben, die verbleibenden Ionen werden in einem Elektrolyten kanalisiert und mit den aus dem Stromnetz zurückgeführten Elektronen zu Atomen und Wassermolekülen rekombiniert. Das Bauteil, in dem der membranförmige Elektrolyt angesiedelt ist, verleiht der (Brennstoff)zelle ihren Namen, auch MEA genannt (membrane electrode assembly). Mehrere zur Leistungssteigerung hintereinandergeschaltete Zellen ergeben einen Stack. Der prinzipielle Aufbau und die Funktionsweise sind in Abbildung 3-5 dargestellt.

Die Brennstoffzelle kommt mit einem einzigen Umwandlungsschritt von der chemischen zur elektrischen Energie aus und kann ein höheres elektrisches Wirkungsgradpotenzial generieren, als die auf dem Rankine-Prozess basierenden traditionellen Stromerzeugungstechniken.

Als Elektrolyten kommen unterschiedliche Materialien in Frage, nach denen die einzelnen Brennstoffzelltypen benannt sind. Als Werkstoffe haben sich Kalilauge (alkalische Brennstoffzelle AFC), Kunststoffe (Polymermembranbrennstoffzelle PEMFC, Direktmethanolbrennstoffzelle DMFC), Phosphorsäure (phosphorsaure Brennstoffzelle PAFC), Alkalischmelzen (Schmelzkarbonatbrennstoffzelle MCFC) und spezielle Keramiken (Festoxidbrennstoffzelle SOFC) erwiesen. Da die Ionenleitfähigkeit der einzelnen Elektrolytmaterialien stark temperaturabhängig ist, ergeben sich für jeden Zelltyp charakteristische Betriebstemperaturen.

Tabelle 3-3: Basisdaten zu den einzelnen Brennstoffzelltypen /VIK 1999/, /Ohl 2002/

	AFC alkalische Brennstoffzelle	PEMFC Membranbrenn- stoffzelle	DMFC Direktmethanol- brennstoffzelle	PAFC Phosphorsaure Brennstoffzelle	MCFC Schmelzcarbonat- Brennstoffzelle	SOFC oxidkeramische Brennstoffzelle
Elektrolyt	Kallilauge (30%) in fester Matrix	Protonenleitende Membran (z. B. Nafion R 117, Dow)		konzentrierte Phosphorsaure	Alkalikarbonat- schmelzen	YSZ (ZrO ₂ /YO ₃)
Betriebstemperatur [°C]	80	80	80-130	200	650	800-1000
Elektroden	Ni/Ag bzw. Pt/Pt	Pt, PtRu/Pt		Pt/Pt	Ni/NiO	Ni- YSZ/(LaSr)MnO ₃
Anodenreaktion	$H_2 + 2 OH^- \rightarrow 2 H_2O + 2 e^-$	$H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$			$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2 e^-$	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2 e^-$
Kathodenreaktion	$0,5 O_2 + H_2O + 2 e^- \rightarrow 2 OH^-$	$2 H^+ + 0,5 O_2 + 2 e^- \rightarrow H_2O$			$0,5 O_2 + CO_2 + 2 e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	$0,5 O_2 + 2 e^- \rightarrow O^{2-}$
Gesamtreaktion		$H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$			$H_2 + 0,5 O_2 + CO_2 \rightarrow H_2O + CO_2$	$H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$
Brennstoffe	H ₂	H ₂ , CH ₃ OH, CH ₄	H ₂ , CH ₃ OH	H ₂ , CH ₄	CH ₄ , CH ₃ OH	H ₂ , CH ₄ , Kohlegas
erreichbarer elektr. Zell- wirkungsgrad [%]	60-70	50-68	20-30	55	65	60-65
Vorteile	sehr hohe Leistungs- dichte, sehr zuverlässig	kurze Anlaufzeiten, korrosionsbeständig		kein reines H ₂ notwendig	verschiedene Brennstoffe nutzbar, Ab- wärmenutzung zur Stromerzeugung mög- lich, CO-tolerant	
Nachteile	H ₂ und O ₂ in hoch- reiner Form not- wendig	teure Katalysatoren erforderlich		Pt-Katalysator, niedrige Leis- tungsdichte	starke Werkstoffbeanspruchung durch hohe Temperatur, lange Anlaufzeiten	
Anwendungen	Militär, Raumfahrt	stationäre und mobile Anwendungen, Fahr- zeuge		stationäre Anwendungen, Kraftwerke		

AFC, PEMFC und DMFC weisen einen Arbeitsbereich zwischen 60 °C und 130 °C auf und bilden damit die Gruppe der Niedertemperaturbrennstoffzellen, die PAFC repräsentiert die Mitteltemperaturbrennstoffzellen, MCFC und SOFC mit 570–1.000 °C die Hochtemperaturbrennstoffzellen. Die wichtigsten Daten zu den einzelnen Brennstoffzellentypen sind in Tabelle 3-3 zusammengefasst.

Die verschiedenen Brennstoffzelltypen eignen sich für unterschiedliche Anwendungen. Die AFC ist für den Dauerbetrieb auf hochreinen Wasser- und Sauerstoff angewiesen und somit nur für Projekte ohne nennenswerte Kostenrelevanz, wie etwa die Elektrizitätsversorgung von Satelliten und Raumschiffen, einsetzbar. PEMFC und DMFC sind wegen ihrer niedrigen Betriebstemperaturen vor allem für mobile Anwendungen wie PKW von Bedeutung, daneben bietet sich auch die Möglichkeit, die mit reformiertem Erdgas betriebene PEMFC zur Beheizung von Gebäuden einzusetzen. Die Mittel- und Hochtemperaturbrennstoffzellen sind für die dezentrale Stromerzeugung interessant, die hier anfallende Abwärme kann zusätzlich zur Dampferzeugung, Wärmeversorgung oder zur weiteren Stromproduktion in Dampf- bzw. Gasturbinen genutzt werden. Ein zusätzlicher Vorteil der Mittel- und Hochtemperaturbrennstoffzellen ist deren größere Brennstoffvariabilität. Während Niedertemperaturbrennstoffzellen mit CO-freien Energieträgern betrieben werden müssen, ist im Mittel- und Hochtemperaturbereich eine höhere Toleranz gegenüber derartigen Verunreinigungen vorhanden, so dass lediglich Schwefelverbindungen und andere Spurstoffe aus dem Eduktstrom abgetrennt werden müssen, wodurch diese Anlagen mit Erdgas oder Biogasen aus unterschiedlichen Quellen betrieben werden können. Dabei kann in den Hochtemperatursystemen ein Teil der anfallenden Abwärme zur energetisch günstigen internen Reformierung dieser Gase genutzt werden. Bei der internen Reformierung werden mit Hilfe der Brennstoffzellenabwärme die Methananteile des jeweiligen Eduktgases mit Wasserdampf bei möglichst hohen Temperaturen zu Kohlendioxid und reinem Wasserstoff umgewandelt. Letzterer kann anschließend in der Brennstoffzelle umgesetzt werden. Der dazu notwendige Sauerstoff kann, außer bei der AFC, aus der Umgebungsluft bezogen werden.

Die größten Schwierigkeiten für den Durchbruch von Brennstoffzellen zur Alltagstauglichkeit liegen in den Kosten und der flächendeckenden Verfügbarkeit von Wasserstoff. Da noch keine Produktion in industrieller Größenordnung (Serienfertigung) existiert, liegen die Investitionskosten sehr hoch und sind gegenüber etablierten Technologien, wie BHKW-Verbrennungsmotoren oder Dampfturbinen, heute nicht konkurrenzfähig.

Die weitere Untersuchung konzentriert sich auf die MCFC-Brennstoffzelle, da diese der derzeit einzige Brennstoffzellentyp mit Betriebserfahrung in der Energieversorgung industrieller Anlagen ist und der seit mehreren Jahren in Demonstrationsanlagen praktisch erprobt wird /Blesl et al. 2006/. Außerdem ist die MCFC nicht auf Wasserstoff angewiesen, sondern kann v. a. kohlenwasserstoffhaltige gasförmige Brennstoffe, wie Erdgas oder verschiedene biogene Gase, nutzen.

Bei der PAFC, der AFC und der PEMFC sind die Entwicklungstätigkeiten im industriellen Leistungsbereich eingestellt, bei der SOFC findet eine Neukonzeptionierung nach mehreren Demonstrationsläufen statt /Blesl et al. 2006/.

3.2.1 Stand der Technik der MCFC-Brennstoffzelle

Als charakteristische Leistungsgröße der MCFC wird zunächst eine Anlage mit einer Leistung von $250 \text{ kW}_{\text{el}}$ bzw. $180 \text{ kW}_{\text{th}}$ betrachtet, entsprechend der typischen Leistungsgröße der Demonstrationsanlagen. Die Ergebnisse der Bilanzierung für diese charakteristische Anlagengröße dienen später als Grundlage der Skalierungen über den gesamten untersuchten Leistungsbereich.

Komponentenzerlegung

Die Analyse der MCFC erfolgt gemäß der nachfolgend aufgeführten und beschriebenen Komponenten und Baugruppen. Die Kostendaten beziehen sich auf das Referenzjahr 2005.

- **Zellstack:** In den Zellen findet die eigentliche Erzeugung von Elektrizität statt. Zur Erzielung hoher elektrischer Leistungen werden mehrere Zellen zu einem Stack zusammengefasst, wobei sich die elektrische Leistung der einzelnen Zellen addiert. Außerhalb von Brennstoffzellensystemen existieren keine technischen Anwendungen für diese Zellen. Die spezifischen Investitionskosten des Stack für das Jahr 2005 betragen für die betrachtete Anlagengröße ca. $3.359 \text{ €/kW}_{\text{el}}$ /Blesl et al. 2006/.
- **Steuerung:** Das Steuerungssystem, bestehend u. a. aus Sensoren, Sicherheitsventilen, Steuerungsprogramm, Steuerrechner und Benutzeroberfläche, reguliert und sichert den Betrieb der Anlage. Die spezifischen Investitionskosten der Steuereinheit für das Jahr 2005 betragen für die betrachtete Anlagengröße ca. $870 \text{ €/kW}_{\text{el}}$ /Blesl et al. 2006/.
- **Inverter:** Das Bindeglied zwischen Brennstoffzelle und Stromnetz bildet der Inverter, der den in der Brennstoffzelle erzeugten Gleichstrom in Wechselstrom umformt und eine Spannungstransformation durchführt. Inverter werden auch bei anderen Technologien der Stromerzeugung eingesetzt. Die spezifischen Investitionskosten des Inverters für das Jahr 2005 betragen für die betrachtete Anlagengröße $91 \text{ €/kW}_{\text{el}}$ /Blesl et al. 2006/.
- **Einbauten:** Unter dem Begriff „Einbauten“ werden v. a. Kleinteile wie Rohre, Ventile, Strömungsleitbleche etc., die in Brennstoffzellensystemen des industriellen Maßstabs in großer Zahl vorkommen, zusammengefasst. Weitere Peripheriekomponenten umfassen herstellerabhängig zusätzliche Sicherheitseinrichtungen (z. B. Stickstoffspülung), Demineralisationseinheit zur Reinigung des bei der Reformierung zugegebenen

Wassers und die Brenngasentschwefelung /Blesl et al. 2004/. Die spezifischen Investitionskosten liegen bei ca. 1.515 €/kW_{el} /Blesl et al. 2006/.

- **Wärmetauscher und Reformier:** Die Wärmetauscher der MCFC dienen zur Vorwärmung von Erdgas und Reformierwasser sowie zur Dampferzeugung und Abwärmenutzung. Die übertragenen Wärmemengen werden aus der anfallenden Reaktionsabwärme entnommen. Zum Anfahren der Anlage werden externe Wärmequellen genutzt (vgl. Einbauten).

Eine spezielle Art der Wärmetauscher findet sich in der Reformiereinheit von Hochtemperaturbrennstoffzellen. Die am Wärmetransport beteiligten Oberflächen sind brenngasseitig mit katalytisch wirksamen und chemisch beständigen Materialien beschichtet und ermöglichen damit eine optimierte Wasserstoffgewinnung. Durch kompakte Abmessungen werden hohe flächenspezifische Übertragungsleistungen erforderlich. Die im Reformier übertragene Wärme dient in erster Linie zur Bereitstellung des chemischen Energiebedarfs der Reformierreaktion, die Temperatur des Brenngasstroms bleibt nahezu konstant. Die spezifischen Investitionskosten der Wärmetauschereinheit für das Jahr 2005 betragen für die betrachtete Anlagengröße 211 €/kW_{el} /Blesl et al. 2006/.

- **Gebläse:** Gebläse haben in Brennstoffzellensystemen die Aufgabe, die Zu- und Abfuhr von Gasen aufrechtzuerhalten sowie Druckverluste auszugleichen. Neben kompakten Abmessungen ist auch die Resistenz gegenüber hohen Temperaturen erforderlich. Die spezifischen Investitionskosten der Gebläse für das Jahr 2005 betragen für die betrachtete Anlagengröße 27 €/kW_{el} /Blesl et al. 2006/.
- **Katalytischer Brenner:** Im katalytischen Brenner werden an der Anode nicht umgesetzte Restkonzentrationen von H₂ und CO mit Luftsauerstoff zu H₂O und CO₂ verbrannt. Hierdurch wird der Anteil brennbarer bzw. giftiger Substanzen in der Abluft reduziert. Andererseits steigt durch die Nachverbrennung der Grad der Brennstoffausnutzung, und die Kathodenseite des Stack kann mit der höchstmöglichen CO₂-Konzentration angeströmt werden. Die spezifischen Investitionskosten des katalytischen Brenners für das Jahr 2005 betragen für die betrachtete Anlagengröße 178 €/kW_{el} /Blesl et al. 2006/.
- **Gehäuse:** Das Gehäuse kapselt den heißen Reaktionsraum mit dem Wasserstoff-CO₂-Luftgemisch gegenüber der Umwelt ab. Neben dem Schutz gegen thermische Spannungen muss das Gehäuse auch ausreichende chemische Stabilität, v. a. gegen Wasserstoffversprödung, bieten. Das Gehäuse von Brennstoffzellen ist mit geringem technischen Aufwand aus metallischen Werkstoffen zu fertigen. Die spezifischen Investitionskosten des Gehäuses für das Jahr 2005 betragen für die betrachtete Anlagengröße 127 €/kW_{el} /Blesl et al. 2006/.

Bei den aufgeführten Baugruppen kann teilweise auf Standardkomponenten, wie z. B. Wärmetauscher, zurückgegriffen werden. Die in die wichtigsten Komponenten und Baugruppen zerlegte MCFC ist in Abbildung 3-6 dargestellt.

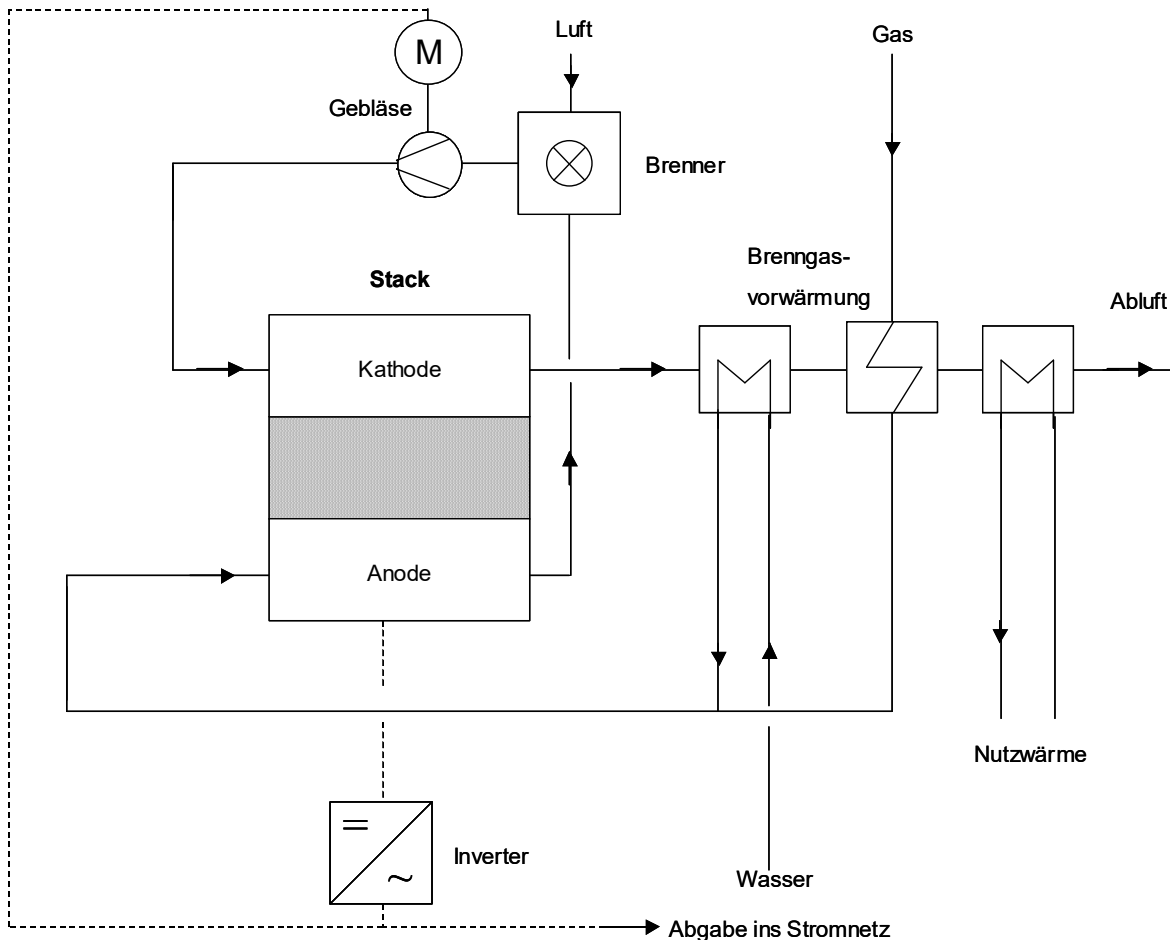


Abbildung 3-6: Anlagenschema einer MCFC-Brennstoffzelle

Wirkungsgradbetrachtung

Für die angegebene Leistungsgröße beträgt der erreichbare elektrische Wirkungsgrad 47,0 %, der maximale thermische Wirkungsgrad liegt bei 34 % /Blesl et al. 2006/. Stackseitig bringt eine Erhöhung der elektrischen Leistung keine Wirkungsgradvorteile, lediglich bei der internen Reformierung mit separatem Reformierbauteil ergeben sich durch größere chemisch aktive Oberflächen Vorteile in der Umsatzrate, die allerdings mit der Elimination des eigenständigen Reformierbauteils (vgl. 3.2.2) wieder verschwinden. Der thermische Wirkungsgrad kann durch Brennwertnutzung um weitere fünf Prozentpunkte gesteigert werden. Da der elektrische Wirkungsgrad größenunabhängig betrachtet wird, bleibt auch der thermische Wirkungsgrad über den betrachteten Leistungsbereich für identische Anwendungsbedingungen konstant.

3.2.2 Komponentenbasierte Ermittlung der technischen Potenziale

Im folgenden Schritt werden die technischen Entwicklungspotenziale der MCFC als Summe der Optimierungsmöglichkeiten der Einzelkomponenten bzw. Baugruppen ermittelt.

- **Stack:** Die Leistungsdichte des Stacks kann, u. a. durch verbesserte Elektrodenaktivierung, von 0,7 auf 1 kW_{el}/Zelle gesteigert werden /Weißmann, Reinhardt 2004/, außerdem erfolgt eine weitere Verbesserung der eingesetzten Elektrolytmaterialien /Gerboni et al. 2005/. Der elektrische Wirkungsgrad des Stacks erhöht sich in der Folge von derzeit 55 auf 58 % /Rolf 2001/. Beim Stack als zentralem Bestandteil sind keine apparativen Vereinfachungen durch Verzicht auf einzelne Komponenten zu erwarten. Die wirtschaftliche Perspektive des Stacks basiert v. a. auf der avisierten Einführung von Verfahren zur Massenproduktion und der Steigerung der Leistungsdichte, wodurch weniger Zellen pro Stack gebraucht werden /Blesl et al. 2006/. Dagegen wird die ursprünglich auch für die MCFC-Technologie favorisierte Absenkung der Betriebstemperatur von 650 °C auf Werte um 600 °C offenbar nicht weiterverfolgt. Hier wäre mit negativen Auswirkungen auf die Umsetzungsgrade der endothermen internen Reformierung zu rechnen, die schlimmstenfalls die Integration weiterer Komponenten (Zusatzbrenner) erforderlich machen würden. Hierdurch wären negative Auswirkungen sowohl auf die Anlagenwirkungsgrade als auch auf die Investitionskosten der Gesamtanlage zu erwarten /Blesl et al. 2006/. Auch eine Erhöhung des Betriebsdrucks der MCFC erscheint wegen der hohen Drucksensibilität der MEA in Folge des im Betrieb flüssigen Elektrolytmaterials derzeit trotz theoretisch möglicher Wirkungsgradsteigerung und der kostensparenden Verringerung von Wärmeübertragerflächen nicht sinnvoll /Blesl et al. 2006/.
- **Reformer:** Die separate Reformereinheit entfällt mit der Einführung der zellinternen Reformierung vollständig /Blesl et al. 2006/. Stattdessen wird stackintern auf Nickelbasis reformiert. Bei einem Nickelpreis von 2,4 \$/kg können die durch diese Maßnahme im Stackbereich entstehenden Mehrkosten vernachlässigt werden. /Blesl et al. 2006/. Durch den Verzicht auf den Reformer als eigenständige Baugruppe sinken die Investitionskosten. Ein nennenswerter Sprung bezüglich der Anlagenwirkungsgrade ergibt sich durch diese Maßnahme nicht, da bereits die räumlich weiter von der MEA entfernte separate Reformierstufe nur ein geringes Optimierungspotenzial aufwies /Ohl 2002/.
- **Wärmetauscher:** Die Vorwärmstufen für Wasser und Erdgas können durch behälterinternes Aufwärmen komplett entfallen. Dieser Schritt ist allerdings erst für die nächste MCFC-Generation nach 2015 vorgesehen /Blesl et al. 2006/. Beim Abgaswärmetauscher soll auch eine Brennwertnutzung integriert werden können /Blesl et al. 2006/. Das Abwärmeaufkommen der MCFC bleibt unter diesen Umständen in etwa konstant, da sich die thermischen Leistungsverluste durch Steigerung des elektri-

schen Wirkungsgrads und die infolge Brennwertnutzung möglichen Wärmegewinne die Waage halten.

- **Inverter:** Bei der Stromrichtung lässt sich der Wirkungsgrad durch Softwareoptimierung von 93,5 bis auf 95 % steigern /Engler et al. 2005/. Eine Reduktion von Funktionen zur apparativen Vereinfachung des Gesamtsystems ist bei diesem Bauteil nicht zu erwarten. Kostenseitig lagen die Inverter bei den ersten Demonstrationsanlagen bei 94 €/kW_{el}. Mittlerweile sind Kosten von 91 €/kW_{el} /Blesl et al. 2006/ erreicht.
- **Gehäuse:** Die ursprünglichen spezifischen Kosten lagen bei 538 €/kW_{el}, mittlerweile sind 400 €/kW_{el} erreicht /Blesl et al. 2004/. Ursprünglich war eine werkstoffseitige Umstellung von der Stahlsorte 1.4571 mit Materialkosten von etwa 4.000 €/t /BMST 2005/ auf preiswertere Legierungen favorisiert worden, wie sie durch sinkende chemische Stabilitätsanforderungen in Folge der gesteigerte Haltbarkeit der aggressiven Stackmaterialien möglich wären. Mittlerweile wird allerdings eine Reduktion der Wandstärke auf die Erfordernisse des atmosphärischen Betriebs propagiert und für den Start der Serienfertigung angekündigt /Blum 2003/. Damit verabschiedet sich der Hersteller von Ambitionen druckbetriebener MCFC-Anlagen. Die Materialaufwendungen für das Gehäuse in Höhe von 40.000 € sinken somit um etwa 50 %. Unter Berücksichtigung der Bearbeitungskosten gemäß /Ehrlenspiel et al. 2000/ ergeben sich Kosten von 127 €/kW_{el}. /Blesl et al. 2006/
- **Gebläse:** Durch Verbesserungen der Gasströmungsführung sinkt der Bedarf auf nur noch ein Gebläse pro Anlage. Gleichzeitig kann der Wirkungsgrad des Gebläses auf 85 % gesteigert und die Leistungsgröße aufgrund des höheren Stackwirkungsgrads gesenkt werden /Blesl et al. 2006/. Trotz der erreichten Verbesserung bei der Strömungsführung sind bisher keine Ansätze erkennbar, dass die Funktion des Gebläses in Gänze entbehrlich werden könnte /Blesl et al. 2006/. Der baugrößenverkleinernde Effekt durch einen steigenden Stackwirkungsgrad und die damit einhergehende Verringerung der umzuwälzenden Gasströme ist vernachlässigbar. Damit senken effektivere Gebläse v. a. die Betriebskosten durch den geringeren Eigenbedarf und den somit steigenden Nettowirkungsgrad der Anlage. Lediglich die Anzahl wird sich von zwei auf ein Aggregat bei gleichbleibender Leistung reduzieren /Blesl et al. 2006/.
- **Einbauten:** Bei den Einbauten sinken die Investitionskosten durch den vollständigen Verzicht auf die Gaschromatographieanlage um 100.000 €/Anlage. Die Gaschromatographie gehörte zur Grundausstattung der Demonstrationssysteme, ihre Aufgabe lag in der Fehlersuche und der Betriebsdatendokumentation. Zusätzlich sollen die Entschwefelungsstufen von Aktivkohle auf Zeolithsiebe umgestellt werden, wodurch sich Vorteile bei der Standzeit ergeben /Blesl et al. 2006/.
- **Steuerung:** Für die Umstellung auf Serienfertigung ist von der Herstellerfirma eine Reduktion der Messstellenzahl von 90 auf 10 angekündigt /Blum 2003/. Hierdurch kann das gesamte System wesentlich vereinfacht und die entsprechenden Kosten ein-

gespart werden. /Blesl et al. 2006/. Eine Umstellung der Steuerung auf feste Leiterplatten zur Einsparung von Investitionskosten, wie in der Hausenergieversorgung angestrebt, ist im Bereich gewerbliche KWK nicht realistisch, da während der langen Betriebszeit (> 15 a) der Anlagen mit hohen Ansprüchen an die Flexibilität der Betriebsweise zu rechnen ist /Blesl et al. 2006/. Stattdessen kann die Steuerung zur weiteren Verbesserung des Betriebsverhaltens sowie zur Erhöhung der Flexibilität und der Sicherheit durch den Einsatz zellinterner Sensorplatinen unterstützt werden. Diese Technologie wird bereits bei PEMFC und SOFC erprobt und ist prinzipiell auch für den Einsatz in MCFC ein Thema /Blesl et al. 2006/.

Der Systemwirkungsgrad der MCFC steigt durch die Realisierung der aufgeführten Verbesserungen der Einzelkomponenten von 47 % auf 51,5 % (vgl. Tabelle 3-4), wobei der überwiegende Teil der Wirkungsgradsteigerung auf das Konto von Inverter und Stack geht. Beim thermischen Wirkungsgrad ergibt sich die Steigerung ausschließlich aus der eingeführten Brennwertnutzung.

Tabelle 3-4: Überblick Wirkungsgradentwicklung MCFC 250 kW_{el} /eigene Berechnungen/, /Blesl et al. 2004/

Kategorie	heute	Potenzial 2030
	[%]	[%]
Elektr. Wirkungsgrad	47,0	51,5
Therm. Wirkungsgrad	34,0	39,0
Gesamtwirkungsgrad	81,0	90,5

3.2.3 Komponentenbasierte Ermittlung der investitionskostenseitigen Potenziale mit Größenskalierung

Die Ermittlung der Investitionskostenpotenziale der MCFC erfolgt komponentenbezogen. Dabei werden einerseits die wirtschaftlichen Auswirkungen der technischen Weiterentwicklung aus Abschnitt 3.2.2 übernommen, andererseits die sich im Laufe der Produktionszeit ergebenden Lerneffekte für die einzelnen Baugruppen abgeschätzt. Bei der Beurteilung des Kostenreduktionspotenzials der Einzelkomponenten infolge von Lerneffekten werden die Kosten heute bereits in industrieller Serienproduktion gefertigter Vergleichskomponenten recherchiert und als floor costs in die Betrachtung integriert (vgl. Kapitel 2.3.1.) /Blesl et al. 2004/. So wurden die Kosten von Invertern, wie sie in der Stromerzeugung (z. B. in Photovoltaik-Anlagen), im Maschinenbau und der Elektrotechnik Anwendung finden, ausgewertet und als Vergleichskosten angesetzt. Für die Steuerung, das Gehäuse und die Kesselbauarten wurden Vergleichskosten aus der Gebäudetechnik bzw. dem Kraftwerksbau herangezogen. Für die Bestimmung der Zielkosten wurde daher die bisherige Kostenreduktion unter der Voraussetzung fortgeschrieben, dass maximal die Kosten der Vergleichskomponente erreicht werden können /Blesl et al. 2004/.

Als kumulierte Produktionsmenge dienen für die präkommerzielle Phase die in /Blesl et al. 2004/ aufgeführten Leistungskennwerte der MCFC-Demonstrationsanlagen sowie für die Serienfertigungsphase die vom Hersteller ausgelegte maximale Fertigungskapazität von $70 \text{ MW}_{el}/a$ /Blesl et al. 2006/ als Grundlage.

Die sich ergebenden Komponentenrahmendaten sind in Tabelle 3-5 aufgeführt.

Tabelle 3-5: Komponentenrahmendaten MCFC 250 kW_{el} /Blesl et al. 2006/, /Blesl et al. 2004/, /Unverzagt 1995/, /Jablonski 1999/, /Berger 1999b/, /Helfrich, Schubert 1973/

Komponente	Spez. Investitionskosten heute	Skalierungsfaktor	Lernfaktor	Floor costs	Spez. Investitionskostenpotenzial 2030
	[€/kW _{el}]	[-]	[-]	[€/kW _{el}]	[€/kW _{el}]
Stack	3.359	1	0,78	-	139
Steuerung	661	0	0,81	90	90
Inverter	100	0,459	0,87	70	70
Wärmetauscher	223	0,72	0,89	-	0
Einbauten	1.357	0,72	0,89	250	390
Brenner	159	0,90	0,89	30	65
Gebälse	28	0,742	0,89	10	11
Gehäuse	387	0,53	0,82	70	122
SUMME	6.275	0,84	0,82	-	797

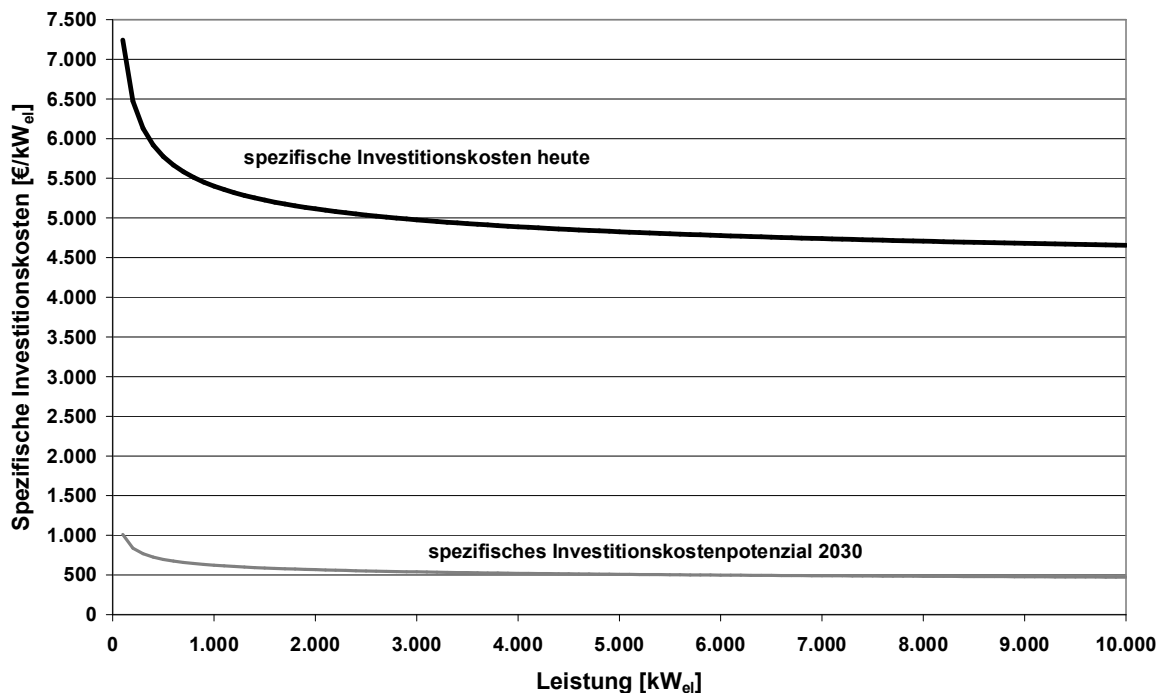


Abbildung 3-7: Leistungsgrößenbezogener Verlauf der spezifischen MCFC-Investitionskostenpotenziale für heute und 2030 im Bereich bis 10 MW_{el}

Für die Referenzgröße von 250 kW_{el} ergeben sich Kostensenkungspotenziale von aktuell 6.275 €/kW_{el} auf 797 €/kW_{el} , entsprechend einer möglichen Reduktion um 87 % (vgl. Abbildung 3-7).

Dabei weisen der Stack und die Anlagenperipherie (Einbauten) die mit Abstand größten Einsparpotenziale auf, die sich durch Einführung der Serienfertigung realisieren lassen. Am oberen Ende des betrachteten Leistungsspektrums bei $10 \text{ MW}_{\text{el}}$ ergeben sich Kostensenkungspotenziale von 4.657 auf 473 €/kW_{el}.

3.2.4 Zusammenfassung Brennstoffzellen

Für zukünftige Anwendungen im Bereich der Industrie bietet aus dem Bereich der Brennstoffzellen aufgrund der technischen Voraussetzungen (Temperaturniveau) und der bereits erreichten Entwicklungsfortschritte v. a. die MCFC an.

Bei den erdgasbetriebenen MCFC-Systemen handelt es sich um Vorserienanlagen mit einer elektrischen Leistung von $250 \text{ kW}_{\text{el}}$ bei einem elektrischen Systemwirkungsgrad von 47 %. Die nutzbare Abwärmeleistung beträgt $180 \text{ kW}_{\text{th}}$ bei einem thermischen Wirkungsgrad von 34 %. Derzeit steht nur diese eine Anlagengröße zur Verfügung. Im Zuge der Serienproduktion ist mit zunehmender Marktdurchdringung auch mit weiteren Systemgrößen zu rechnen. Als maximal verfügbare Leistungsgröße wird von $10 \text{ MW}_{\text{el}}$ ausgegangen /Blesl et al. 2004/.

Für den elektrischen Systemwirkungsgrad wird eine Weiterentwicklung bis auf einen Maximalwert von 51,5 % über den Betrachtungszeitraum abgeschätzt. Der thermische Wirkungsgrad beträgt dann, inklusive Brennwertnutzung, maximal 39 %. Für die Wirkungsgradkennwerte sind bei einer Anlagenvergrößerung keine nennenswerten Änderungen zu erwarten.

Durch die technische Weiterentwicklung und die dabei angestrebte Systemvereinfachung werden die Investitionskosten der MCFC reduziert. Weitere investitionskostenseitige Verbesserungen ergeben sich aus der Einführung der Serienfertigung und aus Lerneffekten. Bis 2030 können aus der Kombination der genannten Schritte unter günstigen Umständen die spezifischen Investitionskosten einer $250 \text{ kW}_{\text{el}}$ -Anlage auf etwa 800 €/kW_{el} gesenkt werden. Bei der MCFC ist mit steigender Anlagengröße mit weiteren Verbilligungen zu rechnen. So könnten die spezifischen Investitionskosten für die $10 \text{ MW}_{\text{el}}$ -Anlage im Betrachtungszeitraum bis auf 473 €/kW_{el} sinken.

Mit den aufgeführten Optimierungsansätzen weisen MCFC-Anlagen trotz erheblicher Investitionskostensenkungspotenziale über das gesamte Leistungsspektrum im Betrachtungszeitraum immer noch deutliche Nachteile bezüglich der spezifischen Investitionskosten gegenüber dem BHKW auf, die in Bezug auf die Gesamtwirtschaftlichkeit nur durch Vorteile bei den Betriebskosten ausgeglichen werden können, bspw. durch eine höhere Stromausbeute (mögliche höhere Einnahmen aus der Stromabgabe bzw. geringere Primärenergiekosten). Hierzu bedarf es geeigneter Anwendungsgebiete, bei denen die MCFC ihre möglichen Vorteile beim elektrischen Wirkungsgrad über möglichst viele Volllaststunden ausspielen kann.

3.3 Erdgasbrennwertkessel

Seit den 80-er Jahren des letzten Jahrhunderts sind Brennwertkessel für kommerzielle und private Anwendungen am Markt verfügbar. Brennwertkessel sind für verschiedene Energieträger, wie etwa Erdgas oder Heizöl, spezifiziert. Die vorliegende Untersuchung konzentriert sich auf den Erdgasbrennwertkessel, dem aus energetischer Sicht effizientesten Vertreter dieser Technik.

3.3.1 Stand der Technik

Brennwertkessel sind eine Weiterentwicklung konventioneller Heizkesselsysteme (Niedertemperaturkessel), bei denen aus dem Abgasstrom zusätzliche Wärmemengen durch Kondensation des Wasseranteils, der bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen entsteht, gewonnen werden. Damit lässt sich der Energieinhalt des Brennstoffs über den Heizwert H_u hinaus nutzen, wodurch Wirkungsgrade $> 100\%$, bezogen auf den H_u -Wert, erreicht werden können. Statt des Heizwerts bildet dann der Brennwert H_o des jeweiligen Brennstoffs die Obergrenze der Energieausbeute des Verbrennungsprozesses. Bei der Verwendung von Erdgas beträgt der als theoretisches Maximum zusätzlich gewinnbare Anteil 11% . Bei Heizöl sind es lediglich 6% , da durch dessen gegenüber Erdgas geringeres H/C-Verhältnis weniger Wasserdampf entsteht und somit auch kleinere Kondensationswärmegewinne erzielt werden können /Martinus et al. 2005/.

Zu den weiteren Vorteilen von Brennwertkesseln gehören die Eignung für unterschiedliche Brennstoffe (Heizöl/Erdgas/Biogase), der kompakte und platzsparende Aufbau, die geringen Schadstoffemissionen, die geringe Lärmentwicklung, der hohe Modulationsgrad sowie ein gutes Preis-Leistungsverhältnis durch ein hohes Maß an Systemintegration von Brenner und Kessel. Außerdem erlauben die geringeren Volumenströme den Einsatz kleinerer Armaturen und senken die Investitionskosten. Zusammen mit den Einsparungen bei den Primärenergieträgern ergibt sich in der Praxis in vielen Fällen eine hohe Wirtschaftlichkeit mit kurzen Amortisationszeiten /Martinus et al. 2005/.

Der Betrieb eines Brennwertkessels für die Raumwärmebereitstellung erfordert relativ niedrige Rücklauftemperaturen zwischen 25 und 60 °C . Je niedriger die durch die Anwendung bestimmte Rücklauftemperatur eingestellt werden kann, desto effizienter kann der Brennwertkessel in der Gesamtsystembetrachtung betrieben werden, da der Anteil des kondensierten Wasserdampfs mit sinkender Temperatur steigt. Die Vorlauftemperatur der Raumwärmebereitstellung beträgt in der Regel zwischen 35 und 60 °C , in Ausnahmefällen bis 90 °C .

Für den industriellen Einsatz von Brennwertkessel sind für die Abdeckung höherer Prozesstemperaturen Modifikationen bei der Strömungsführung und den Wärmetauscherflächen erforderlich.

Brennwertkessel sind bereits seit Mitte der 80-er Jahre in einem Leistungsbereich von 10 bis 500 kW_{th} am Markt verfügbar. Für industrielle Anwendungen sind Temperaturen bis etwa 600 °C realisierbar.

Bei der Brennwerttechnik handelt es sich um eine Querschnittstechnologie, die auch im Rahmen anderer Techniken der Strom- und Wärmeerzeugungstechnik einsetzbar ist (vgl. bspw. Kapitel 3.1 oder 3.2). Zudem werden Brennwertkessel in der Praxis der industriellen Energieversorgung als Spitzenlast- und Reservekessel bei BHKW- oder Brennstoffzellenanlagen eingesetzt.

Der Aufbau des Erdgasbrennwertkessels ist beispielhaft in Abbildung 3-8 dargestellt.

Das Temperaturniveau der Kondensation beträgt bei Erdgasbrennwertkesseln 57 °C. Im Kondensator findet eine weitere Abkühlung der Rauchgase bis auf 45 °C statt /Viessmann 2002/.

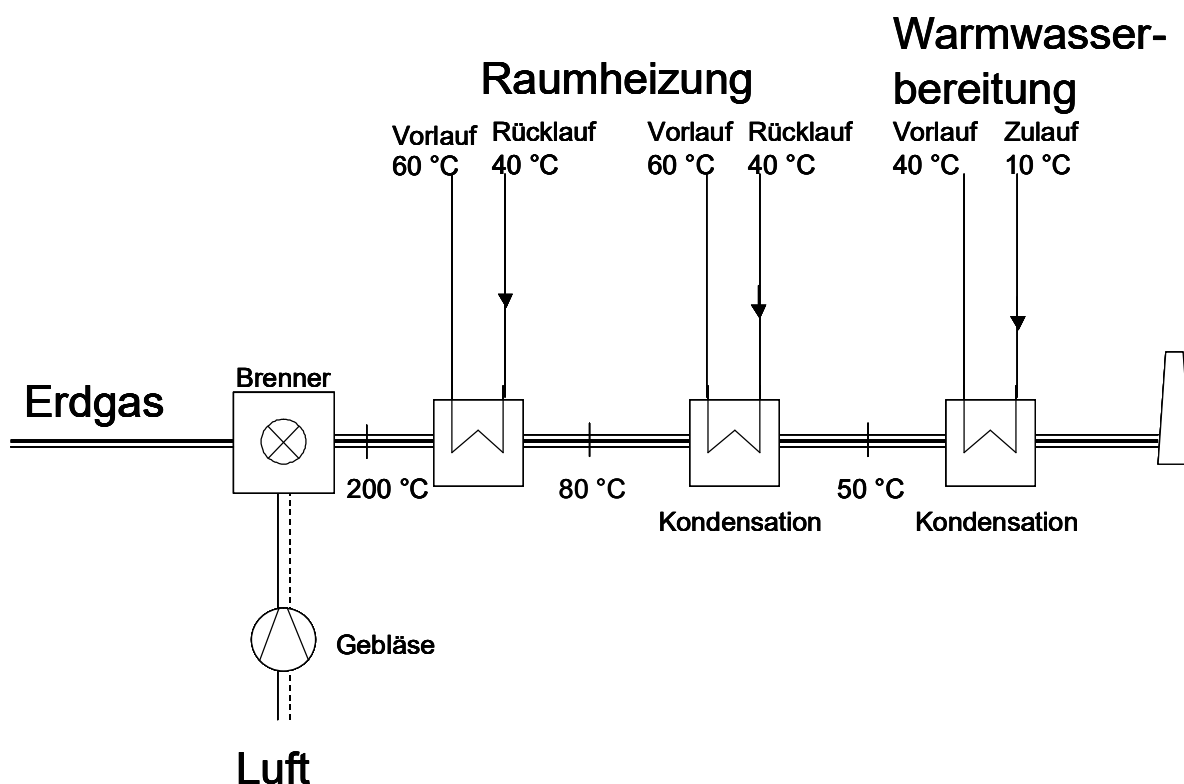


Abbildung 3-8: Anlagenschema Brennwertkessel für den Anwendungsfall Gebäudeversorgung /Martinus et al. 2005/

Komponentenzerlegung

Zu den wesentlichen Komponenten des Brennwertkessels gehören Gebläse, Brenner, Wärmetauscher, sowie Anschlüsse für Gas und Wärmeträgermedium, Steuerung und Gehäuse.

- **Brenner:** Die Aufgabe der Baueinheit Brenner besteht in der Zuführung, Dosierung und Vermischung von Brennstoff und Luft sowie der anschließenden Zündung des

Gemischs. Modulierende Brenner, die auch verschiedenen Teillastzustände abdecken können, sind mittlerweile Stand der Technik. Hierdurch wird der u. a. energetisch ungünstige getaktete Betrieb mit zahlreichen An- und Abfahrvorgängen weitestgehend vermieden.

- **Wärmetauscher:** Im Brennwertkessel sind mehrere Wärmetauscher integriert, die in verschiedenen Temperaturbereichen die Aufgaben haben, die Wärme von den Verbrennungsgasen auf den Wärmenutzerkreislauf zu übertragen. Ebenso wird die Kondensatoreinheit zur Rückgewinnung der Verdampfungsenthalpie aus dem Abgasstrom von einem Wärmetauscher gebildet.
- **Gebläse:** Das Gebläse ist für die Luftversorgung des Brenners zuständig. Da durch die Kondensation der Druck im Abgasstrom sinkt, muss das eingesetzte Gebläse diesen zusätzlich auftretenden Druckabfall durch größere Auslegung kompensieren, um eine sichere Abgasabführung zu gewährleisten. Hierdurch erhöhen sich zunächst die Investitionskosten. Durch den geringeren Primärenergiebedarf von Brennwertkesseln amortisieren sich diese Mehrkosten jedoch in kurzer Zeit.
- **Anschlüsse:** Die Baugruppe der Anschlüsse umfasst alle Verbindungsstellen der Brennwertkesseltechnik mit der Systemperipherie. Hier sind besonders die Anschlüsse für den Vor- und Rücklauf des Heizkreises, die Abgas- bzw. Kondensatabführung sowie der Zugang zur Brennstoffversorgung zu nennen. Zur Sicherstellung der universellen Einsetzbarkeit handelt es sich ausschließlich um Normteile.
- **Steuerung:** Aufgabe der Steuerung ist die Koordination von Lastanfrage, Brennstoff- und Luftdosierung, Gebläseeinsatz und Pumpensteuerung. Somit greift die Steuerung auch auf Systemkomponenten außerhalb des eigentlichen Brennwertkessels zurück (bspw. Temperaturfühler, Umwälzpumpen).
- **Gehäuse:** Die Gehäuseeinheit kapselt die Einzelkomponenten des Brennwertkessels gegen die Umgebung ab und gewährleistet die sichere Befestigung des Brennwertkessels, bspw. am Boden oder, für kleinere Leistungsgrößen, auch an Wänden. Die Ausführung besteht aus einem Metallgerüst mit Blechverkleidungen, die mit Isoliermaterial unterlegt sind.

Wirkungsgradbetrachtung

Ohne Berücksichtigung der Verluste in der Systemintegration des Brennwertkessels lassen sich bereits aktuell Wirkungsgrade von 109 % erreichen /Viessmann 2002/. Diese Werte beziehen sich auf Teillastwerte, bei Vollast mit entsprechend höheren Strömungsgeschwindigkeiten des Abgasgemischs liegt der erreichbare Wirkungsgrad bislang um ca. 7 Prozentpunkte niedriger /Viessmann 2002/. Die Leistungsgröße der Anlage spielt dabei keine nennenswerte Rolle.

3.3.2 Komponentenbasierte Ermittlung der technischen Potenziale

Die technischen Optimierungspotenziale der einzelnen Baugruppen sind nachfolgend beschrieben. Da es sich bei der Brennwertechnik um ein ausgereiftes marktetabliertes System handelt, sind die Entwicklungsmöglichkeiten in Umfang und Auswirkung begrenzt, für einen möglichen Verzicht auf einzelne Baugruppen, bspw. durch Multifunktionalisierung, sind derzeit keine Anzeichen erkennbar.

- **Brenner:** Die technischen Verbesserungspotenziale der Brennerstufe bestehen v. a. strömungsseitig in einer weiteren Erhöhung des Verbrennungsgrads in Folge verbesserten Strömungs- und Vermischungsverhaltens von Luft und Brennstoff. Aus energetischer Sicht entsteht durch diese Maßnahme nur ein äußerst geringer Wirkungsgradgewinn, die jedoch zu deutlichen Reduzierungen bei der Emissionsbildung (insbesondere CO) führt.
- **Wärmetauscher:** In der Kondensatorstufe besteht durch die Integration einer Adsorptionsschüttung die Möglichkeit, den Wirkungsgrad um maximal 5-7 Prozentpunkte zu steigern /Vattenfall 2009/. Durch das Schüttmaterial kann die Wärme aufnehmende Oberfläche deutlich vergrößert werden. Diese Maßnahme kann allerdings nur im Volllastbetrieb wirksam sein, da bei Teillast der erreichbare Wirkungsgrad aus physikalischen Gründen nicht mehr in nennenswertem Ausmaß steigerbar ist. Für den Teillastbetrieb ist wegen des höheren Strömungswiderstands der Schüttung mit einem höheren Stromverbrauch der Gebläseeinheit zu rechnen. Entsprechende Prototypanlagen für industrielle Anwendungen sind bereits in Betrieb /Vattenfall 2009/. Werkstoffseitig werden bereits preiswertere Kunststoffe für den Wärmetauscherbau eingesetzt, wo es temperaturseitig möglich ist (insbesondere in der Kondensationsstufe). Hier sind mittelfristig keine weiteren Einsparpotenziale erkennbar. Als weitere Maßnahme ist mit einer zusätzlichen Erhöhung der Wärmeaustauschflächen und einer Erhöhung der gasseitigen Durchflussgeschwindigkeit durch den Wärmetauscher zur Verbesserung des Wärmedurchgangskoeffizienten zu rechnen. Durch eine geänderte Strömungsführung kann zudem eine Reduktion der gasseitigen Strahlungsverluste durch vollständige Umströmung aller heißen Bauteile mit Wasser erzielt werden.
- **Gebläse:** Beim Gebläse führt eine Verbesserung der Strömungsführung in der Gesamtanlage zu geringeren Druckverlusten und somit geringerem Strombedarf. Wegen des weiten Auslegungsbereichs der Luftzufuhr kann die Gebläseeinheit leistungsgrößenmäßig nur in geringem Umfang von den Verbesserungen beim Verbrennungsprozess profitieren, die tendenziell geringere Luftzahlen erlauben. Die Änderungen beim Gebläse haben nur geringen Einfluss auf den thermischen Wirkungsgrad der Gesamtanlage.

Des Weiteren wird ein möglichst geringer Luftüberschuss angestrebt, um hohe CO₂- und H₂O-Anteile entstehen zu lassen, wodurch die Kondensation schon bei höheren

Temperaturen einsetzt (höherer Wasserdampfpartialdruck) und die Abgasverluste entsprechend geringer ausfallen. Hierdurch sinkt als Nebeneffekt der Strombedarf des Systems weiter.

- **Anschlüsse:** Bei den Anschlussstücken handelt es sich um Normteile. Von dieser Seite sind keine nennenswerten Beiträge zur technischen Verbesserung bzw. zur Kostensenkung zu erwarten. Lediglich die Luftzufuhr kann so umplatziert werden, dass eine zusätzliche Vorwärmung und somit eine weitere Senkung der Abgastemperatur erzielt werden kann.
- **Steuerung:** In diesem Bereich sind Optimierungspotenziale ohne nennenswerte hardwareseitige Änderungen durch Parameteroptimierung, bspw. bei der Pumpenregelung erreichbar.
- **Gehäuse:** Das Gehäuse in seiner derzeitigen Form besteht vollständig aus Standardteilen, wie etwa Metallrahmen, Schrauben, Bleche. Für die weitere Entwicklung sind keine gravierenden Änderungen an der äußeren Form über die Überarbeitung des Designs hinaus zu erwarten. Lediglich durch eine weitere Verbesserung des eingesetzten Materials zur thermischen Isolierung können sehr geringe Wirkungsgradgewinne in dieser Baugruppe erzielt werden.

Aus der Summe der aufgezählten Einzelmaßnahmen ergeben sich die in Tabelle 3-6 aufgeführten Werte für die Potenziale der Wirkungsgrade.

Für den thermischen Wirkungsgrad der Brennwertkesseltechnik ergibt sich ein Potenzialwert von 110 %, bezogen auf den Heizwert von Erdgas. Damit fällt der absehbare Wirkungsgradzuwachs nominal sehr gering aus. Der Hauptvorteil der genannten Maßnahmen ist allerdings die gegenüber den heutigen Anlagen mögliche deutliche Ausweitung des Lastbereichs, indem das Wirkungsgradmaximum erreicht werden kann.

Tabelle 3-6: Überblick Wirkungsgradentwicklung Erdgasbrennwertkessel 100 kW_{th} /Viessmann 2002/, /eigene Berechnungen/, /Vattenfall 2009/

Kategorie	heute	Potenzial 2030
	[%]	[%]
El. Wirkungsgrad	-	-
Therm. Wirkungsgrad	109	110
Gesamtwirkungsgrad	109	110

3.3.3 Komponentenbasierte Entwicklung der wirtschaftlichen Kennwerte mit Größenskalierung

Eine Abschätzung der Investitionskostenpotenziale ist ausschließlich über die Anwendung komponentenbezogener Lernkurvenansätze möglich, da die technischen Entwicklungspotenziale moderat und ohne Auswirkungen auf die Investitionskostenseite sind. Wie von /Haug et al. 1998/ ermittelt, weist das Gesamtsystem mit 0,96 einen äußerst geringen Lernfaktor auf.

Durch den ausschließlichen Einsatz von Standardkomponenten spiegelt sich dieser Grundsatz auch bei der Ermittlung komponentenbezogener Lernfaktoren wider. Die entsprechenden Kennwerte der Investitionskostenpotenziale der Brennwertkesseltechnik sind für die Referenzanlagengröße in Tabelle 3-7 aufgeführt.

Tabelle 3-7: Komponentenrahmendaten Brennwertkessel 115 kW_{th}, /Buderus 2006 und weitere Jahre/, /Haug et al. 1998/, /eigene Berechnungen/

Komponente	Spez. Investitionskosten heute	Skalierungsfaktor	Lernfaktor	Floor costs	Spez. Investitionskostenpotenzial 2030
	[€/kW _{th}]	[-]	[-]	[€/kW _{th}]	[€/kW _{th}]
Anschlüsse	13	0,045	1	5	13
Steuerung	31	0	0,94	5	28
Gebälse	9	0,004	0,94	8	8
Brenner	4	0,89	0,95	2	3
Wärmetauscher	20	0,23	1	10	20
Gehäuse	8	0,27	0,93	7	8
SUMME	84	0,63	0,96	37	80

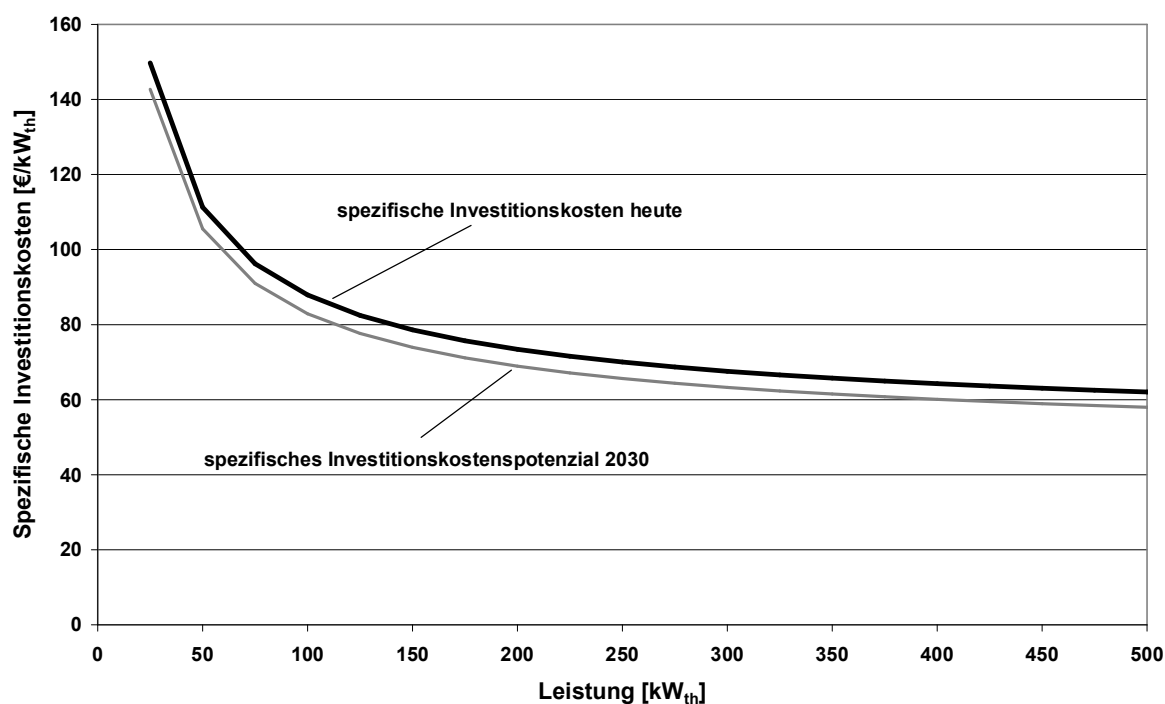


Abbildung 3-9: Leistungsgrößenbezogener Verlauf der spezifischen Brennwertkesselinvestitionskosten für heute und 2030 im Bereich bis 500 kW_{th}

Es ergeben sich mit einer möglichen Senkung der spezifischen Investitionskosten von 84 auf 80 €/kW_{th} keine nennenswerten zukünftigen Kostenvorteile für die Referenzgröße. Für die Leistungsgröße von 500 kW_{th} ergeben sich Investitionskostenreduzierpotenziale von 24 auf 23 €/kW_{th} (vgl. Abbildung 3-9).

3.3.4 Zusammenfassung Brennwertkessel

Bei der Brennwertkesseltechnik handelt es sich um marktetabliertes, technisch ausgereiftes Wärmeversorgungssystem. Der aktuell nachgewiesene Anlagenwirkungsgrad liegt bei 109 %, allerdings im Teillastbereich. Für eine Anlagengröße von 115 kW_{th} betragen die aktuellen spezifischen Investitionskosten 84 €/kW_{th}.

Aufgrund der ausgereiften Technik und der ausschließlichen Verwendung von Standardteilen weist die Brennwertkesseltechnik nur geringe technische Optimierungspotenziale auf, die den thermischen Wirkungsgrad um maximal etwa einen Prozentpunkt auf 110 % steigern lassen, womit das theoretische Optimum nahezu erreicht ist. Stattdessen liegt der Schwerpunkt der Weiterentwicklung auf der Minimierung der bei Volllast auftretenden Verluste. Hier kann insbesondere der Einbau einer Adsorptionsschüttung in die Kondensationsstufe die entstehenden Wirkungsgradverluste ausgleichen. Die technische Optimierung wird durch einige weitere Maßnahmen mit insgesamt geringem Optimierungspotenzial ergänzt. Diese Schritte verteilen sich quasi über sämtliche Baugruppen der Brennwertkesseltechnik.

Wegen des hohen Standardteileanteils weist der Erdgasbrennwertkessel auch bei der Investitionskostenbetrachtung nur geringe Potenziale auf, die ausschließlich durch Lerneffekte begründet sind. Für die Referenzleistung von 115 kW_{th} können die spezifischen Investitionskosten im Betrachtungszeitraum somit bis auf 80 €/kW_{th} gesenkt werden. Dies entspricht einem vergleichsweise geringen Einsparpotenzial gegenüber dem aktuellen Wert von etwa 5 %.

3.4 Organic Rankine Cycle-Anlagen (ORC-Anlagen)

ORC-Anlagen eignen sich vor allem zur Nutzung von Biomasse und Wärme aus geothermischen Quellen sowie von Industrieabwärme. Vor diesem Hintergrund hat der Einsatz von ORC-Kraftwerken in den letzten Jahren in Mitteleuropa deutlich zugenommen. Regionale Schwerpunkte des ORC-Einsatzes sind dabei Deutschland, Österreich, die Schweiz und Italien. Die überwiegende Zahl der ORC-Anlagen wird mit Biomasse befeuert, hier kommen v. a. Holzabfälle und Holzpellets zum Einsatz. Trotz der starken Zunahme der Anlagenzahl gilt die ORC-Anlage als junge Technik mit entsprechenden technischen und wirtschaftlichen Entwicklungspotenzialen.

Die nachfolgenden Betrachtungen der ORC-Technik beschränken sich auf biomassebefeuerte Anlagen.

3.4.1 Stand der Technik der ORC-Anlagen

Die ORC-Technik entspricht größtenteils dem konventionellen Rankineprozess, wie er bei der Stromerzeugung in konventionellen Dampfturbinen angewandt wird. Die thermodynamischen Grundprinzipien von ORC-Anlagen sind anhand eines T-s-Diagramms in Abbildung 3-10 dargestellt.

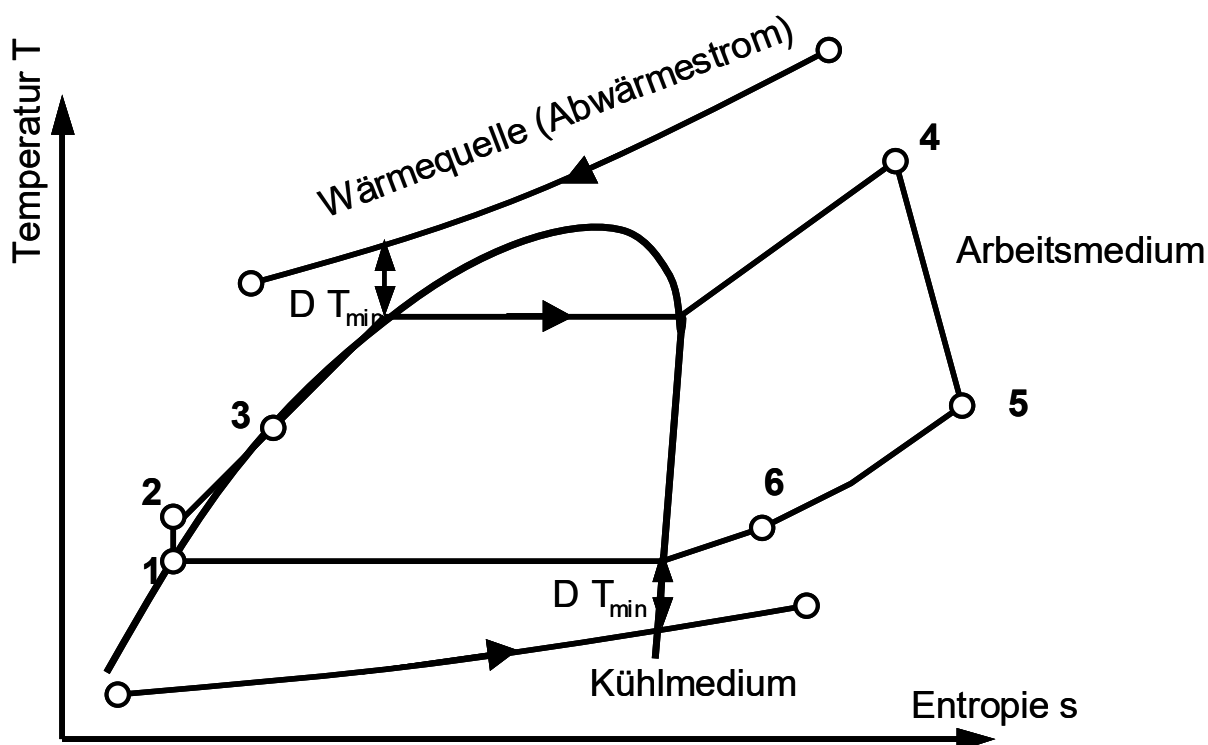


Abbildung 3-10: T-s-Diagramm ORC-Anlage /Rechnagel 1995/

Der wesentliche Unterschied liegt in der Verwendung flüssiger organischer Kohlenwasserstoffe wie bspw. Toluol, Iso-Pentan, Iso-Oktan oder Silikonölen anstelle von Wasser in flüssiger bzw. dampfförmiger Form als Arbeitsmedium. Entsprechend ähnlich sind die zugehörigen Anlagenschemen (vgl. Abbildung 3-11). Die Verwendung organischer Arbeitsmedien hat gegenüber Wasser den Vorteil wesentlich geringerer Siedepunkte, so dass bereits Wärme auf einem vergleichsweise niedrigen Temperaturniveau zur Stromerzeugung genutzt werden kann. Die ORC-Technologie ist damit in der Lage, auch solche Wärmemengen zu nutzen, die anderweitig nicht verstromt werden könnten. Aktuell sind Anlagengrößen zwischen $100 \text{ kW}_{\text{el}}$ und $1,2 \text{ MW}_{\text{el}}$ marktverfügbar.

Der Turbinenwirkungsgrad typischer ORC-Anlagen beträgt ca. 85 % bei guter Regelbarkeit und hervorragenden Teillasteigenschaften (Betriebsbereich 10-100%) /Oberberger, Hammerschmied 1999/. Durch die geringe Anlaufzeit der Turbine ist ein zeitlich flexibler Betrieb möglich. Incl. Abwärmenutzung können Gesamtwirkungsgrade zwischen 70 und 105 % (bei Nachschaltung einer Rauchgaskühlung zur Auskondensation des Wasserdampfanteils) erreicht werden. Durch Auswahl eines geeigneten Arbeitsmediums kann der Prozess an die auf der warmen bzw. kalten Seite herrschenden Bedingungen angepasst und der Wirkungsgrad optimiert werden. Die Anlagen können vollautomatisch ohne Personal betrieben werden; positive Betriebserfahrungen mit ORC-Anlagen liegen bereits vor.

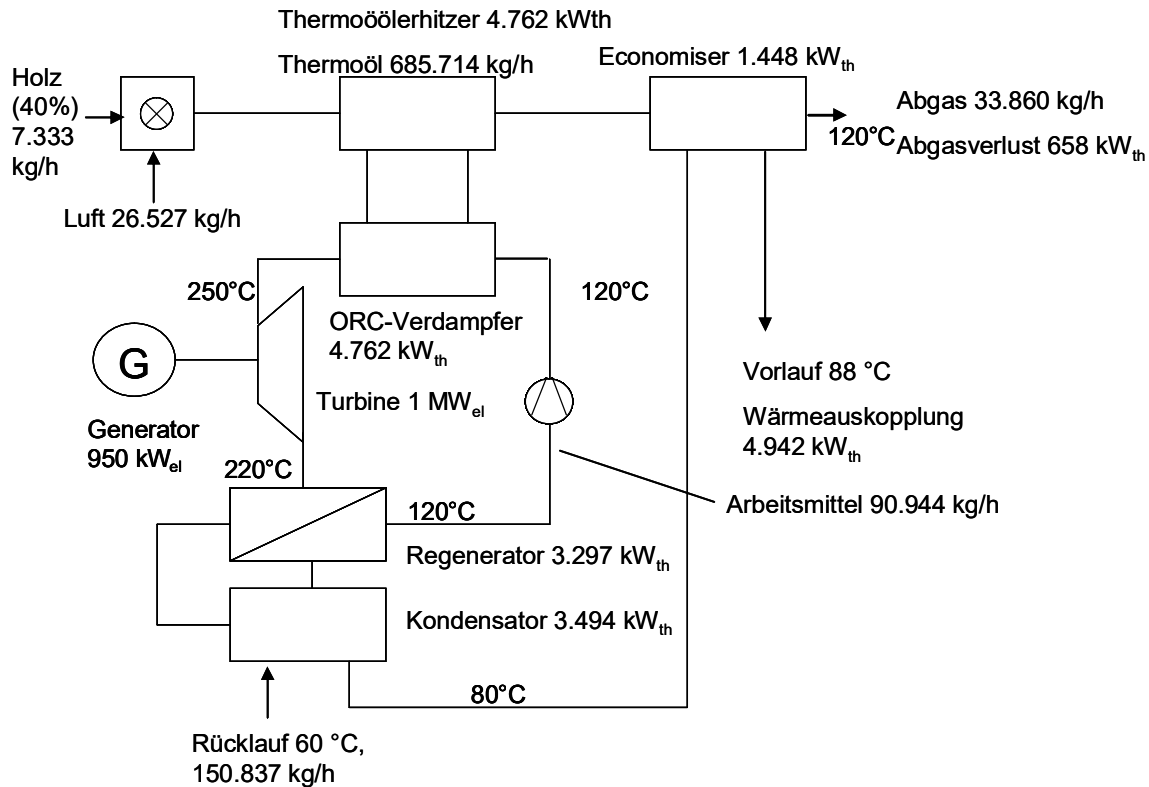


Abbildung 3-11: Schematischer Aufbau einer ORC-Anlage mit angeschlossener Niedertemperaturwärmenutzung

Wesentliche Nachteile von ORC-Anlagen sind der hohe Bedarf an Wärmeaustauscherflächen beim Einsatz von Thermoöl und die ausschließlich wärmegeführte Betriebsweise, die zudem auf hohe Vollaststundenzahlen (4.000-6.000 h/a) zum wirtschaftlichen Betrieb angewiesen ist. Darüber hinaus ist der auf die zugeführte Brennstoffmenge bezogene elektrische Wirkungsgrad mit Werten um 15 %, bei Geothermienutzung aufgrund des niedrigeren Temperaturniveaus zwischen 4 und 13 % (bezogen auf den Wärmeinhalt des geförderten Heißwassers), relativ gering. Die sich daraus ergebenden Stromkennziffer von 0,23 ist im Vergleich mit anderen Stromerzeugungstechnologien ebenfalls relativ niedrig.

Bei der Nutzung von Biomasse beträgt die Abgastemperatur nach der Auskopplung der Wärme für den Thermoölkreislauf 340 °C. Bei einer für die Wärmeübertragung auf flüssige oder gasförmige Fluide erforderlichen Temperaturdifferenz von 30 K für die technisch und wirtschaftlich sinnvolle Wärmeübertragung ergibt sich hieraus eine maximal mögliche Anwendungstemperatur von 310 °C. Der mögliche Wirkungsgrad der Satttdampferzeugung mit einer Temperatur von 180 °C beträgt 48,4 %. Der Anteil der aus dem Abgasstrom entnehmbaren Mitteltemperaturwärme beträgt 29,3 % des nutzbaren Gesamtabwärmeaufkommens, der Anteil der Niedertemperaturwärme, die aus dem Turbinenkreislauf ausgekoppelt werden kann, beträgt 70,7 %.

Komponentenzerlegung

Die wesentlichen Komponenten und Baugruppen der ORC-Technik werden anhand einer Anlage zur Biomasseverbrennung für die nachfolgenden Untersuchungen wie folgt aufgeteilt:

- **Kessel incl. Thermoölkreislauf und Economiser:** Die Kesseleinheit besteht aus einem Kessel zur Biomasseverbrennung, dem Wärmetauscher für die Thermoölvorsorgung des Stromerzeugerkreislaufs und der Abwärmeauskopplung (Economiser). Die Kesseleinheit ist somit für die Umsetzung der zugeführten Primärenergie in Wärme und die Übertragung der Wärme auf das Arbeitsmittel zuständig.
- **Verrohrung:** Die Baugruppe Verrohrung umfasst sämtliche Leitungen für flüssiges und gasförmiges Arbeitsmittel.
- **ORC-Modul:** Das ORC-Modul umfasst die Turbinen-Generator-Einheit sowie den Verdichter und die Wärmetauscher für Regenerator und Kondensator. Das ORC-Modul bildet den Kern der ORC-Technik und ist maßgeblich für die Stromproduktion und den Wärmehaushalt der Stromerzeugungseinheit verantwortlich. Bei der Turbine, dem Generator, dem Verdichter und den Wärmetauschern handelt es sich im Prinzip um Standardteile, die für den Einsatz im Rahmen der ORC-Technik spezifiziert werden.
- **Steuerung:** Die Steuerung besteht aus dem Steuermodul für den gesamten Anlagenbetrieb incl. aller für die Überwachung der Sicherheit relevanten Anlagenteile (Sensoren).
- **Stromnetzanbindung:** Die Stromnetzanbindung umfasst in erster Linie die Spannungstransformation auf das jeweilige Netzniveau sowie die Strommengenerfassung. Die Baugruppe der Stromnetzanbindung besteht aus Standardteilen, die an die ORC-Technik und die jeweilige Anwendung angepasst werden.

Wirkungsgradbetrachtung

Aktuell werden unter günstigen Voraussetzungen (Biomassefeuerung) in der Praxis elektrische Wirkungsgrade von 15 und thermische Wirkungsgrade von 75 %, bei Brennwertnutzung von 78 %, erzielt. Die entsprechenden Gesamtwirkungsgrade betragen 90 bzw. 93 %. Die exakte Höhe ist von der gewählten Anwendung und deren temperaturseitigen Anforderungen abhängig.

3.4.2 Komponentenbasierte Ermittlung der technischen Potenziale

Nachfolgend sind die identifizierten technischen Entwicklungspotenziale der ORC-Technik den einzelnen Baugruppen zugeordnet aufgeführt.

- **ORC-Modul:** Wesentlicher Bestandteil der technischen Optimierung ist die mögliche Erhöhung der Thermoölkreislauftemperatur auf 320 °C /Oberberger 2008. Hierzu

dient auch die aktuell im Gang befindliche Suche nach neuen Arbeitsmitteln, die eine entsprechend höhere Temperaturbeständigkeit und Dauerstandfestigkeit aufweisen.

- **Kessel incl. Thermoölkreislauf und Economiser:** Zusätzlich zur Thermoöltemperaturerhöhung wird ein zweiter Kondensatkreislauf in das ORC-System integriert.

Aus den beschriebenen Maßnahmen lassen sich die technischen Entwicklungspotenziale der ORC-Anlage für den Betrachtungszeitraum ableiten /Oberberger, Gaia 2008/. Ausgehend von einem theoretisch erreichbaren elektrischen Nettowirkungsgrad von ORC-Anlagen 36 % können mit den dargestellten Schritten 20,2 % erreicht werden /Oberberger, Gaia 2008/. Es ergibt sich ein Gesamtwirkungsgradpotenzial von 98,2 %.

Die Ansatzpunkte dieser Optimierung umfassen demnach die Erhöhung der Thermoöltemperatur auf 320 °C und die Implementierung eines zweiten Kondensatkreislaufs. Der thermische Wirkungsgrad von 78 % bleibt durch diese Maßnahme unberührt /Oberberger, Gaia 2008/. Der erreichbare Gesamtwirkungsgrad beträgt dann 98,2 %. Die Entwicklungspotenziale von ORC-Anlagen sind in Tabelle 3-8 dargestellt.

Tabelle 3-8: Wirkungsgradentwicklung der ORC-Anlage mit einer Leistung von 1,0 MW_{el} /Oberberger, Gaia 2008/, /eigene Recherche/

Kategorie	heute	Potenzial 2030
	[%]	[%]
Elektr. Wirkungsgrad	15,0	20,2
Therm. Wirkungsgrad	78,0	78,0
Gesamtwirkungsgrad	93,0	98,2

3.4.3 Komponentenbasierte Entwicklung der wirtschaftlichen Kennwerte mit Größen-skalierung

Als Referenzgröße wird eine ORC-Anlage mit einer elektrischen Leistung von 1,0 MW_{el} und einer thermischen Leistung von 4,9 MW_{th} betrachtet. Die spezifischen Gesamtinvestitionskosten betragen auf dem heutigen Stand 1.637 €/kW_{el} (vgl. Tabelle 3-9). Insgesamt weist die ORC-Technik bis 2030 Investitionskostenreduktionspotenziale im Bereich von etwa 20 % auf. Die ermittelten Einsparpotenziale basieren ausschließlich auf der Nutzung von Lerneffekten.

Dabei ist allerdings zu beachten, dass in der Investitionskostenbetrachtung noch keine anwendungsfallspezifischen Kosten, bspw. für Gebäude, berücksichtigt sind.

Tabelle 3-9: Komponentenrahmendaten einer ORC-Anlage mit einer Leistung von 1,0 MW_{el}, P_{th}=4,9 MW_{th} /eigene Berechnungen/, /IUTA 2006/, /Maier 2002/, /Huppmann 1980/ (ohne Gebäude, Fernwärmenetz und Brennstoffaufbereitung)

Komponente	Spez. Investitionskosten heute	Skalierungsfaktor	Lernfaktor	Floor costs	Spez. Investitionskosten 2030
	[€/kW _{el}]	[-]	[-]	[€/kW _{el}]	[€/kW _{el}]
Kesseleinheit	358	0,88	0,80	150	150
Verrohrung	59	0,9	0,97	50	50
ORC-Modul	1.100	0,7	0,82	800	800
Steuerung	20	1,0	0,77	18	18
Stromnetzanbindung	100	0,7	0,80	80	80
SUMME	1.637	0,75	0,83	-	1.098

Es ergeben sich über den gesamten Leistungsbereich Investitionskostenreduzierungspotenziale, die bei einer Leistungsgröße von 10 MW_{el} zu minimalen spezifischen Investitionskosten von 612 €/kW_{el} führen können (vgl. Abbildung 3-12).

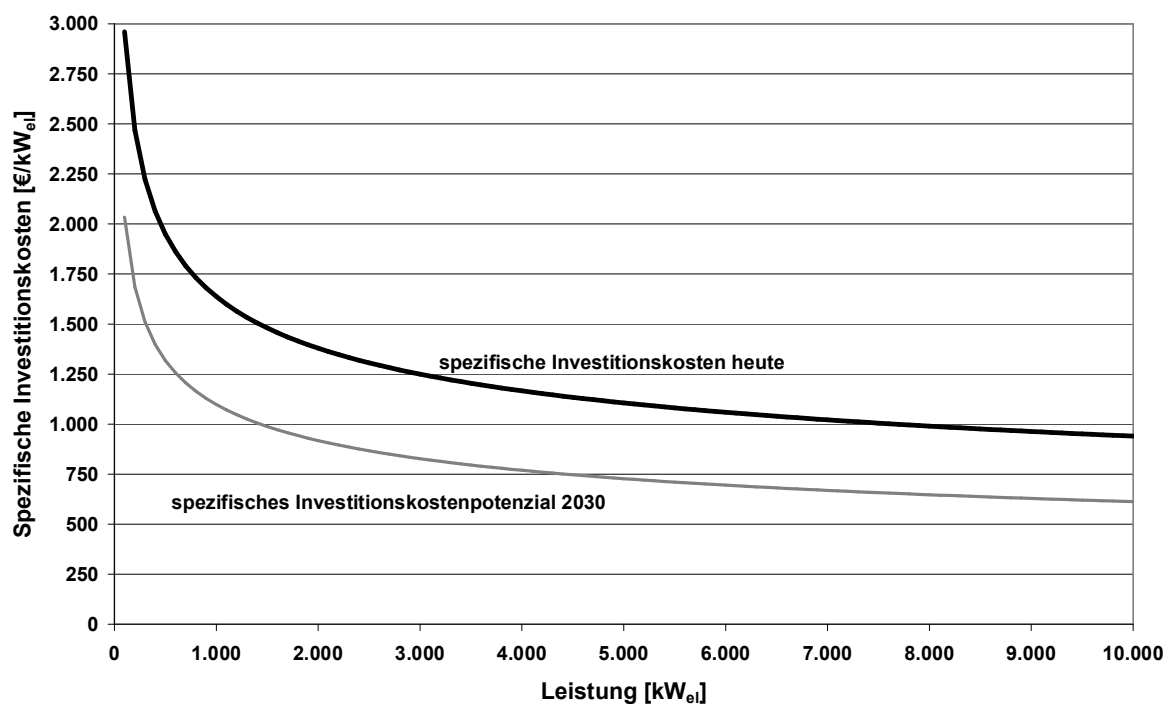


Abbildung 3-12: Leistungsgrößenbezogener Verlauf der spezifischen Investitionskostenpotenziale der ORC-Anlage für heute und 2030 im Bereich bis 10 MW_{el}

3.4.4 Zusammenfassung ORC-Anlage

ORC-Anlagen sind eine markttablierte Technik der Wärme- und Stromerzeugung. Die ORC-Technik profitierte in den letzten Jahren besonders vom Trend zur Nutzung regenerativer Energieträger, insbesondere Biomasse und Geothermie.

Die ORC-Technik weist mit möglichen Wirkungsgradsteigerungen im Bereich von 6 Prozentpunkten ein hohes technisches Potenzial bezüglich der Stromerzeugung auf, ohne dass die stromseitigen Verbesserungen zu Lasten des - ohnehin hohen - thermischen Wirkungsgrads gehen müssen. Der im Betrachtungszeitraum maximal erreichbare Wert für den elektrischen Wirkungsgrad liegt im Bereich von 20 %, der thermische Wirkungsgrad verbleibt bei maximal 78 % für den – von der jeweiligen Anwendung abhängigen - Fall einer möglichen Brennwertnutzung. Für die Dampferzeugung stellt die ORC-Anlage wegen des geringen Abgastemperaturniveaus bereits aus heutiger Sicht keine wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Alternative dar. Diesbezüglich ist für die weitere Entwicklung, insbesondere angesichts einer tendenziell steigenden Temperatur im Arbeitsmediumkreislauf, auch nicht mit einer Verbesserung zu rechnen.

Ansatzpunkte für nennenswerte Komponentenvereinfachungen sind nicht nachweisbar, so dass die Erreichung günstigerer Investitionskosten nur über Lerneffekte realisierbar ist. Wegen des ansonsten hohen Standardteileanteils machen diese sich allerdings nur in der Investitionskostenentwicklung des ORC-Modul nachhaltig bemerkbar. Für eine 1 MW_{el}-Anlage mit derzeitigen spezifischen Investitionskosten von 1.637 €/kW_{el} sind bis 2030 somit Kostensenkungen auf günstigstenfalls 1.098 €/kW_{el} zu erwarten.

3.5 Wärmepumpen

Eine Wärmepumpe ist eine Einrichtung, die einen Wärmestrom bei niedriger Temperatur aufnimmt (kalte Seite) und unter Aufwand hochwertiger Energie (bspw. elektrische Arbeit) bei höherer Temperatur wieder abgibt (warme Seite) /VDI 2067-6 2000/.

Wärmepumpe und Kältemaschine basieren auf demselben physikalischen/thermodynamischen Prinzip: Wärme aus unterschiedlichen Quellen (bspw. Luft, Wasser, Boden, Abwärme) wird auf geringem Druck- und Temperaturniveau aufgenommen und - unter Aufwendung von Arbeit - auf einem höheren Druck- und Temperaturniveau wieder abgegeben. Lediglich die Art der Nutzung wird durch die beiden Begriffe definiert: Bei Nutzung der warmen Seite spricht man von Wärmepumpe, bei Nutzung der kalten Seite von Kältemaschine. Wärmepumpen können sowohl Umgebungs- (Erdreich, Luft, Wasser) als auch Prozessabwärme (Industrie) nutzen. Dadurch sinkt der Gesamtbedarf der notwendigen Energiezufuhr, wodurch sowohl Kosten als auch CO₂-Emissionen pro kWh_{th} reduziert werden können. Besonders geeignet sind Wärmepumpen zur Klimatisierung von Gebäuden. Neben der Raumheizung wird dabei durch Abkühlung eines Wasserstroms Kälte erzeugt, die zu Kühlzwecken genutzt werden kann.

Der Wärmepumpenprozess zählt thermodynamisch zu den linksgängigen Kreisprozessen. Im ersten Schritt wird das Arbeitsmittel auf einem geringen Druck- und Temperaturniveau unter Aufnahme der Wärmemenge Q_0 aus der Umgebung verdampft. Im zweiten Schritt wird das Druck- und Temperaturniveau durch Verdichtung (Zufuhr von Arbeit) angehoben. Anschlie-

End wird die zuvor aufgenommene Wärme aus Verdampfung und Verdichtung bei der Kondensation an einen Nutzer abgegeben. Im letzten Schritt des Kreisprozesses wird das erhöhte Druck- und Temperaturniveau mit Hilfe einer Drossel wieder auf das ursprüngliche Niveau zurückgeführt.

Das Funktionsprinzip der Kompressionswärmepumpe ist beispielhaft in Abbildung 3-13 dargestellt.

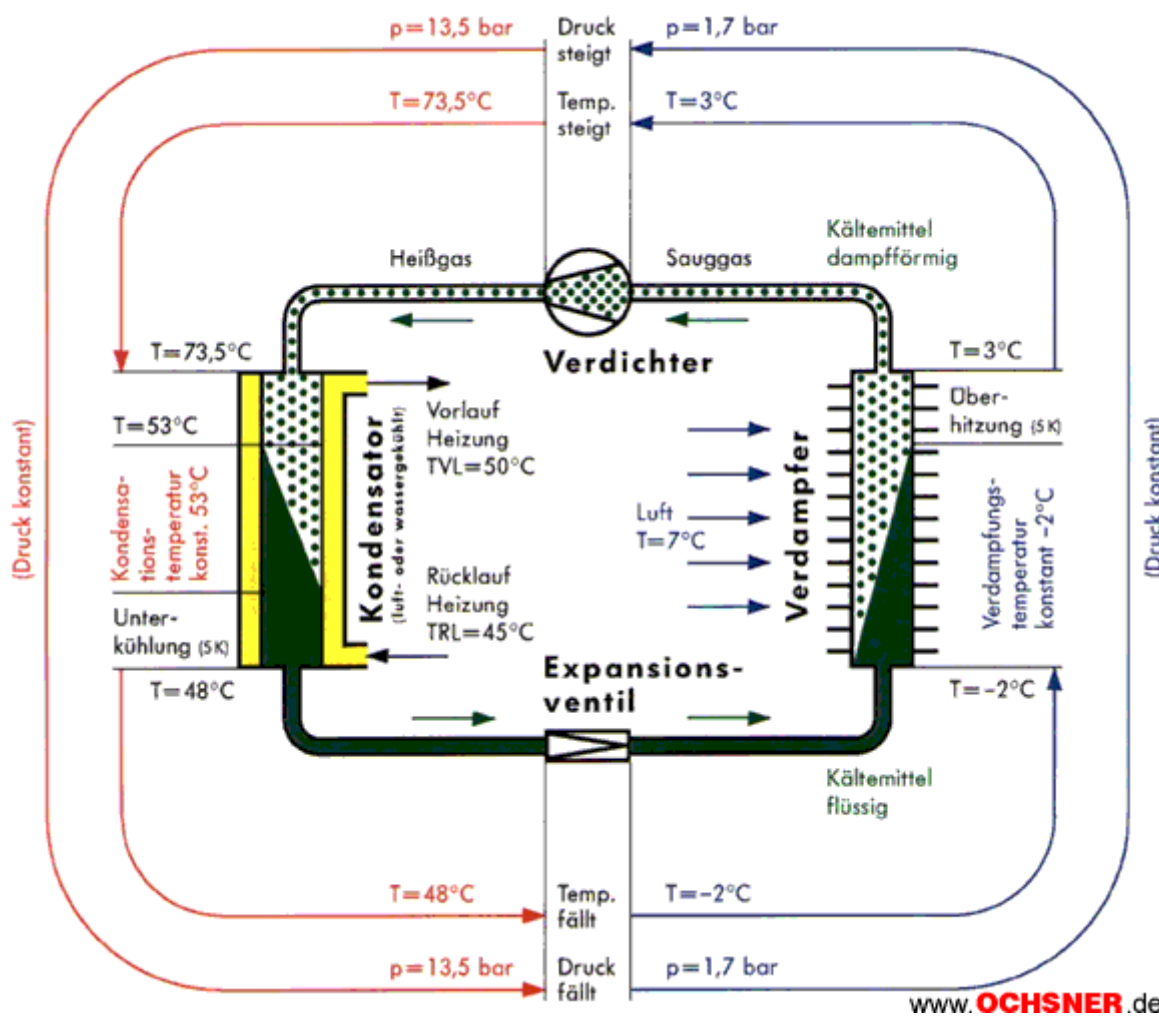


Abbildung 3-13: Prinzipskizze Kompressionswärmepumpe für Heizungsanwendungen /Ochsner 2006/

Überwiegendes Einsatzgebiet von Wärmepumpen ist die Beheizung bzw. Klimatisierung von Gebäuden. Daneben gibt es noch verschiedene gewerbliche Anwendungen, wie etwa die Bereitstellung von Prozesswärme für die Lebensmittelverarbeitung oder die chemische Industrie. Besonders interessant ist der Einsatz von Wärmepumpen für Trocknungsprozesse, etwa in der Papier- und Textilindustrie, sowie bei der Entwässerung von Schlämmen. Die von der Wärmepumpenanlage gewonnene Wärme kann für die Trocknung des Gutes genutzt werden, mit der anfallenden Kälte können Luft- oder Gasströme entfeuchtet werden.

Bei Wärmepumpenanlagen kann die Wärmebereitstellung durch die Wärmepumpe alleine erfolgen (monovalenter Betrieb), beim bivalenten Betrieb ist eine Zusatzheizung in die Anlage integriert. Die bivalente Fahrweise kann in Alternativ-, Parallel- oder Mischbetrieb erfolgen /Martinus et al. 2005/.

Neben den elektrisch betriebenen Kompressionswärmepumpen existieren, v. a. für industrielle Nutzer und andere Großanwendungen, auch Absorptionswärmepumpen, die im Wesentlichen durch einen thermischen Verdichtungsprozess angetrieben werden.

Im Folgenden beschränkt sich die Betrachtung auf die Kompressionswärmepumpen.

3.5.1 Stand der Technik elektrische Wärmepumpe

Elektrisch betriebene Wärmepumpen sind bereits seit Beginn der 80-er Jahre des 20. Jahrhunderts am Markt verfügbar. Für den industriellen Bereich bzw. die netzgebundene Wärmeversorgung werden Wärmepumpen im thermischen Leistungsbereich von $200 \text{ kW}_{\text{th}}$ bis $10 \text{ MW}_{\text{th}}$ angeboten, für die Raumwärmebereitstellung sind Anlagen bereits im einstelligen kW_{th} -Bereich erhältlich.

Die Qualität einer Wärmepumpenanlage kann durch mehrere verschiedene Kennziffern beschrieben werden. Die Leistungszahl ε ist definiert als Quotient aus gesamter Nutzwärmeleistung und zugeführter Antriebsleistung bei elektrisch betriebenem Kompressor.

Die Arbeitszahl β , der Quotient aus gesamter Nutzwärmeenergie und gesamter zugeführter Endenergie, dient als Grundlage für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen über einen längeren Zeitraum hinweg, i. d. R. in Form der Jahresarbeitszahl. Da die aus der Umgebung entnommene Wärme jeweils nur im Zähler, nicht aber im Nenner auftaucht, sind für die beiden Kennzahlen Werte über 100 % erreichbar.

Nachteilig für die Einsetzbarkeit von Wärmepumpen insbesondere im industriellen Bereich wirkt sich das geringe erreichbare Temperaturniveau aus. Zwar können, bspw. auch durch Kaskadenschaltung, Temperaturen über $60 \text{ }^\circ\text{C}$ erzielt werden, jedoch bei deutlich sinkender Effektivität. In der Praxis werden daher in aller Regel Wärmepumpen für Anwendungen über $60 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht eingesetzt /Lambauer et al. 2008/.

Komponentenzerlegung

Wärmepumpen bestehen im Wesentlichen aus vier durch Rohrleitungen miteinander verbundenen Komponenten (vgl. Abbildung 3-13): Verdampfer, Verdichter, Kondensator (Verflüssiger) und das Expansionsventil. Durch dieses System zirkuliert ein flüssiges Arbeitsmittel (Kältemittel) mit niedrigem Siedepunkt. Zur Regulierung der Anlage ist als weiteres Element eine Steuereinheit Bestandteil der Wärmepumpe.

- **Verdampfer:** Im Verdampfer nimmt das flüssige Arbeitsmittel Wärme aus der Umgebung auf geringem Temperaturniveau auf. Aufgrund des geringen Druckniveaus

verdampft das Arbeitsmittel bereits bei Umgebungstemperatur. Entscheidende Faktoren für eine möglichst hohe thermische Effizienz eines Verdampfers sind große wärmeübertragende Oberflächen durch optimierte Formgebung und ein guter Wärmeübergang, bspw. durch die Verwendung hochwertiger Stähle und günstige Fließgeometrien.

- **Verdichter:** Im Verdichter erfolgt die Druckerhöhung des verdampften Arbeitsmittels. Für die betrachteten Kompressionswärmepumpen werden elektrische Verdichter eingesetzt.
- **Kondensator:** Im direkt an den Verdichter angeschlossenen Kondensator erfolgt die Wärmenutzung. Ebenso wie der Verdampfer stellt der Kondensator einen Wärmetauscher dar, wobei die an den Nutzer übertragene Wärme überwiegend aus der Kondensation des Arbeitsmitteldampfs stammt. Die im Kondensator abgegebene Wärmemenge setzt sich aus der bei der Verdampfung und Überhitzung des Arbeitsmittels im Verdampferbauteil aufgenommenen Wärme und der zugeführten elektrischen Verdichterarbeit, die in Wärme umgewandelt wird, zusammen. Aus diesem Grund weist der Kondensator eine höhere Leistungsgröße als der Verdampfer auf.
- **Expansionsventil:** Das Expansionsventil (Drossel) stellt das letzte zu durchlaufende Element im Arbeitsmittelkreislauf dar. Hier wird der Druck des kondensierten Arbeitsmittels auf das im Verdampfer benötigte Niveau reduziert.
- **Arbeitsmittel:** Das Arbeitsmittel stellt das Medium dar, das in einem Kreislauf durch die einzelnen Komponenten fließt und als Träger der Wärme fungiert. Dabei ändert sich der Aggregatzustand des Arbeitsmittels im Verdampfer von flüssig zu gasförmig und im Kondensator von gasförmig zu flüssig. Zu den Anforderungen an ein Arbeitsmittel gehören eine niedrige Verdampfungstemperatur bei geringem Druck, eine hohe Verdampfungsenthalpie und eine hohe Kondensationstemperatur im komprimierten Zustand. Ursprünglich wurden als Arbeitsmittel Fluorkohlenwasserstoffe (FCKW) eingesetzt, die wegen ihrer die Ozonschicht schädigenden Wirkung nicht mehr zugelassen sind. Als Arbeitsmittel sind seither vor allem Ammoniak (R717), Fluorkohlenwasserstoffe (FKW), Kohlendioxid (R744) sowie verschiedene Kohlenwasserstoffe (Propan R290, Butan, Isobutan) gebräuchlich /Lambauer et al. 2008/.
- **Steuerung:** Die Steuerung koordiniert die zeitlich variablen nutzerseitigen Anforderungen an die Wärmepumpe und setzt diese in entsprechende Steuerbefehle an die Stellventile und Verdichter um. Gleichzeitig ist die Steuerung für die Anlagensicherheit zuständig und überwacht den gesamten Betriebsablauf mit einer integrierten Sensorik.
- **Verrohrung:** Die Verrohrung hat die Aufgabe, die einzelnen Anlagenkomponenten des Arbeitsmittelkreislaufs zu verbinden. Zusätzlich gehören zur Verrohrung auch die Steuerventile für die Dosierung des Arbeitsmittels für unterschiedliche Stufen des Teillastbetriebs.

Wirkungsgradbetrachtung

In der Praxis können bei Leistungszahlen von etwa 6 im praktischen Dauerbetrieb maximale Jahresarbeitszahlen von 4,0 erreicht werden /Lambauer et al. 2008/. Mit höherem Temperaturniveau der Anwendung ist mit einem deutlichen Absinken der Anlageneffektivität unabhängig von der Anzahl der eingesetzten Verdichtungsstufen (Kaskadenschaltung) zu rechnen.

3.5.2 Komponentenbasierte Ermittlung der technischen Potenziale

Als Referenzgröße für die weitere Analyse wird eine Wärmepumpe mit einer thermischen Leistung von 143 kW_{th} betrachtet.

Die technischen Entwicklungspotenziale der einzelnen Komponenten ergeben sich für den Betrachtungszeitraum wie folgt aus den einzelnen Komponentenverbesserungen.

- **Verdichter:** Die Optimierungsmöglichkeiten in der Verdichterbaugruppe umfassen eine verbesserte Regelung bei der Anpassung der einzelnen Leistungsstufen. Zudem wird der Einsatz einer Dampfeinspritzkühlung entwickelt. Zur Minimierung thermischer Abstrahlverluste wird eine zusätzliche Wärmedämmung integriert /Lambauer et al. 2008/.
- **Verdampfer:** Wichtigster Aspekt bei der Verbesserung der Verdampfereigenschaften ist die Verbesserung des Wärmeübergangs durch Auftragen einer Nanopartikelbeschichtung. Zudem wird an weiter optimierten Strömungsführungen zur Steigerung der Wärmedurchgangszahlen entwickelt. Auch bei der Kältemittelverdampfung sollen durch zusätzliche Wärmedämmung die thermischen Verluste minimiert werden /Lambauer et al. 2008/.
- **Kondensator:** Die bei der Verdampfereinheit genannten Maßnahmen Nanopartikelbeschichtung, Optimierung der Strömungsführung und zusätzliche Wärmedämmung werden auch in der Kondensationsstufe angewandt /Lambauer et al. 2008/.
- **Expansionsventil:** Die seither elektromechanisch gesteuerten Expansionsventile werden durch den Einsatz elektronisch geregelter Expansionsventile ersetzt. Hierdurch ist mit einer deutlich schnelleren und präziseren Anpassung des Kältemittelstroms an den aktuellen Wärmebedarf zu rechnen /Lambauer et al. 2008/.
- **Arbeitsmittel:** Durch die Variation des Arbeitsmittels sind derzeit keine Verbesserungen der Leistungszahl zu erwarten. Stattdessen sollen durch die Suche nach neuen Arbeitsmitteln die Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen variiert werden /Lambauer et al. 2008/.

In der Summe der genannten Optimierungsmaßnahmen kann die Leistungszahl für Niedertemperaturanwendungen von derzeit 6 auf etwa 6,8 innerhalb des Betrachtungszeitraums an-

steigen. Die erzielbare Jahresarbeitszahl JAZ für den einstufigen Betrieb erhöht sich somit von derzeit 4,0 auf maximal 4,3 /Lambauer et al. 2008/, /Ochsner 2006/ (vgl. Tabelle 3-10).

Tabelle 3-10: Kennzahlenentwicklung Wärmepumpe 143 kW_{th} nach Leistungszahl und Jahresarbeitszahl /Ochsner 2006/, /Lambauer et al. 2008/

Kategorie	heute	Potenzial 2030
	[-]	[-]
Leistungszahl	6	6,8
Jahresarbeitszahl	4,0	4,3

3.5.3 Komponentenbasierte Ermittlung der wirtschaftlichen Kennwerte

Für die Betrachtung der Investitionskostenpotenziale (vgl. Tabelle 3-11) wird von einer Referenzanlagengröße von 143 kW_{th} ausgegangen. Externe, anwendungsabhängige Kosteneinflussfaktoren, insbesondere Bohrkosten, werden bei der Potenzialbestimmung nicht berücksichtigt.

Da es sich auch bei der Wärmepumpe um eine ausgereifte und marktetaillierte Technik handelt, ist nicht mit Einsparungen durch Techniksprünge zu rechnen. Die ermittelten Investitionskosteneinsparpotenziale lassen sich ausschließlich aus Lerneffekten herleiten.

Tabelle 3-11: Komponentenrahmendaten Wärmepumpe 143 kW_{th} /Ochsner 2006/, /eigene Berechnungen/, /EWU verschiedene Jahrgänge/

Komponente	Spez. Investitionskosten heute	Skalierungsfaktor	Lernfaktor	Floor costs	Spez. Investitionskostenpotenzial 2030
	[€/kW _{th}]	[-]	[-]	[€/kW _{th}]	[€/kW _{th}]
Verdampfer	32	0,72	0,81	30	30
Verdichter	45	0,72	0,68	35	35
Kondensator	32	0,72	0,81	30	30
Steuerung	21	0	0,54	20	20
Verrohrung/Ventile	15	0,7	0,68	12	12
Gehäuse	8	0,7	0,68	8	8
SUMME	152	0,60	0,70	135	135

Es zeigt sich, dass die Investitionskostenenkungen auf Basis des Lernkurvenansatzes für sämtliche Komponenten der Wärmepumpe an ihr theoretisches Minimum (floor costs) stoßen. Hintergrund ist der nahezu ausschließliche Aufbau der Technik aus Standardkomponenten. Für die Referenzanlagengröße ergeben sich im Betrachtungszeitraum Kostensenkungspotenziale von etwa 10 %.

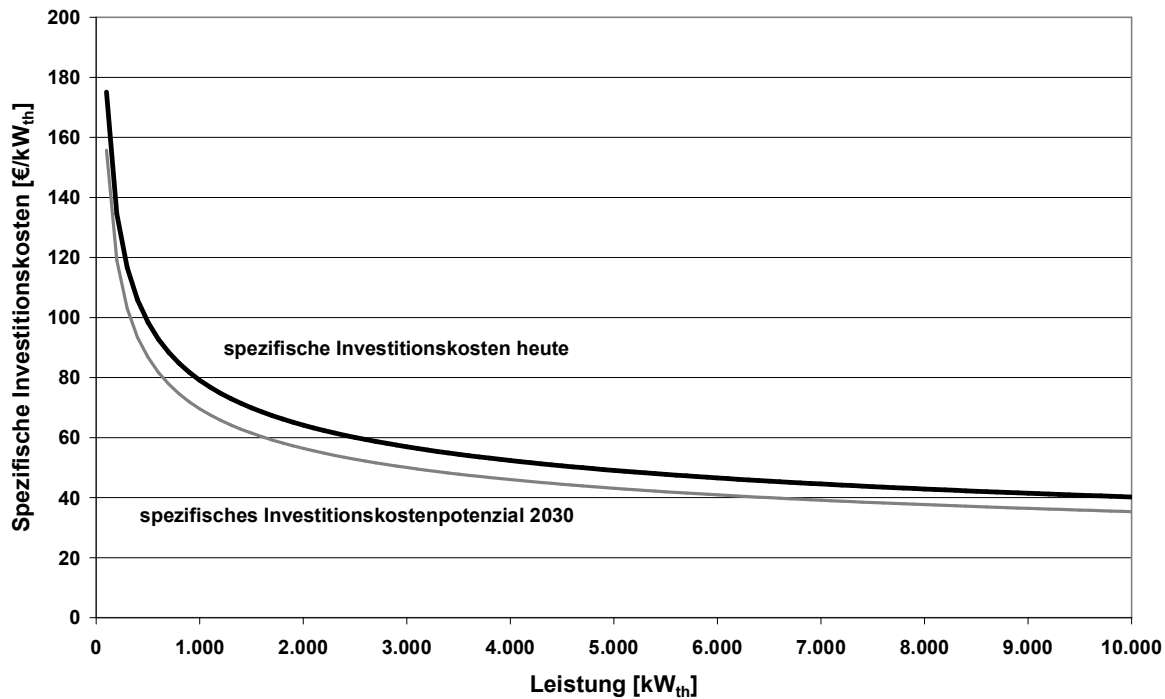


Abbildung 3-14: Leistungsgrößenbezogener Verlauf der spezifischen Wärmepumpeninvestitionskostenpotenziale für heute und 2030 im Bereich bis $10 \text{ MW}_{\text{th}}$ heute und im Jahr 2030

Die über den betrachteten Leistungsbereich skalierten spezifischen Investitionskostenverläufe der Wärmepumpengenerationen sind in Abbildung 3-14 grafisch aufbereitet.

3.5.4 Zusammenfassung Wärmepumpe

Wärmepumpen sind in einem derzeitigen Leistungsbereich von wenigen kW_{th} bis etwa $10 \text{ MW}_{\text{th}}$ am Markt verfügbar. Der Temperaturbereich für den Einsatz in der betrieblichen Praxis reicht bis etwa $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Eine Ausweitung des Temperaturbereichs ist zwar technisch möglich, etwa durch den Einsatz von Verdichterkaskaden, aus energetischen und wirtschaftlichen Aspekten in der Regel jedoch nicht sinnvoll. Somit kann die Wärmepumpe insbesondere im Bereich der industriellen Prozesswärmeversorgung nur ein limitiertes technisches Einsatzpotenzial erreichen.

Für den Betrachtungszeitraum bis 2030 können insgesamt technische Optimierungspotenziale, bezogen auf die Jahresarbeitszahl, von 4,0 auf 4,3 abgeleitet werden.

Wärmepumpen bestehen beinahe ausschließlich aus Standardteilen und sind darüber hinaus seit Jahrzehnten am Markt etabliert. Wegen der hohen Installationsraten ergeben sich weitere Reduktionspotenziale bei den Investitionskosten im Bereich von etwa 11 % über den gesamten Betrachtungszeitraum. Darin sind allerdings die Aufwendungen für Peripheriekosten (bspw. für Bohrungen) nicht enthalten.

4 Industrieller Nutzwärmebedarf ausgewählter Branchen und Betriebe in Deutschland gesamt

Der Wärmebedarf der Industrie in Deutschland beträgt circa $450 \text{ TWh}_{\text{th}}/\text{a}$ (Stand 2008) /AGEB 2011/. Der überwiegende Anteil entfällt auf die Prozesswärmeversorgung, dessen Anteil am Endenergieverbrauch in Deutschland ca. 17 % beträgt. Da dieser Wärmebedarf auf verschiedenen Temperaturniveaus auftritt, bedürfen diese Angaben einer weiteren Differenzierung. Die untersuchten Wärmeerzeugungstechniken weisen als Wärmequellen unterschiedliche prinzipbedingte Maximaltemperaturen auf. Am jeweiligen prozessspezifischen Temperaturniveau entscheidet sich somit, welche Technik für den entsprechenden Prozess bzw. die entsprechende Wärmeversorgungsaufgabe eingesetzt werden kann. Somit ist für die Dimensionierung der Wärmeerzeugungsanlagen und die Bestimmung ihrer Einsatzpotenziale die Kenntnis des jeweiligen temperaturspezifischen Wärmebedarfs einer industriellen Anwendung unabdingbar. Da die Arbeitstemperaturen der einzelnen Prozesse unterschiedlich sind, ist zunächst die komplette Zerlegung des Produktionsprozesses in seine Einzelprozesse erforderlich. Hierzu wird das Verfahren der prozessspezifischen Wärmebedarfsanalyse eingesetzt, dessen grundsätzliche Vorgehensweise in Kapitel 2.4 ausführlich beschrieben ist.

Die Vorteile der Prozessmethode zur Wärmebedarfsermittlung umfassen neben der Differenzierung nach unterschiedlichen Temperaturniveaus die personalstärkenunabhängige und produktionsmengenvariable Bestimmung des Wärmebedarfs. Durch den modularen Aufbau der Betriebsprozessstruktur können Optimierung und Austausch einzelner Verfahrensschritte leicht nachvollzogen werden.

In der Praxis besitzt nicht jeder Einzelprozess seine eigene Wärmequelle. Stattdessen werden mehrere Prozesse mit ähnlichen Temperaturniveaus zusammengefasst und zentral aus einer Quelle versorgt. Hierzu stehen, bspw. mit den Prozessdampfschienen, verschiedene Übertragungswege zur Verfügung, die nachfolgend in ihrer Wirkweise und ihrem Einfluss auf die Wärmebilanz erläutert werden (vgl. Abschnitt 4.1).

Auf Basis der in den Abschnitt 4.1 gewonnenen Erkenntnisse erfolgt dann in Abschnitt 4.2 die Bestimmung des Wärmebedarfs ausgewählter Anwendungsfälle der industriellen Wärmebereitstellung. Bei den behandelten Betrieben handelt es sich um Papierfabriken, Brauereien, eine Zuckerfabrik sowie Automobilmontagewerke. Zur Berücksichtigung größenspezifischer Einflussfaktoren (bspw. Investitionskosten oder Energiepreise) werden, mit Ausnahme der Zuckerfabrik, jeweils unterschiedliche Betriebsgrößen betrachtet.

Die gewonnenen Daten der Einzelbetriebe dienen als Grundlage der weiteren Untersuchungen, u. a. im Rahmen einer Monte Carlo-Simulation, die in Kapitel 5 durchgeführt werden.

In Kapitel 4.3 wird schließlich auf Basis der prozessspezifischen Analyse der Prozesswärmebedarf der Industrie in Deutschland in Abhängigkeit des Temperaturniveaus auf die einzelnen Branchen heruntergebrochen.

4.1 Methoden der Wärmeübertragung für industrielle Anwendungen

Nach der Bestimmung des spezifischen und absoluten Nutzwärmebedarfs für einzelne Industriezweige stellt sich bei der Auslegung von Wärmeerzeugungsanlagen die Frage nach der Art der Wärmeübertragung von der Erzeugungstechnik zu den jeweiligen Prozessen. Hierzu stehen prinzipiell drei Möglichkeiten zur Verfügung, die sich bezüglich ihres apparativen Aufwands und ihrer energetischen Effektivität deutlich unterscheiden. Diese sind nachfolgend beschrieben. Unter Berücksichtigung des jeweiligen methodenspezifischen Wärmeübertragungsverlusts können betriebliche Anwendungen dimensioniert und die Gesamteinsatzpotenziale von Erzeugungstechniken bestimmt werden.

4.1.1 Direkte Abgasnutzung

Die direkte Abgasnutzung erfolgt ohne Zwischenschaltung von Wärmeübertragern, d. h., die Wärme wird direkt mit dem Abgasstrom an die Stelle des Bedarfs geführt (vgl. Abbildung 4-1). Eine Regulierung der Temperatur ist damit nur eingeschränkt möglich (bspw. über die Verweilzeit). Außerdem enthalten Verbrennungsabgase in der Regel zahlreiche Schadstoffe, weshalb diese Art der Wärmenutzung nur für vergleichsweise wenige Prozesse mit thermisch weniger sensiblen Materialien angewandt werden kann, v. a. bei der Metallerzeugung, der Glas- oder der Baustoffindustrie. Diese Prozesse sind überwiegend im Hochtemperatursektor zu finden. In den Temperaturzonen der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Wärmeerzeugungstechniken kann diese Methode der Wärmenutzung v. a. für einige Trocknungsprozesse und im Lebensmittelsektor zur Räucherung eingesetzt werden.

Wegen des geringen apparativen Aufwands stellt die direkte Abgasnutzung die energetisch und wirtschaftlich günstigste Art der Wärmenutzung dar, da die entsprechenden Investitionskosten und die zugehörigen Wärmeverluste gering gehalten werden können.

Die auftretenden Verluste, die dem Restwärmeinhalt des Abgasstroms entsprechen werden berechnet mit Gleichung (4-1):

$$Q_{\text{Verlust}} = Q_{\text{Abgas}} - Q_{\text{Gut}} \quad (4-1)$$

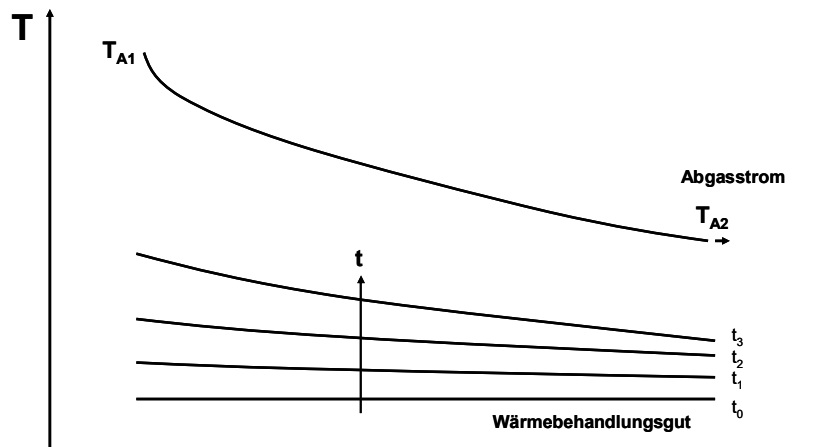


Abbildung 4-1: Temperaturverlauf der direkten Wärmeübertragung für unterschiedliche Zeitpunkte t

4.1.2 Prozessdampferzeugung

Eine gebräuchliche Methode zur Wärmeversorgung industrieller Prozesse stellt die Prozessdampferzeugung dar. Die Prozessdampfversorgung hat den Vorteil, dass zahlreiche verschiedenartige Prozesse an verschiedenen Stellen innerhalb eines Betriebs mit einem Wärmeträgermedium versorgt werden können (Prozessdampfschiene). Bei sehr großen Anlagen mit hohem Wärmeaufkommen, wie etwa Kraftwerken oder Müllverbrennungsanlagen, können innerhalb eines Betriebes auch mehrere Prozessdampfschienen mit unterschiedlichen Temperatur- und Druckstufen eingesetzt werden. Ein weiterer Vorteil der Prozessdampfversorgung ist die Anwendbarkeit bei Prozessen, die Keimfreiheit voraussetzen, insbesondere in der Lebensmittel- und der pharmazeutischen Industrie, aber auch in Krankenhäusern und Großküchen. Während bei den letzteren Beispielen aufgrund der geringen Jahresnutzungen elektrisch betriebene Dampferzeugungssysteme dominieren, werden in der Industrie Dampferzeuger überwiegend aus thermischen Quellen, wie etwa BHKW oder Erdgasbrennwertkessel, versorgt.

Die Übertragung der Wärme von der Wärmequelle auf den Dampfkreislauf erfolgt im Prinzip dreistufig (vgl. Abbildung 4-2). In der ersten Phase wird das flüssige Kondensat, das i. d. R. eine Temperatur von 90 °C aufweist, bis zur Verdampfungstemperatur vorgewärmt (Vorwärmung). Im zweiten Schritt wird das Kondensat isotherm verdampft (Verdampfung). Der Abgasstrom kann in der Praxis nur bis auf ein Temperaturniveau von ΔT_{\min} über der Verdampfungstemperatur abgekühlt werden, da sich nur durch ein ausreichend großes Temperaturgefälle die Dimensionierung des erforderlichen Wärmetauschers in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen hält. In der betrieblichen Praxis werden entsprechende Anlagen mit einem ΔT_{\min} von 30 K ausgelegt, bei der Wärmeübertragung von flüssiger zu flüssiger Phase beträgt das ΔT_{\min} in Folge des besseren Wärmeübergangs 5 K /Ohl et al. 2007/. In der dritten Stufe wird der vollständig gasförmige Dampfmassenstrom auf die Endtemperatur überhitzt

(Überhitzung). Bei Sattdampfsystemen wird der Dampfmassenstrom lediglich auf das Temperaturniveau der Verdampfung gebracht; die Überhitzungsstufe entfällt.

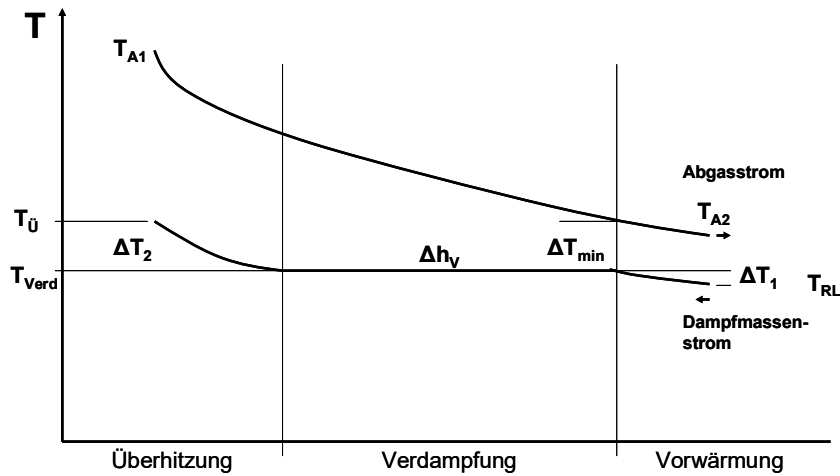


Abbildung 4-2: Temperaturverlauf der Dampferzeugung

Die sich ergebende Enthalpiebilanz der Dampferzeugung aus Abgasströmen ist in Gleichung (4-2) dargestellt.

$$\dot{m}_{Abgas} \cdot \bar{c}_{p,Abgas} \cdot (T_{A1} - T_{A2}) = \dot{m}_{Dampf} \cdot (\bar{c}_{p,L} \cdot \Delta T_1 + \bar{c}_{p,D} \cdot \Delta T_2 + \Delta h_v) \quad (4-2)$$

mit

\dot{m} Massenstrom

\bar{c}_p mittlere spezifische Wärmekapazität

T Temperatur

ΔT Temperaturdifferenz

Der Wärmenutzungsgrad η errechnet sich dann gemäß Gleichung (4-3) aus dem Quotienten des im Dampfstrom enthaltenen Energieanteils zum Gesamtenergieaufkommen des Abgasstroms:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{Dampf}}{\dot{Q}_{Abgas}} \quad (4-3)$$

Die Höhe dieser Kennziffer hängt v. a. vom Verhältnis zwischen Abgastemperatur und Verdampfungstemperatur ab. Je höher dieser Quotient ausfällt, desto mehr Energie kann der Dampfstrom aufnehmen und desto effizienter ist die Wärmeübertragung in technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Hinsicht, falls die verbleibende Abgasmenge nicht weiter genutzt werden kann, bspw. für die Versorgung von NT-Prozessen.

Wegen der auftretenden Temperaturdifferenzen und des großen apparativen Aufwands ist die Prozessdampferzeugung mit hohen energetischen Verlusten und erheblichen Kosten verbunden. In der Praxis können aufgrund des dargestellten Temperaturverlaufs etwa 20-30 % der von der Wärmequelle gelieferten Wärme nicht auf das Dampfnetz übertragen werden und gehen, mit entsprechenden Auswirkungen auf die wirtschaftliche und ökologische Bilanz, in der Regel ungenutzt verloren.

4.1.3 Übertragung auf Fluidstrom (Luft, Wasser)

Bei der meistgenutzten Methode der Wärmeübertragung wird die erzeugte Wärme an einen Fluidstrom ohne Phasenänderung abgegeben. Dabei handelt es sich meistens um Wasser, wie etwa bei den allermeisten Raumwärmeversorgungsanlagen. Für industrielle Prozesse werden auch Thermoöle (bspw. in Großbäckereien oder bei der Asphaltproduktion) oder Luft (insbes. bei Trocknungsprozessen) eingesetzt.

Die Temperaturdifferenz zwischen Abgas- und Luftstrom in der Praxis beträgt, analog zur Prozessdampferzeugung, in der Regel zwischen Gas- und Flüssigkeitsströmen 30 K, zwischen Flüssig-Flüssig-Strömen 5 K. Ursache für die unterschiedlichen Temperaturdifferenzen ist der höhere Wärmedurchgangskoeffizient, der sich mit flüssigen Medien erreichen lässt /Ohl et al. 2007/, /Ohl et al. 2008/. In der Folge kommen Flüssig-Flüssig-Wärmetauscher mit geringeren Übertragungsflächen und damit niedrigeren Investitionskosten aus. Die Temperaturverläufe des Abgas- und des Fluidstroms sind in Abbildung 4-3 schematisch für den energetisch günstigeren und in der Praxis dominierenden Gegenstrombetrieb dargestellt.

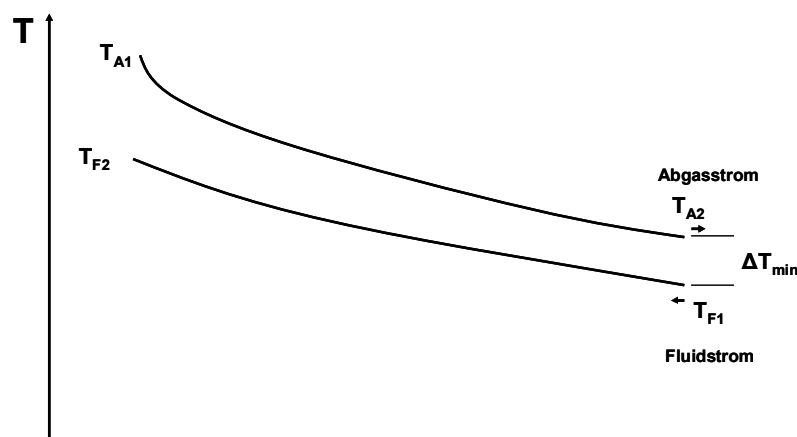


Abbildung 4-3: Temperaturverlauf der Wärmeübertragung von Abgas- auf Fluidstrom

Die Ermittlung der energetischen Verluste bei dieser Art der Wärmeübertragung erfolgt mittels der Gleichung (4-4)

$$Q_V = \frac{m \cdot c_p \cdot \Theta_{\ln}}{m \cdot c_p \cdot (T_{\max} - T_{\text{amb}})} \quad (4-4)$$

mit

- m Massenstrom
 c_p spezifische Wärmespeicherkapazität
 T Temperatur
 Θ_{\ln} logarithmische Temperaturdifferenz

mit der logarithmischen Temperaturdifferenz gemäß Gleichung (4-5)

$$\Theta_{\ln} = \frac{(T_{A1} - T_{F2}) - (T_{A2} - T_{F1})}{\ln\left(\frac{T_{A1} - T_{F2}}{T_{A2} - T_{F1}}\right)} \quad (4-5)$$

Wegen der geringeren apparativen Komplexität ergeben sich für die Wärmeübertragung auf Fluidströme gegenüber der Dampferzeugung sowohl geringere energetische Verluste als auch niedrigere Investitionskosten. Die auftretenden Verluste werden in der Regel bei der industriellen Wärmebedarfsbilanzierung vernachlässigt.

4.2 Ermittlung von Wärmebedarf und Dimensionierung der Wärmeerzeugungsanlagen für ausgewählte Anwendungsfälle in der Industrie in Deutschland

Nachfolgend wird für ausgewählte industrielle Anwendungsfälle der jeweilige Wärmebedarf auf Basis der Einzelprozesse und der Lastgänge ermittelt. Aus diesen Daten lässt sich, unter Berücksichtigung der Temperaturverhältnisse von Wärmebedarf und Wärmebereitstellung, die Anlagendimensionierung vornehmen. Ebenso können hiermit die für die jeweils eingesetzten Prozessdampferzeugungssysteme auftretenden Wärmeverluste bestimmt werden.

Bei den betrachteten Anwendungsfällen handelt es sich um Papierfabriken, Brauereien, eine Zuckerfabrik und Automobilmontagewerke. Mit Ausnahme der Zuckerfabrik werden jeweils verschiedene Betriebsgrößen untersucht, damit unterschiedliche Prozessschemata und Kennwerte der Wärmeerzeugungstechniken Berücksichtigung finden können.

Die Auswahlkriterien der Fälle umfassen neben der allgemeinen Relevanz den Temperaturbedarf und die zu erwartende Beständigkeit der Prozesskennwerte über den Betrachtungszeitraum. So besteht bei den gezeigten Anwendungen kein Wärmebedarf im Hochtemperatursegment, der mit den untersuchten Wärmeerzeugungstechniken in keinem Fall zu decken wäre.

Ein Großteil der eingesetzten Prozesse wird über Dampfsysteme (vgl. Abschnitt 4.1.2) versorgt. In diesen Fällen liegt die Prozessdampf­temperatur über der eigentlichen Prozesstemperatur. Insbesondere für Niedertemperatur­anwendungen wird die Fluidübertragung auf Wasserkreisläufe eingesetzt, hierzu zählen auch die Raumheizung und Warmwasserbereitstellung (vgl. Abschnitt 4.1.3). Eine direkte Übertragung von Wärme aus dem Abgasstrom in den Prozess, wie in Abschnitt 4.1.1 dargestellt, findet bei den betrachteten Anwendungen nicht statt.

Die Dimensionierung der Wärme­erzeugungsanlagen erfolgt nicht auf dem Maximalwert des jeweiligen Wärmebedarfs, sondern, wie in der Praxis üblich, in einem Bereich zwischen 70 und 90 %. Dieser Einflussparameter wird in der nachfolgenden Monte Carlo-Simulation (vgl. Kapitel 5) variiert. Die dabei jeweils fehlenden Wärmemengen werden, bei Bedarf, aus dem Spitzenkessel zugeliefert.

4.2.1 Papierfabriken

In Deutschland produzierten im Jahr 2006 etwa eintausend Papierfabriken insgesamt 22 Millionen Tonnen Papier und Papierprodukte /VdP 2007/. Die Angebotspalette reicht von Schreib- über Zeitungs- oder Hygienepapieren bis hin zu Verpackungsmaterialien (v. a. Pappe bzw. Kartonagen). Außerdem werden Spezialpapiere, bspw. für Zahlungsmittel und Wertpapiere oder Anwendungen in der Fotografie, hergestellt.

Als Rohstoff für die Papierproduktion dient neben Zell- und Holzstoff v. a. recycletes Altpapier. In Deutschland werden aktuell etwa 2/3 der Papierproduktion rezykliert in den Stoffkreislauf zurückgegeben /VdP 2007/. Hauptvorteil des Recyclings ist der deutlich geringere Energieaufwand gegenüber der Neuproduktion von Holz- oder Zellstoff. Altpapierrecycling wird bereits in vielen großen und nahezu allen mittelgroßen Papierfabriken betrieben, wohingegen die Eigenproduktion von Zellstoff Großbetrieben vorbehalten ist. Kleinere und mittlere Papierfabriken decken ihren Zellstoffbedarf überwiegend durch Zukauf, v. a. aus dem Ausland. Die übrigen wärmebedarfsrelevanten Prozesse (vgl. Tabelle 4-1) sind weitgehend unabhängig von der Größe der Papierfabrik.

Für die Untersuchung des Anwendungs­falls Papierfabrik werden drei typische Papierfabriken aus den Größenklassen „groß“ (300.000 t/a), „mittel“ (150.000 t/a) und „klein“ (50.000 t/a) ausgewählt.

Bei der großen Papierfabrik wird der Rohstoffbedarf zu 64 % aus Altpapier gedeckt, der verbleibende Zellstoffbedarfsanteil von 36 % wird aus einer eigenen Zellstoffproduktionslinie gedeckt.

Zusätzlich wird bei der Ermittlung der zuzuführenden Wärmemenge noch ein geringer Wärmegewinn durch die Verbrennung der bei der Zellstoffproduktion anfallenden Ablauge in Höhe von $3,07 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{t}_{\text{Produkt}}$, insgesamt $331 \text{ MWh}_{\text{th}}/\text{a}$, berücksichtigt. Neben dem energetischen Gewinn erfolgt die Ablaugeverbrennung v. a. aus Gründen der Reduktion des Entsor-

gungsbedarfs. Es ergibt sich ein Gesamtwärmebedarf von rund 1,3 TWh_{thNutz}/a. BHKW, Brennwärtekessel und MCFC können zur Wärmeversorgung sämtlicher Prozesse genutzt werden, wohingegen die ORC-Anlage und die Wärmepumpe lediglich zur Deckung des Wärmebedarfs der Recyclingstufe sowie für die Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung eingesetzt werden können.

Tabelle 4-1: Wärmebedarfsdaten des Anwendungsfalls Papierfabrik /BWPLUS 2008/

	Prozess	Temperatur		Papierfabrik groß		Papierfabrik mittel		Papierfabrik klein	
		T _U	T _O	q _{Nutz}	Q _{Nutz}	q _{Nutz}	Q _{Nutz}	q _{Nutz}	Q _{Nutz}
		[°C]	[°C]	[kWh _{thNutz} /t]	[GWh _{thNutz} /a]	[kWh _{thNutz} /t]	[GWh _{thNutz} /a]	[kWh _{thNutz} /t]	[GWh _{thNutz} /a]
Pro- duk- tion	Zellstoff kochen	20	100	1.972,09	212,99	0	0	0	0
	Ablaugeindickung	90	130	888,75	95,98	0	0	0	0
	Zellstofftrocknung	20	100	1.194,15	128,97	0	0	0	0
	Altpapierrecycling	20	45	44,88	13,46	44,88	6,73	0	0
	Papierbahn- trocknung	20	100	2.400,00	720,00	2.400,00	360,00	2.400,00	120,00
all- gemei- n	Raumwärme	40	60	475,10	142,53	475,10	71,26	475,10	23,79
	Warmwasser	10	60	50,05	15,01	50,05	7,51	50,05	2,50
	Summe Wärmebedarf	-	-	7.021,94	1.328,95	2.970,03	445,50	2.925,15	146,29

Bei der mittelgroßen Papierfabrik besteht der Rohmaterialbedarf zu 64 % aus Altpapier, der zusätzliche Rohstoffbedarf wird zugekauft. In der Summe aller Einzelprozesse ergibt sich ein Nutzwärmebedarf von 445,5 GWh_{thNutz}/a. Ein Einsatz einer Wärmepumpe oder einer ORC-Anlage ist während des betrachteten Zeitraums lediglich zur Deckung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs sowie zum Altpapierrecycling möglich. Der übrige Wärmebedarf wird bei diesen Versorgungsalternativen vom Spitzenlastbrennwärtekessel gedeckt.

Der Nutzwärmebedarf der kleinen Papierfabrik beträgt 146.257 MWh_{thNutz}/a. Bei dieser Betriebsgröße werden die Wärmepumpe oder eine ORC-Anlage wegen der geforderten Prozess-temperaturen nur für die Abdeckung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs eingesetzt.

Die zeitliche Lastverteilung der einzelnen Prozesse der Papierfabriken erfolgt gemäß den Vorgaben von /Pröger, Blank 1996/ und den Arbeitszeitmodellen der Papierindustrie /eigene Recherche/ in Abhängigkeit der Betriebsgröße. Auf Basis dieser Angaben werden für die temperaturspezifischen Bedarfssegmente Niedertemperatur und Prozessdampf für jeden Monat des Jahres jeweils Lastganglinien für verschiedene Typtage (Werktage, Samstage und Sonntage) erstellt. Aus diesen Lastganglinien wird schließlich durch Ranking der sich ergebenden Gesamtbedarfswerte die Jahresdauerlinie (vgl. Abbildung 4-4) ermittelt.

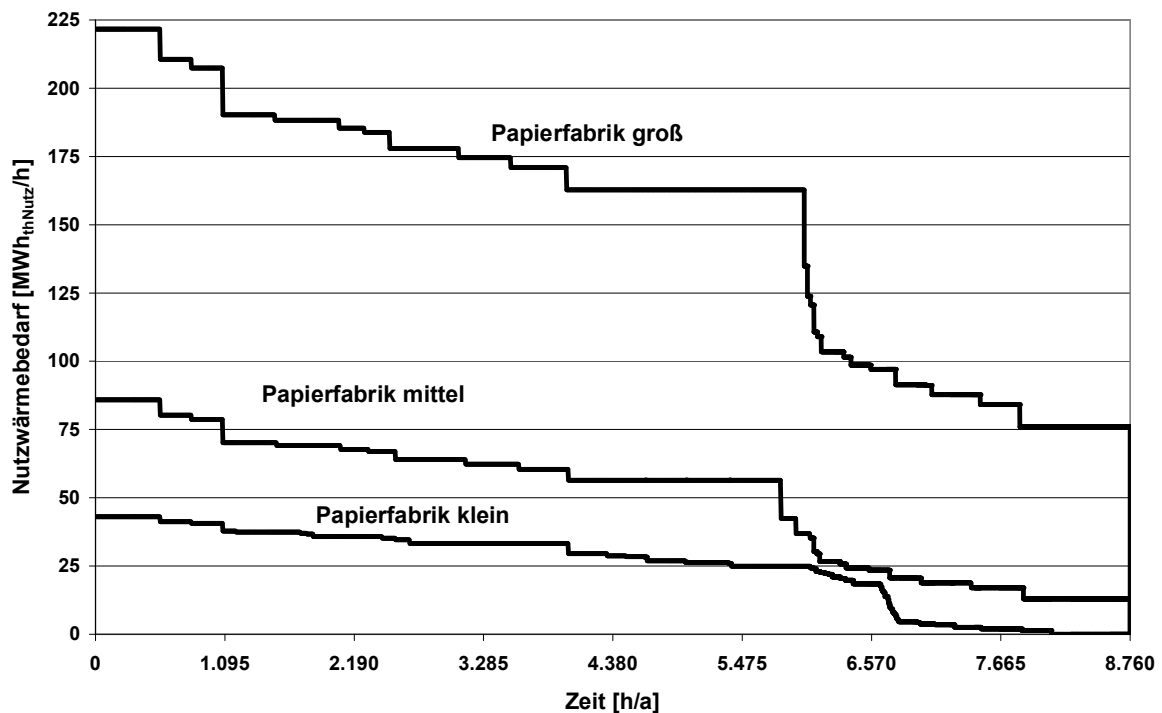


Abbildung 4-4: Jahresdauerlinien des Nutzwärmebedarfs der verschiedenen Typen von Papierfabriken

Die Wärmeversorgung von Papierfabriken wird für die Anwendungen mit einem Temperaturbedarf ab 100 °C größenunabhängig mittels Dampfsystemen durchgeführt. Als Standarddampfparameter hat eine Temperatur von 180 °C in den Papierfabriken weite Verbreitung gefunden, auf welche die Dampferzeugungssysteme ausgelegt werden.

Es ergeben sich Maximalwerte des Nutzwärmebedarfs von 221,7 MW_{thNutz} für die große Papierfabrik, von 85,8 MW_{thNutz} für die mittelgroße Papierfabrik und von 43,6 MW_{thNutz} für die kleine Papierfabrik.

Über die Dampfschiene werden bei der großen Papierfabrik 6.851 MWh_{thNutz}/a, bei der mittelgroßen 360 MWh_{thNutz}/a und bei der kleinen 120 MWh_{thNutz}/a übertragen. Auf die Niedertemperaturwärmeversorgung entfallen dementsprechend 171 MWh_{thNutz}/a (2,5 %) bzw. 86 MWh_{thNutz}/a (19 %) bzw. 26 MWh_{thNutz}/a (18 %).

Der Anteil der Niedertemperaturwärme am Gesamtwärmeverbrauch fällt für die Anwendungsfälle der untersuchten Papierfabriken, insbesondere für die große Anlage, gering aus. Bei den Versorgungsvarianten ORC-Anlage und Wärmepumpe findet aufgrund des Temperaturkriteriums Dampferzeugung ausschließlich über den Spitzenkessel statt, dessen Emissionen in jedem Fall CO₂-behaftet sind.

Die bei der Dampferzeugung für die verwendeten Dampfparameter temperaturverhältnisbedingten Verluste betragen beim BHKW-Einsatz 23 %, 34 % bei der MCFC und 19 % für den Brennwertkessel.

Neben dem verfügbaren Temperaturniveau einer Wärmeerzeugungstechnik stellt auch die Wirtschaftlichkeit ein Kriterium bei der Anlagendimensionierung dar. So werden in der be-

trieblichen Praxis KWK-Techniken in einem Wertebereich zwischen etwa 70 und 90 % der benötigten Maximallast installiert (vgl. Abschnitt 5.1), bei einer höheren Betriebsauslastung wird die zusätzlich benötigte Wärme aus dem Spitzenkessel bezogen. Der Spitzenkessel deckt auch die Revisions- und Ausfallzeiten der KWK-Module ab. Die Dimensionierung des Spitzenkessels erfolgt auf 125 % der derzeitigen Maximallast. In der Praxis dient diese Überdimensionierung als Reserve, bspw. für den Fall von Produktionssteigerung oder Änderungen der Betriebsstruktur. Im Falle der Versorgungsvariante Brennwärtekessel entfällt die Unterscheidung in KWK-Technik und Spitzenkessel. Stattdessen wird von einer festen Anlagengröße in Höhe von 160 % der auftretenden Maximallast ausgegangen.

Die sich ergebenden Anlagengrößen der einzelnen Versorgungsalternativen für die einzelnen Werksgrößen der Papierproduktion sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

Tabelle 4-2: Dimensionierungswerte der einzelnen Versorgungskonzepte im Anwendungsfall der Papierfabriken

			P_{\min}	P_{\max}	Spitzenkessel
					[MW _{th}]
Papierfabrik groß	BHKW	[MW _{el}]	124,1	159,5	277,1
	MCFC	[MW _{el}]	214,5	275,8	277,1
	ORC-Anlage	[MW _{el}]	9,4	12,1	277,1
	Brennwärtekessel	[MW _{th}]	354,7		
	Wärmepumpe	[MW _{th}]	44,2	56,9	277,1
Papierfabrik mittel	BHKW	[MW _{el}]	47,1	60,6	107,3
	MCFC	[MW _{el}]	83,1	106,8	107,3
	ORC-Anlage	[MW _{el}]	4,4	5,7	107,3
	Brennwärtekessel	[MW _{th}]	137,3		
	Wärmepumpe	[MW _{th}]	22,1	28,4	107,3
Papierfabrik klein	BHKW	[MW _{el}]	23,6	30,4	53,8
	MCFC	[MW _{el}]	41,6	53,5	53,8
	ORC-Anlage	[MW _{el}]	1,5	1,9	53,8
	Brennwärtekessel	[MW _{th}]	68,9		
	Wärmepumpe	[MW _{th}]	7,4	9,4	53,8

Die Papierindustrie erweist sich aufgrund der umfangreichen Prozessstruktur und der hohen Produktionsmenge als die energieintensivste unter den betrachteten Branchen, was sich auch in den benötigten Wärmeversorgungskapazitäten niederschlägt.

Insbesondere im Fall der großen Papierfabrik übersteigt der hohe Leistungsbedarf im dreistelligen MW-Bereich die maximal am Markt verfügbaren Modulgrößen von KWK-Techniken und Spitzenlastkessel. Der Leistungsbedarf wird daher durch die Installation mehrerer Module maximaler Leistungsgröße abgedeckt.

Die ermittelten Anlagendimensionen finden Anwendung bei der ökonomischen und ökologischen Analyse der Einsatzfälle, die ab Kapitel 5.3.1 durchgeführt werden.

4.2.2 Brauereien

In Deutschland werden derzeit etwa 1.300 Brauereien unterschiedlicher Größenklassen betrieben, die für das Jahr 2007 eine Gesamtproduktion von 103,95 Millionen hl ausweisen /Stat. Bundesamt 2008/. Signifikant für die Braubranche sind die Unterschiede in der Größe der Betriebe, die durch Standortkonzentrationen einerseits und durch das Entstehen von Lokalbrauereien andererseits eine weitere Polarisierung erfahren haben.

Für die Einzelfalluntersuchung werden Brauereien mit einer Jahreskapazität von 1.000.000 hl bzw. 100.000 t (groß), 300.000 hl/30.000 t (mittel) und 50.000 hl/5.000 t (klein) betrachtet.

Der Brauprozess besteht betriebsgrößenunabhängig aus mehreren Verfahrensschritten. Zunächst werden die Ausgangsstoffe Wasser, Hopfen und Malz in einem sortenspezifisch definierten Verhältnis vermischt und bei 78 °C vermaischt. Nach der Maische wird die Mischung zu Würze gekocht, wobei sich der Wasseranteil durch Verdampfen reduziert. Die Würze wird anschließend gekühlt und mehrere Tage bzw. Wochen zur Reifung gelagert. Anschließend wird das Bier nach einem Filterprozess in versandfertige Behältnisse abgefüllt.

Zusätzlich zu den genannten Prozessen sind aus wärmetechnischer Sicht auch noch die Reinigung von Flaschen und Fässern sowie der Abfüllanlage und der übrigen Produktionsanlagen, welche bei laufendem Betrieb (cleaning in process bzw. CIP) erfolgt, relevant.

Das Verfahrensschema der Bierherstellung aus Sicht des Wärmebedarfs ist zusammen mit den wichtigsten wärmeseitigen Kennwerten in Abbildung 4-5 dargestellt.

Die aus Sicht der Wärmebedarfsdeckung wichtigsten Verfahrensschritte sind das Maischen, die Würzekochung und die Sterilisation der Abfüllanlagen. In der Praxis werden zur Wärmeversorgung Prozessdampfsysteme auf einem Temperaturniveau von 180 °C eingesetzt. Im Bereich der Niedertemperaturprozesswärme existiert als Einsatzbereich neben Raumwärme und Warmwasser nur die Spülung der Filtrationsstufen, die bspw. auch mit Wärmepumpen bedient werden kann. Das Prozessschema der industriellen Bierherstellung ist für alle Größenklassen identisch. Dabei ist berücksichtigt, dass die Malzherstellung bei Betrieben aller Größenklassen mittlerweile überwiegend ausgelagert ist. Zudem ist in der Betrachtung die Wärmerückgewinnung beim Kochprozess über Brüdenkondensationsstufen bzw. Pfannendunstkondensatoren berücksichtigt.

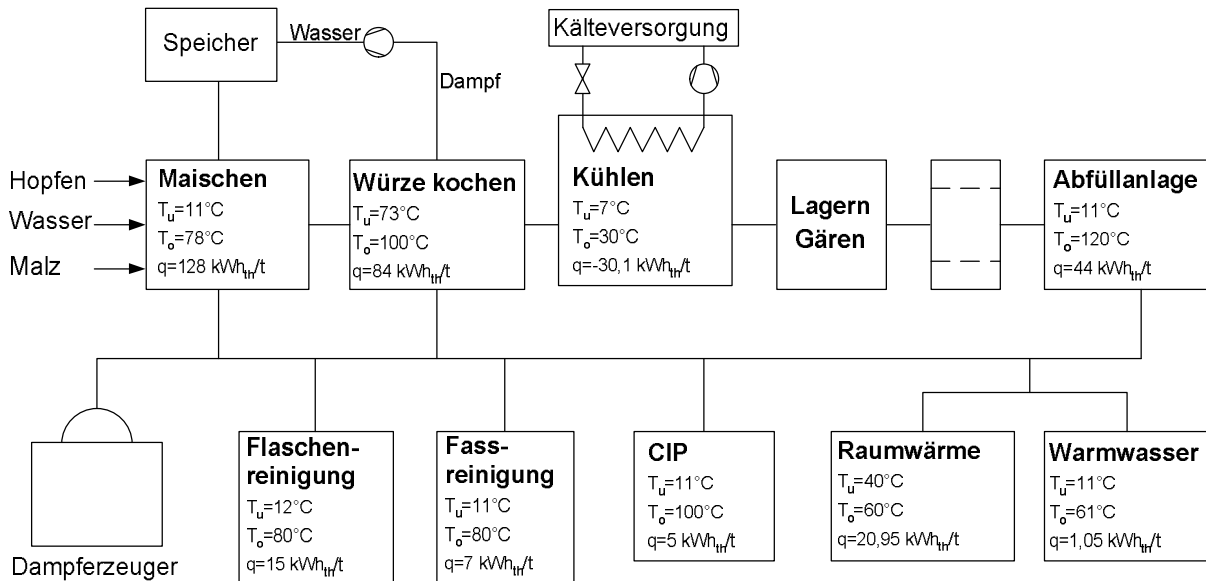


Abbildung 4-5: Verfahrensschema der Bierherstellung aus Sicht der betrieblichen Wärmeversorgung /Remus et al. 2003/, /eigene Recherche/

Die Kältebereitstellung, die aus energetischer Sicht eine untergeordnete Rolle spielt, wird nicht in die Bilanzierung der Wärmeversorgung integriert. Lediglich die beim Betrieb der Untersuchungsvariante Wärmepumpe anfallende Kälte wird mittels einer Gutschrift in der wirtschaftlichen Betrachtung berücksichtigt.

In allen betrachteten Brauereien werden die Wärmemengen über Prozessdampfschienen mit 180 °C zu den Anwendungen transportiert. Dementsprechend sind für die Dampferzeugung temperaturverhältnisbedingte Verluste von 23 % beim BHKW-Einsatz, 34 % bei der MCFC und 19 % für den Brennwärtekessel anzusetzen. Bei den Versorgungstechniken ORC-Anlage und Wärmepumpe sowie mit dem anfallenden NT-Abwärmeanteil des BHKW werden lediglich die Niedertemperaturprozessschritte (Raumwärme, Warmwasser, Filtrationsspülung) versorgt, wodurch das Dampferzeugungssystem entsprechend kleiner dimensioniert werden kann. Bei den Versorgungsvarianten Brennwärtekessel und MCFC wird die gesamte erzeugte Wärmemenge, wie in der Praxis üblich, ins Dampfnetz eingespeist.

Die Wärmebedarfsdaten der einzelnen Prozesse sind in Tabelle 4-3 zusammengestellt.

Tabelle 4-3: Wärmebedarfsdaten des Anwendungsfalls Brauerei /Remus et al. 2003/, /eigene Berechnungen/

	Prozess	Temperatur		Brauerei groß		Brauerei mittel		Brauerei klein	
		T _U	T _O	q _{Nutz}	Q _{Nutz}	q _{Nutz}	Q _{Nutz}	q _{Nutz}	Q _{Nutz}
		[°C]	[°C]	[kWh _{thNutz} /t]	[GWh _{thNutz} /a]	[kWh _{thNutz} /t]	[GWh _{thNutz} /a]	[kWh _{thNutz} /t]	[GWh _{thNutz} /a]
Produktion	Würzebereitung	73	100	83,6	8,36	83,6	2,49	83,6	0,42
	Maischen	11	78	127,9	12,80	127,9	3,84	127,9	0,64
	CIP Sudhaus	11	100	5,2	0,52	5,2	0,16	5,2	0,03
	Reinigung Filtration	11	90	0,6	0,06	0,6	0,02	0,6	0,003
	Spülung Filtration	11	60	0,23	0,02	0,23	0,01	0,23	0,001
	Flaschenreinigung	12	80	15,0	1,50	15,0	0,45	15,0	0,08
	Sterilisation Abfüllanlage	11	120	44,4	4,44	44,4	1,33	44,4	0,22
	Aufheizen Flaschenreinigung	12	80	12,7	1,27	12,7	0,38	12,7	0,06
	Fassabfüllung	11	120	2,5	0,25	2,5	0,08	2,5	0,01
	Fassreinigung	11	80	7,2	0,72	7,2	0,22	7,2	0,04
	Fasssterilisation	11	120	15,2	1,52	15,2	0,46	15,2	0,08
allgemein	Raumwärme	40	60	21,0	2,10	21,0	0,63	21,0	0,10
	Warmwasser	10	60	1,0	0,11	1,0	0,03	1,0	0,01
	Summe Wärmebedarf	-	-	286,6	28,66	286,6	8,60	286,6	1,43

Die zeitliche Auflösung des Wärmebedarfs der untersuchten Brauereigrößen basiert auf /Pröger, Blank 1996/ sowie den Arbeitszeitverteilungen der Brauindustrie /eigene Recherche/, auf deren Basis die Jahresdauerlinien des jeweiligen Gesamtnutzwärmebedarfs (vgl. Abbildung 4-6) bestimmt werden.

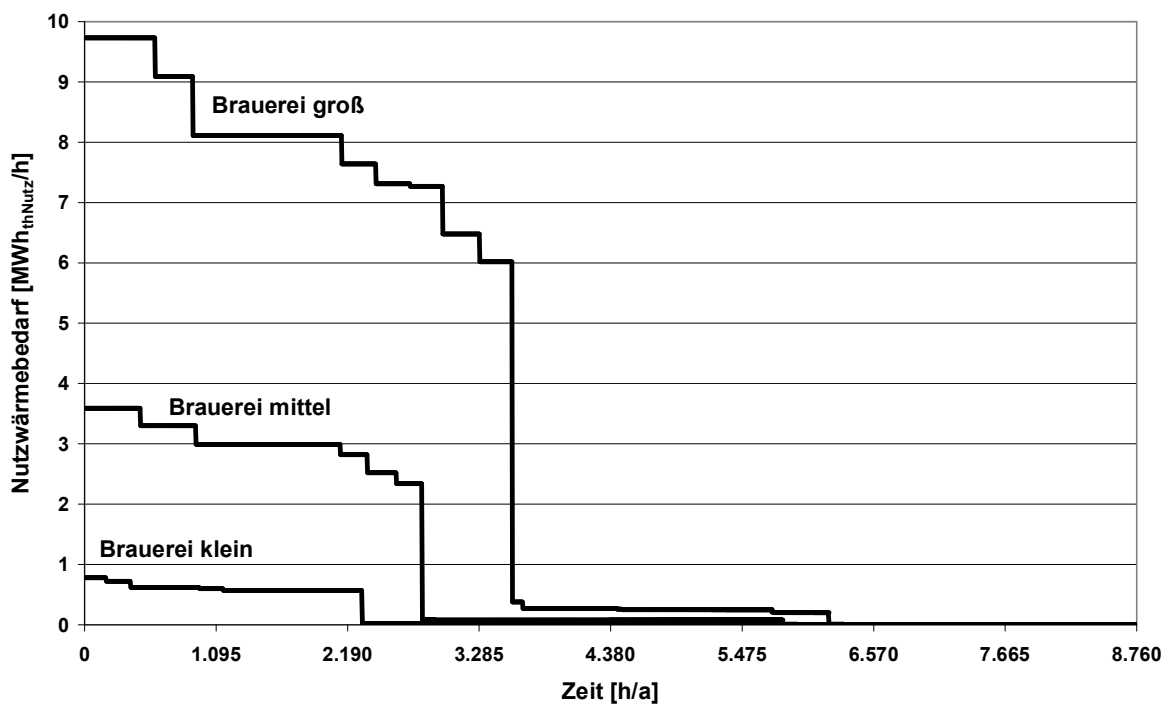


Abbildung 4-6: Jahresdauerlinien des Nutzwärmebedarfs der verschiedenen Typen von Brauereien

Es ergeben sich Spitzenwerte der Nutzwärmeleistungen von $9,8 \text{ MW}_{\text{thNutz}}$ für die Großbrauerei, $3,7 \text{ MW}_{\text{thNutz}}$ für die mittlere Betriebsgröße und $0,9 \text{ MW}_{\text{thNutz}}$ für den Kleinbetrieb.

Über die Dampfschiene werden bei der großen Brauerei $265 \text{ MWh}_{\text{thNutz/a}}$, bei der mittleren $8 \text{ MWh}_{\text{thNutz/a}}$ und bei der kleinen $1,3 \text{ MWh}_{\text{thNutz/a}}$ übertragen. Auf die Niedertemperaturwärmeversorgung entfallen dementsprechend geringe Anteile von jeweils weniger als 8 %. Analog zur den Papierfabriken liegt bei den Versorgungsvarianten ORC-Anlage und Wärmepumpe der mengenmäßige Schwerpunkt der Wärmeproduktion auf dem Spitzenkessel.

Für die Dampferzeugung ergeben sich für die verwendeten Dampfparameter temperaturverhältnisbedingte Verluste von 23 % beim BHKW-Einsatz, 34 % bei der MCFC und 19 % für den Brennwertkessel.

Die Dimensionierung erfolgt analog zu den Papierfabriken. Die sich ergebenden Anlagengrößen der einzelnen Versorgungsalternativen für die einzelnen Brauereigrößen sind in Tabelle 4-4 zusammengefasst.

Tabelle 4-4: Dimensionierungswerte der einzelnen Versorgungskonzepte im Anwendungsfall der Brauereien

			P_{\min}	P_{\max}	Spitzenkessel
					[MW _{th}]
Brauerei groß	BHKW	[MW _{eI}]	5,4	6,9	12,2
	MCFC	[MW _{eI}]	9,5	12,2	12,2
	ORC-Anlage	[MW _{eI}]	0,1	0,2	12,2
	Brennwertkessel	[MW _{th}]	15,6		
	Wärmepumpe	[MW _{th}]	0,7	0,9	12,2
Brauerei mittel	BHKW	[MW _{eI}]	2,0	2,5	4,5
	MCFC	[MW _{eI}]	3,5	4,5	4,5
	ORC-Anlage	[MW _{eI}]	0,04	0,1	4,5
	Brennwertkessel	[MW _{th}]	5,8		
	Wärmepumpe	[MW _{th}]	0,2	0,3	4,5
Brauerei klein	BHKW	[MW _{eI}]	0,4	0,6	1,0
	MCFC	[MW _{eI}]	0,8	1,0	1,0
	ORC-Anlage	[MW _{eI}]	0,01	0,01	1,0
	Brennwertkessel	[MW _{th}]	1,2		
	Wärmepumpe	[MW _{th}]	0,04	0,06	1,0

Gegenüber der Papierfabrik ergeben sich für alle Größenklassen und Wärmeerzeugungstechniken deutlich geringere Leistungswerte. Hierfür sind neben dem geringeren produktmengen-spezifischen Energiebedarf v. a. die geringeren Auslastungszeiten und die deutlich höhere Zahl an Produktionsstandorten in Deutschland verantwortlich.

4.2.3 Zuckerfabriken

In den 22 deutschen Zuckerfabriken wurden im Jahr 2005 etwa 4 Millionen Tonnen Zucker produziert /Mueller 2010/. Hierzu wurden ca. 22 Millionen Tonnen Zuckerrüben verarbeitet. Die heute noch in Betrieb befindlichen 22 Standorte weisen gegenüber anderen Betrieben der

Lebensmittelindustrie (bspw. Brauereien) vergleichsweise geringe Kapazitätsunterschiede auf, so dass alle Fabriken in die Größenkategorie „groß“ gezählt werden können.

Zuckerfabriken werden in einem kampagnenweisen Betrieb gefahren, der sich ursprünglich über ca. 100 Tage von Mitte September bis Ende Dezember erstreckte, sich aber mittlerweile bis in den Januar verlängert hat, um die bestehenden Anlagenkapazitäten intensiver nutzen zu können. In dieser Zeit werden die Anlagen rund um die Uhr mit maximaler Last betrieben, es kann von einer maximalen Volllaststundenzahl von 2.500 h/a ausgegangen werden.

Für die Untersuchung wird eine Zuckerfabrik mit einer Jahresproduktion von 180.000 t betrachtet. Bei der Zuckerherstellung werden die angelieferten Rüben zunächst gewaschen und zerkleinert. Die Schnitzel werden anschließend gewässert, um den Zucker aus dem Zellgewebe zu lösen. Die dabei entstehende Zuckerlösung wird in einem mehrstufigen Prozess getrocknet und schließlich auskristallisiert. Nach einer weiteren Trocknungsphase an der Luft kann der Zucker verpackt bzw. zur Weiterverarbeitung transportiert werden.

Die aus Sicht der Wärmeversorgung wichtigsten Prozesse bei der Zuckerproduktion (vgl. Abbildung 4-7) sind die Dünnsafterzeugung, der Eindickprozess und die abschließende Kristallisation. Die einzelnen Schritte werden über ein Prozessdampfsystem auf einem Temperaturniveau von 180 °C versorgt.

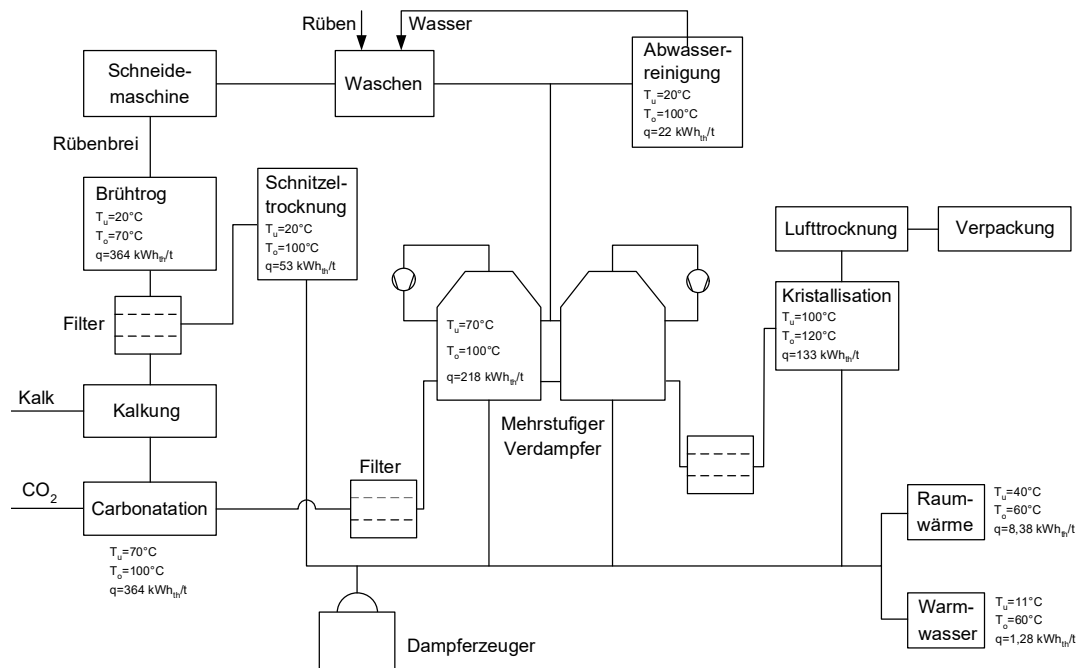


Abbildung 4-7: Verfahrensschema der Zuckerproduktion aus Sicht der Wärmeversorgung

Der NT-Wärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser erweitert sich in Zuckerfabriken um die Aufwendungen der werkseigenen Kläranlagen, in denen die mit hohen organischen Belastungen anfallenden Prozessabwässer geklärt werden.

Bei der Wärmebedarfsermittlung ist die durch Brüdenkondensationsstufen, die in allen Zuckerfabriken Standard sind, zurückgewonnene Energie bereits berücksichtigt.

Die wärmebedarfsrelevanten Prozesse in der Zuckerfabrik und ihre jeweiligen Rahmendaten sind in der Tabelle 4-5 festgehalten.

Tabelle 4-5: Wärmebedarfsdaten des Anwendungsfalls Zuckerfabrik /BWPLUS 2008/

	Prozess	Zuckerfabrik			
		T_u	T_o	q_{Nutz}	Q_{Nutz}
		[°C]	[°C]	[kWh _{thNutz} /t]	[GWh _{thNutz} /a]
Produktion	Dünnsaferzeugung	20	70	363,72	65,47
	Dicksaferzeugung	70	100	218,23	39,28
	Eindicken (incl. Rückgewinnung)	100	120	132,68	23,88
	Schnitzeltrocknung	20	100	53,07	9,55
	Kristallisation	100	120	133,00	23,94
	Carbonatation	70	100	364,00	65,52
	Abwasserreinigung	20	40	22,11	3,98
allgemein	Raumwärme	40	60	8,38	1,51
	Warmwasser	10	60	1,28	0,23
	Summe Wärmebedarf	-	-	1.311,70	236,11

Der Jahreswärmebedarf der Zuckerfabrik ergibt sich zu 236 GWh_{thNutz}/a, die auftretende Spitzenlast liegt bei 82,4 MW_{thNutz} (vgl. Abbildung 4-8).

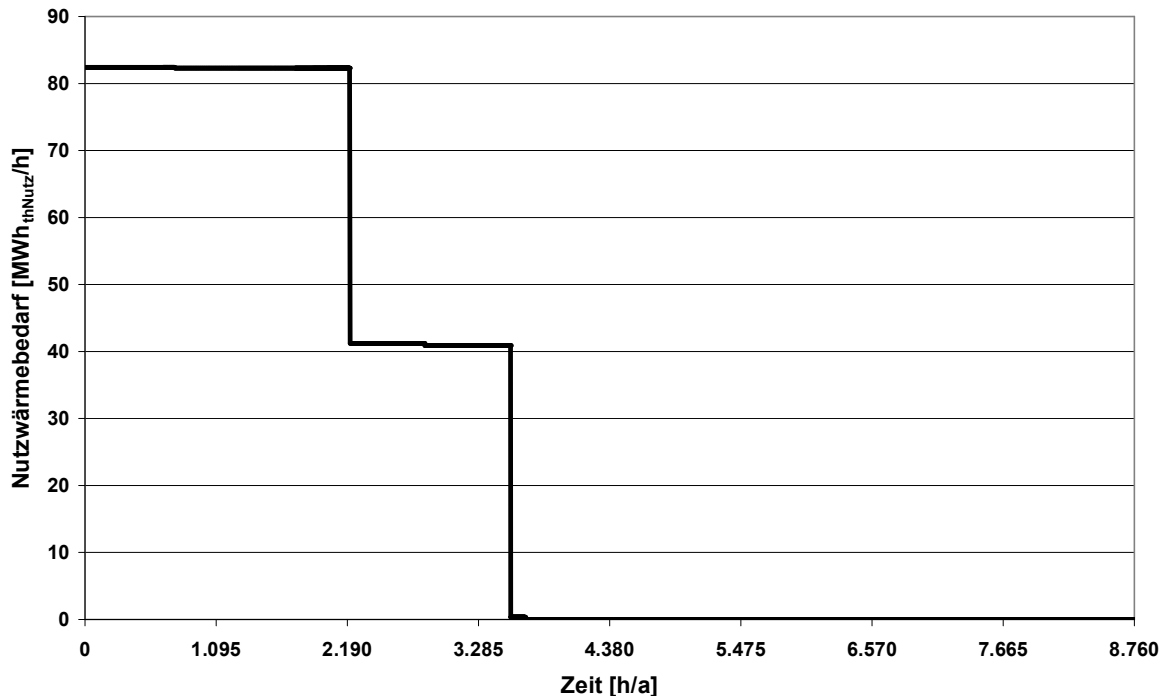


Abbildung 4-8: Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs der Zuckerfabrik

Der Wärmebedarf wird vom Prozesswärmebedarf mit einem Anteil von 99,2 % dominiert, Raumwärme und Warmwasser kommen auf entsprechend geringe Anteile. Bei den Versor-

gungsvarianten ORC-Anlage und Wärmepumpe fallen die Wärmemengenanteile des Spitzenlastkessels dementsprechend hoch aus.

Bei der Dampferzeugung fallen auch in der Zuckerfabrik erzeugungstechnikspezifische Verluste an. Diese betragen für das BHKW 23 %, für die MCFC 34 % und 19 % für den Brennwertkessel.

Die sich aus diesen Werten ergebenden Anlagengrößen der einzelnen Versorgungsalternativen der Zuckerproduktion sind in Tabelle 4-6 zusammengefasst.

Tabelle 4-6: Dimensionierungswerte der einzelnen Versorgungskonzepte im Anwendungsfall Zuckerfabrik

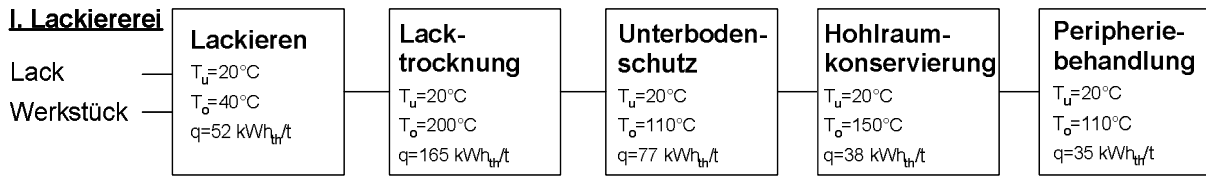
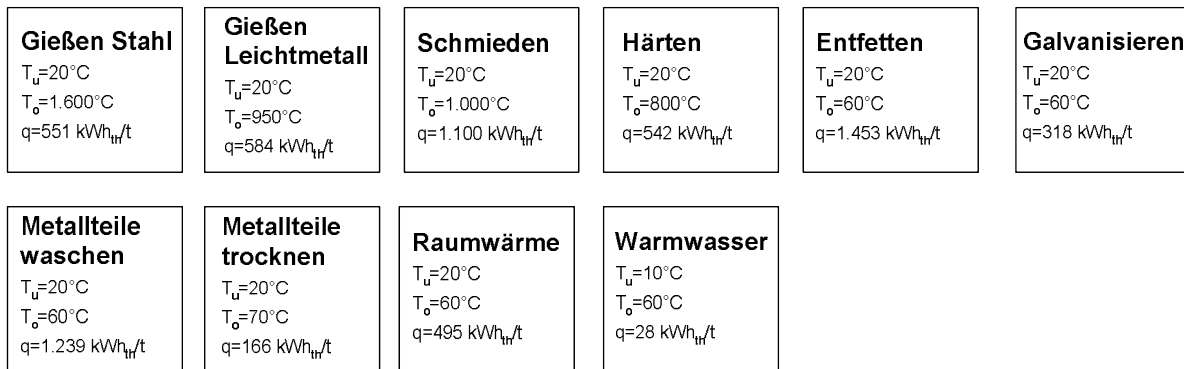
		P_{min}	P_{max}	Spitzenkessel	
				[MW _{th}]	
Zuckerfabrik	BHKW	[MW _e]	44,6	57,3	101,5
	MCFC	[MW _e]	78,6	101,0	101,5
	ORC-Anlage	[MW _e]	0,3	0,4	101,5
	Brennwertkessel	[MW _{th}]	129,9		
	Wärmepumpe	[MW _{th}]	1,5	1,9	101,5

Dabei ergeben sich nennenswerte Leistungsgrößen neben dem Brennwertkessel v. a. für das BHKW und die MCFC, für deren möglichen Einsatz die hohen Prozessdampfanteile am Wärmebedarf sprechen.

4.2.4 Automobilmontagewerke

Die Automobilindustrie betreibt in Deutschland etwa 60 Werke (ohne Zulieferer). Die Jahresproduktion betrug 2007 etwa 4,6 Millionen Einheiten in der Sparte PKW, 1,1 Millionen LKW und ca. 0,4 Millionen Busse /Kraftfahrtbundesamt 2008/.

Unter den Werken herrscht eine funktionelle Arbeitsteilung. So existieren Motorenwerke, Werke für Getriebe und Achsen sowie Karosserie- und Montagewerke. Unter dem Gesichtspunkt der KWK-Nutzung sind besonders die Karosserie- und Montagewerke interessant, weil diese einen hohen Wärmebedarf in demjenigen Temperaturbereich aufweisen, der mit KWK-Techniken abgedeckt werden kann. Dagegen stammt bei den sogenannten Komponentenwerken der Automobilindustrie für Motoren, Getriebe und Achsen der überwiegende Anteil des Prozesswärmebedarfs aus den Gießereiprozessen für Stahl- und Eisenwerkstoffe sowie Leichtmetalle. Dieser Wärmebedarf spielt sich nahezu vollständig im Hochtemperatursegment weit oberhalb von 500 °C ab und ist mit den in der Untersuchung behandelten Wärmeerzeugungssystemen nicht sinnvoll abdeckbar. Zudem weisen v. a. die Komponentenwerke einen hohen Anteil an Zulieferteilen auf, die im Rahmen des internationalen Komponentenaustauschs bereits als Fertigteile bzw. als Baugruppen angeliefert werden.

**II. Metallverarbeitung****Abbildung 4-9:** Wärmetechnisch relevante Verfahrensschritte der Automobilproduktion

Im Folgenden beschränkt sich die Untersuchung der Automobilbranche daher auf die Karosserie- und Montagewerke, von denen in Deutschland 29 im Jahr 2007 in Betrieb sind /eigene Recherche/. Für die Untersuchung werden Werke mit 50.000, 150.000 und 300.000 Einheiten betrachtet.

Die aus wärmetechnischer Sicht relevanten Prozesse des Montagewerks beziehen sich v. a. auf die Lackierstraßen und die Karosserienachbehandlung (vgl. Abbildung 4-9). Daneben besteht auch im Montagewerk ein Bedarf an Raumwärme und Warmwasser. Der maximale Temperaturbedarf liegt im Bereich von 200 °C und kann über ein entsprechendes Prozessdampfsystem abgedeckt werden. Für die Versorgungsvarianten Wärmepumpe und ORC-Anlage kann der Lackierprozess zudem mit Heißwasser betrieben werden. Für die Integration von MCFC, BHKW und Erdgasbrennwertkessel ist zudem der Einsatz von Wärmetauschern erforderlich, welche die Wärme aus dem Abgasstrom in das Prozessdampfsystem übertragen. Die zugrunde gelegten Rahmendaten der jeweiligen Prozesse sind in Tabelle 4-7 zusammengetragen, wobei die Werte für die jeweiligen Massenströme der einzelnen Prozesse gemäß /Stauber 2003/ definiert sind.

Tabelle 4-7: Wärmebedarfsdaten des Anwendungsfalls Automobilmontagewerk /BWPLUS 2008/

	Prozess	Temperatur		Automobilmontage- werk groß		Automobilmontage- werk mittel		Automobilmontage- werk klein	
		T _U	T _O	q _{Nutz}	Q _{Nutz}	q _{Nutz}	Q _{Nutz}	q _{Nutz}	Q _{Nutz}
		[°C]	[°C]	[kWh _{thNutz} /t]	[GWh _{thNutz} /a]	[kWh _{thNutz} /t]	[GWh _{thNutz} /a]	[kWh _{thNutz} /t]	[GWh _{thNutz} /a]
Pro- duk- tion	Lackrocknung	20	200	65,90	39,54	65,90	19,77	65,90	4,94
	Lackieren	20	90	20,72	12,43	20,72	6,22	20,72	1,55
	Unterbodenschutz	20	110	0,51	0,31	0,51	0,15	0,51	0,04
	Hohlraumkonservie- rung	20	150	0,25	0,15	0,25	0,08	0,25	0,02
	Peripheriebehand- lung	20	110	0,23	0,19	0,23	0,07	0,23	0,02
	Entfetten Metallteile	20	60	67,78	40,67	67,78	20,34	67,78	5,08
	Trocknen Metallteile	20	70	73,79	14,27	73,79	7,14	73,79	1,78
	Temperieren Galva- nikbäder	20	60	3,19	1,91	3,19	0,96	3,19	0,24
all- gemei- n	Raumwärme	40	60	173,21	103,92	173,21	51,96	173,21	12,99
	Warmwasser	10	60	9,88	5,92	9,88	2,96	9,88	0,74
	Summe Wärmebedarf	-	-	365,47	219,28	365,47	109,64	365,47	27,41

Die sich aus den aufgeführten Prozessen ergebenden Jahresdauerlinien sind in Abbildung 4-10 grafisch dargestellt.

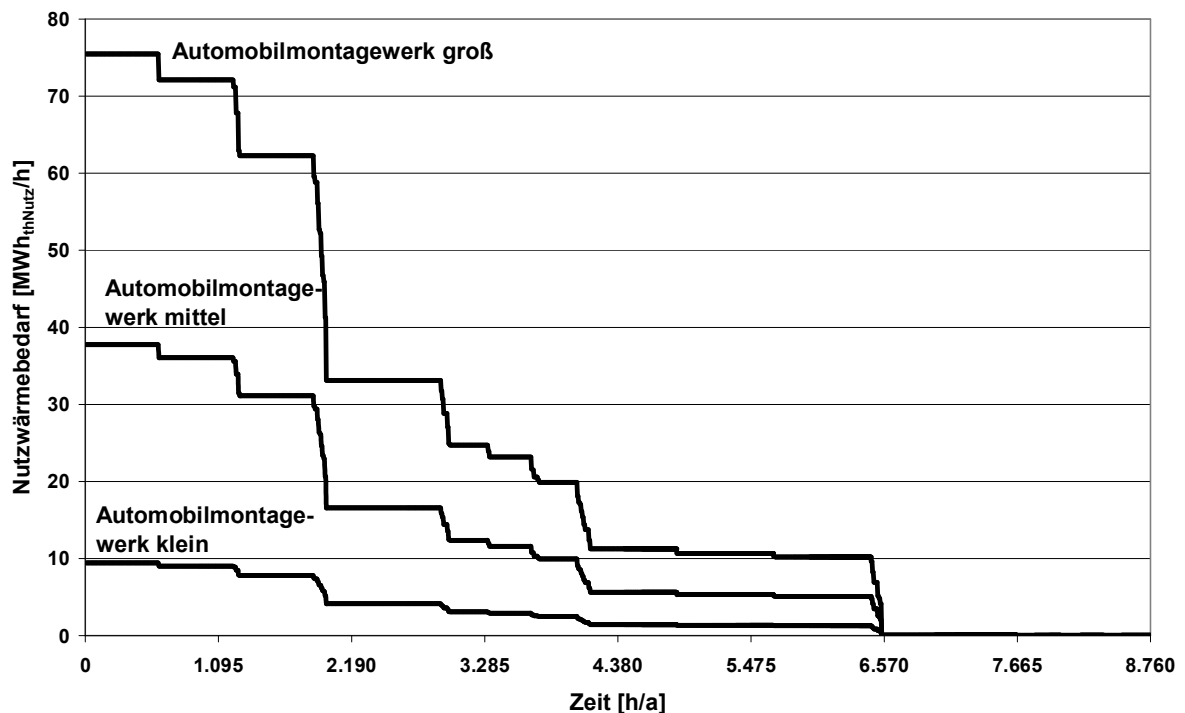


Abbildung 4-10: Jahresdauerlinien des Nutzwärmebedarfs der verschiedenen Typen von Automobilmontagewerken

Der Anteil der Niedertemperaturwärme beträgt jeweils etwa 69 % des gesamten Nutzwärmebedarfs eines Automobilmontagewerks. Somit ergeben sich auch für die Versorgungsvarian-

ten ORC-Anlage und Wärmepumpe im Vergleich zu den anderen untersuchten Einsatzgebieten geringe Wärmemengenanteile, die aus dem Spitzenkessel zugeliefert werden müssen.

Die Dampferzeugung mit Hilfe des BHKW ist mit energetischen Verlusten in Höhe von 29 % behaftet. Bei Einsatz der MCFC beträgt dieser Anteil 41 %, beim Brennwert- bzw. beim Spitzenkessel der Varianten ORC und Wärmepumpe 21 %.

Die sich aus diesen Werten ergebenden Anlagengrößen der einzelnen Versorgungsalternativen für die einzelnen Größenklassen der Automobilwerke sind in Tabelle 4-8 zusammengefasst.

Tabelle 4-8: Dimensionierungswerte der einzelnen Versorgungskonzepte im Anwendungsfall der Automobilwerke

			P_{\min}	P_{\max}	Spitzenkessel
					[MW _{th}]
Automobilwerk groß	BHKW	[MW _{el}]	41,5	53,3	94,4
	MCFC	[MW _{el}]	78,9	101,5	94,4
	ORC-Anlage	[MW _{el}]	6,7	8,7	94,4
	Brennwertkessel	[MW _{th}]	120,8		
	Wärmepumpe	[MW _{th}]	30,9	39,7	94,4
Automobilwerk mittel	BHKW	[MW _{el}]	20,8	26,7	47,2
	MCFC	[MW _{el}]	36,5	47,0	47,2
	ORC-Anlage	[MW _{el}]	3,1	4,0	47,2
	Brennwertkessel	[MW _{th}]	60,4		
	Wärmepumpe	[MW _{th}]	15,4	19,8	47,2
Automobilwerk klein	BHKW	[MW _{el}]	5,2	6,7	11,8
	MCFC	[MW _{el}]	9,1	11,7	11,8
	ORC-Anlage	[MW _{el}]	0,8	1,0	11,8
	Brennwertkessel	[MW _{th}]	15,1		
	Wärmepumpe	[MW _{th}]	3,9	5,0	11,8

Im Falle der Automobilwerke fallen bei der Betrachtung der Anlagendimensionen insbesondere die in allen Werksgrößen hohen Leistungswerte für die ORC-Anlagen und insbesondere die Wärmepumpen auf. Somit schlägt sich der in der Einzelprozessanalyse festgestellte hohe Verbrauchsanteil der Niedertemperaturwärme der gesamten Branche auch in den entsprechenden installierbaren Kapazitäten speziell dieser beiden Wärmeerzeugungstechniken nieder.

4.3 Ergebnisse der einzelprozessbasierten Bestimmung des industriellen Wärmebedarfs nach Branchen und Betrieben für Deutschland gesamt

Analog zu den vorangegangenen Anwendungsfällen können auch die Wärme nutzenden industriellen Prozesse in Deutschland gesamt betrachtet werden. Die Ergebnisse einer solchen Prozessanalyse sind nach Branchen und Temperaturbereich in Abbildung 4-11 beispielhaft für das Jahr 2005 dargestellt. Bei den gezeigten Werten handelt es sich um Durchschnittswerte.

te, die aus der Berücksichtigung von Unterschieden v. a. bei Alter und Größe der jeweiligen Produktionsanlagen resultieren /BWPLUS 2008/, /Tzscheutschler et al. 2007/.

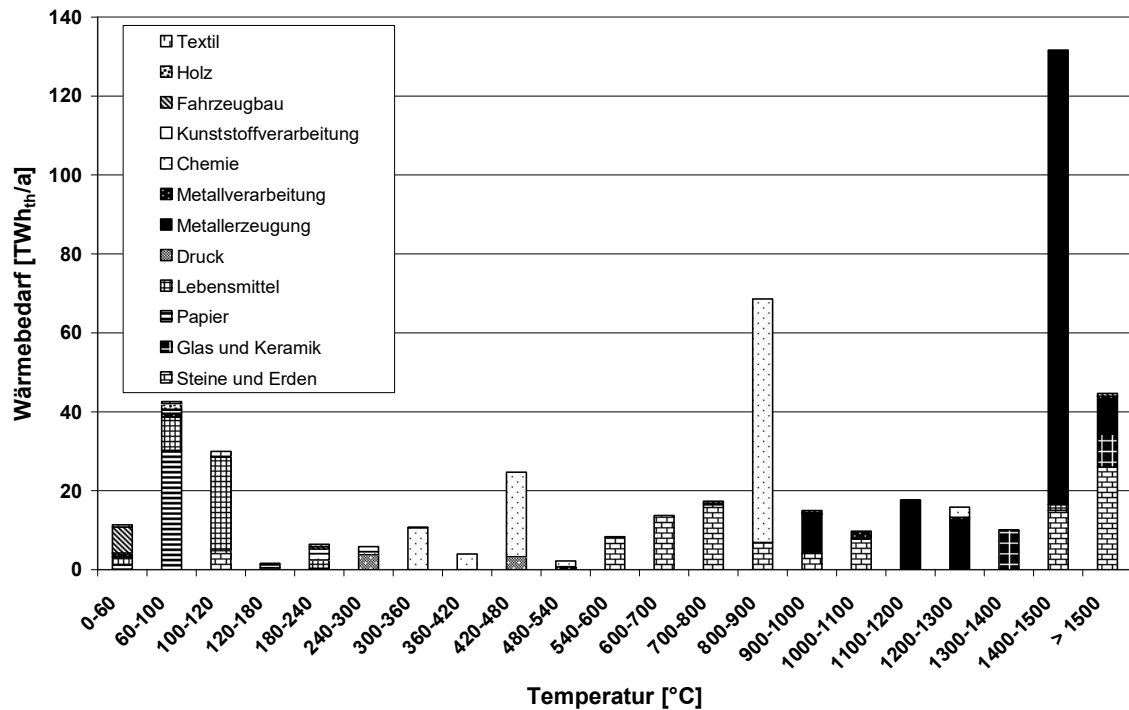


Abbildung 4-11: Wärmebedarfsstruktur der Industriebranchen in Deutschland 2005 in Abhängigkeit des Temperaturniveaus /BWPLUS 2008/

Der für 2005 ermittelte Gesamtwärmebedarf beträgt 494 TWh_{th}/a. Der Schwerpunkt des Prozesswärmebedarfs liegt im Bereich zwischen 800 und 1.500 °C, wo neben dem hohen Temperaturbedarf auch die hohen Produktionsmengen der in diesem Segment produzierten Massengüter (Stahl, Aluminium, Glas, etc.) zum hohen Wärmebedarf beitragen. Der Anteil des für die untersuchten Techniken relevanten Temperaturanteils unterhalb 300 °C beträgt mit 87 TWh_{th} etwa 18 % des identifizierten Gesamtwärmebedarfs. Hier sind vor allem die Branchen Lebensmittel, Papier und Fahrzeugbau relevant.

5 Detaillierte Technologiebewertung anhand exemplarischer Wärmeversorgungsaufgaben aus ausgewählten Branchen

Im folgenden Abschnitt werden die mit Hilfe der Technikuntersuchung (vgl. Kapitel 3) und der Wärmebedarfsanalyse (vgl. Kapitel 4) für ausgewählte Beispiele industrieller Anwendungen mit unterschiedlichen Betriebsgrößen gewonnenen Erkenntnisse miteinander verknüpft. Das Ziel der weiteren Untersuchung ist die wirtschaftliche und ökologische Bewertung der einzelnen Versorgungstechniken unter Berücksichtigung endogener und exogener Unsicherheiten für das Jahr 2030.

5.1 Grundlagen der Analyse

Die Verknüpfung der Daten aus den unterschiedlichen Quellen erfolgt im Rahmen einer Monte Carlo-Simulation (MCS), mit deren Hilfe bestehende Unsicherheiten auf Seiten der Wärmeerzeugungstechniken sowie der exogenen Einflussgrößen berücksichtigt werden können.

Als Zielgrößen werden für jeden Anwendungsfall und jede Technik die jeweiligen Wärmeerzeugungskosten und die direkten betrieblichen CO₂-Emissionen ermittelt. Neben den technik- und bedarfsseitigen Kennwerten sind hierzu auch Angaben zu exogenen Rahmendaten (z. B. Daten zu Zinssätzen, Primärenergie- oder CO₂-Zertifikatspreise) erforderlich, die aus Literaturquellen zugeführt werden. Im Ergebnis liefert die Monte Carlo-Simulation mögliche Wertebereiche sowie Verteilungsmuster von Eintrittswahrscheinlichkeiten konkreter Werte der Zielgrößen. Als Ergebniswert, der auch für die Platzierung in den Technikrankings bezüglich der Zielgrößen relevant ist, wird in den exemplarischen Anwendungen der jeweilige Medianwert genutzt.

Neben der Ermittlung der Zielwertebereiche und Eintrittswahrscheinlichkeiten ist die Bestimmung der anwendungs- und betriebsgrößenspezifischen Haupteinflussfaktoren auf die jeweiligen Zielgrößen ein weiteres Motiv für die Anwendung der Monte Carlo-Simulation. Die Identifikation der Haupteinflussfaktoren und die Bestimmung von deren Gewichtung erfolgt im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse (vgl. Kapitel 2.5).

Endogene Unsicherheiten, wie bspw. bei der Investitionskostenentwicklung oder bei Wirkungsgradsteigerungen, sind vom jeweiligen Anwendungsfall bzw. der eingesetzten Technik abhängig.

Die wirtschaftliche Betrachtung erfolgt durch die Ermittlung der spezifischen Wärmeerzeugungskosten, die auf Basis einer Vollkostenrechnung durchgeführt wird. Als Inputgrößen werden technikseitig die Investitionskosten und die jeweiligen Wirkungsgradkennwerte variiert. Neben den endogenen Parametern werden als exogene Größen der Primärenergiepreis, der Strompreis (Baseloadpreis), der Zinssatz und, für Anlagen mit entsprechend hoher Ge-

samtfeuerungsleistung, der CO₂-Zertifikatspreis variiert. Dabei wird als Untergrenze der Feuerungsleistung für die Beteiligung am Zertifikatehandel ein Gesamtwert von 20 MW betrachtet, die auch auf verschiedene Techniken (bspw. ORC-Anlage und Spitzenkessel) verteilt sein können. Die Berücksichtigung der Investitionskosten bei der Ermittlung der Wärmeerzeugungskosten erfolgt über eine Annuitätenberechnung. Die zugrunde gelegten Investitionskosten umfassen technik- und anwendungsfallübergreifend keine Ausgaben für Grundstücke und bauliche Maßnahmen.

Analog zur wirtschaftlichen Analyse wird auch die ökologische Untersuchung durchgeführt. Die ökologische Untersuchung zielt auf die Ermittlung der betrieblichen CO₂-Emissionen, welche für die erdgasbetriebenen Wärmeerzeugungstechniken aus den am Betriebsstandort anfallenden direkten Emissionen sowie den Emissionen der Strombereitstellung für den Wärmepumpenbetrieb bestehen. Die KWK-Techniken erhalten für die erzeugte Strommenge eine CO₂-Gutschrift, deren Höhe von der möglichen Entwicklung beim Strommix Deutschland abhängt. Der zugrunde gelegte Wertebereich für die CO₂-Emissionen des Strommix Deutschland im Jahr 2030 wird als exogene Einflussgröße ebenfalls aus der Literatur (/Blesl et al. 2011/) übernommen. Die bei der Ermittlung der CO₂-Emissionen bestehenden Unsicherheiten hängen somit neben der Entwicklung beim Strommix u. a. auch von den möglichen Verbesserungen der Wirkungsgrade des jeweiligen Anlagentyps ab.

Bei der ökologischen Analyse werden die neben der Ermittlung der betrieblichen CO₂-Emissionen ebenfalls die jeweiligen Haupteinflussfaktoren determiniert. Somit kann mit dem eingesetzten Instrumentarium auch die Identifikation von Ansatzpunkten zum Klimaschutz im industriellen Bereich erfolgen. Gleichzeitig lässt sich für die betrachteten Betriebe die Gesamthöhe des jeweiligen bundesweiten CO₂-Vermeidungspotenzials abschätzen.

Vorgehensweise

Bei den betrachteten Versorgungsaufgaben handelt es sich um Brauereien, eine Zuckerfabrik, Kfz-Montagewerke und Papierfabriken, deren Wärmebedarf für jeweils unterschiedliche Betriebsgrößen in Kapitel 4.2 bestimmt worden ist. Zu den Auswahlkriterien für die betrachteten Beispielbetriebe gehört u. a. der Einsatz über Jahrzehnte nahezu unveränderter Prozesse, bei denen bis zum Bezugsjahr 2030 keine bedeutenden Änderungen zu erwarten sind. Bei den analysierten Betrieben handelt es sich darüber hinaus um Wärmenutzer, deren Ansprüche an das Temperaturniveau von den betrachteten Wärmeerzeugungssystemen erfüllt werden kann, ggf. als Kombination mehrerer Techniken (z. B. Wärmepumpe und Brennwertkessel). Zudem sind in diesen Anwendungsbereichen in Deutschland bereits heute hohe KWK-Kapazitäten installiert.

Auf Basis der in Kapitel 4.2 erhaltenen Daten zum Wärmebedarf erfolgt die Dimensionierung der Wärmeerzeugungsanlagen auf Basis der auftretenden thermischen Maximallast. Die Wärmeerzeugungsanlage besteht aus einer Kombination der betrachteten Technik mit einem Kessel für Spitzen- und Ausfallzeiten. Als maximal verfügbare Modulgrößen können bei den

Strom erzeugenden Anlagen BHKW, MCFC und ORC-Anlage jeweils 10 MW_{el} sowie beim Brennwertkessel und der Wärmepumpe jeweils 10 MW_{th} installiert werden. Die der Wirtschaftlichkeitsrechnung jeweils zugrunde gelegten spezifischen Investitionskosten der einzelnen Techniken werden leistungsgrößenabhängig mit den in Kapitel 3 ermittelten Skalierungsdaten gebildet. Zur Übertragung der erzeugten Wärme auf das Dampfsystem werden jeweils entsprechende Wärmetauschersysteme zwischengeschaltet. Die Kosten für diese Systeme werden gemäß /IUTA 2006/ bilanziert. Weitere Komponenten zur Erzeugung und Verteilung von Wärme werden in der wirtschaftlichen und ökologischen Bilanzierung nicht berücksichtigt.

Mit diesen Inputdaten und den literaturseitig definierten Wertebereichen der beteiligten exogenen Einflussfaktoren wird dann im nächsten Schritt die Monte Carlo-Simulation durchgeführt, zunächst zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Erzeugungstechniken. Eine schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der Untersuchung konkreter Einsatzfälle einschließlich der Monte Carlo-Simulation ist in Abbildung 5-1 enthalten.

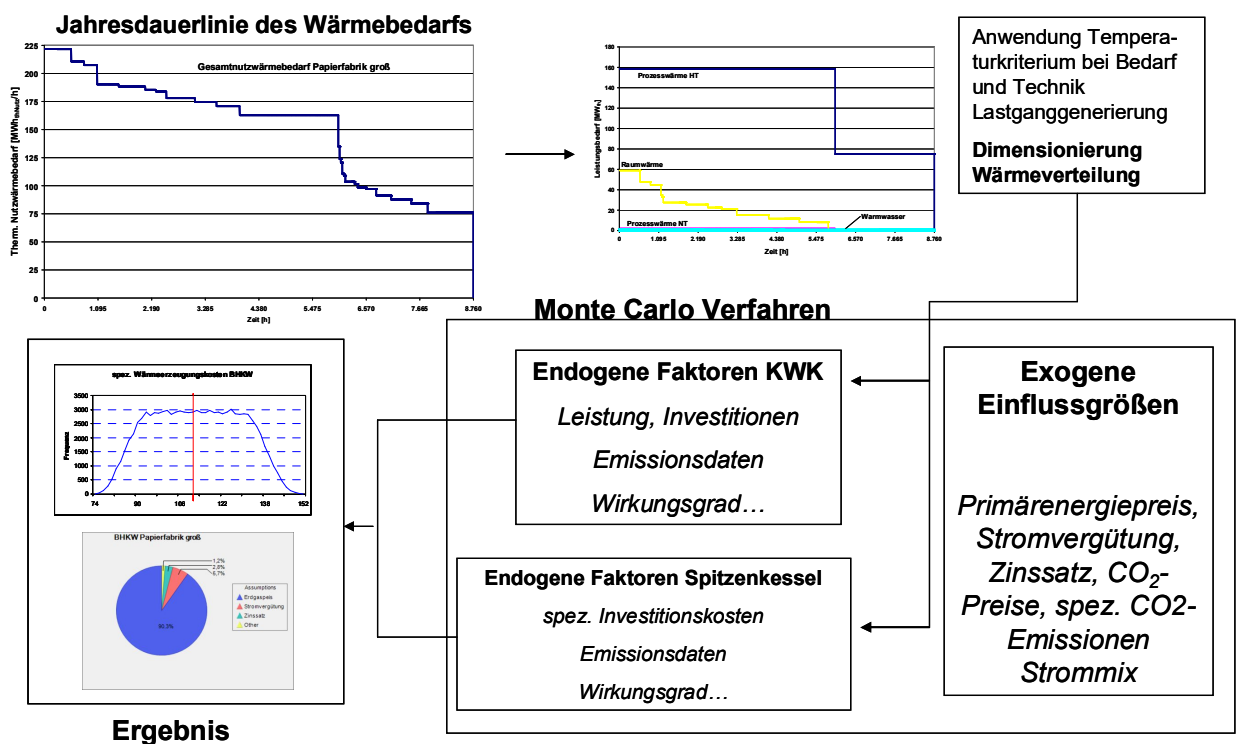


Abbildung 5-1: Prinzipielle Vorgehensweise der Monte Carlo-Simulation am Beispiel der Wärmeerzeugungskosten der großen Papierfabrik

Die ökologische Bewertung der einzelnen Versorgungsvarianten findet ebenfalls im Rahmen der Monte Carlo-Simulation statt und erfolgt durch die Ermittlung der jeweiligen betrieblichen spezifischen CO₂-Emissionen. Zusätzlich werden bei der ökologischen Analyse des Wärmepumpeneinsatz neben den CO₂-Emissionen aus der Erdgasnutzung des beigestellten Erdgaskessels die CO₂-Emissionen der Strombereitstellung gemäß Strommix Deutschland berücksichtigt, auf dessen Basis auch die Verrechnung der Stromgutschriften der KWK-

Systeme erfolgt. Vor- und nachgelagerte Emissionen aus dem Auf- bzw. Abbau der Anlagen sowie aus Maßnahmen zu deren Erhalt sind nicht berücksichtigt.

Da bei technischen Systemen auf Basis fossiler Energieträger bzw. von Strom die betrieblichen Emissionen in der Regel den Hauptanteil ausmachen, erlaubt diese Untersuchung eine relativ genaue Abschätzung der jeweiligen CO₂-bezogenen Umweltwirkungen der einzelnen Techniken.

5.2 Monte Carlo-Simulation

Die für die Monte Carlo-Simulation zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit benötigten Rahmendaten werden nach exogenen und endogenen Quellen getrennt eingeführt. Während die exogenen Wertebereiche für alle Anwendungen gelten, sind bei den endogenen Größen anwendungsabhängige Einflüsse zu berücksichtigen.

Exogene Kennwerte der Monte Carlo-Simulation nach Abnehmerkategorien

Es werden exogene Rahmendaten analysiert, die aus /Borggrefe, Lochner 2009/ entnommen sind. Darin werden Festlegungen für mögliche Wertebereiche des Erdgaspreises, des CO₂-Zertifikatspreises und der Strompreise in 2030 getroffen. Zudem werden Angaben zu den möglichen CO₂-Emissionswerten für den deutschen Strommix im Jahr 2030 aus /Blesl et al. 2011/ für die ökologische Betrachtung der Versorgungsaufgaben herangezogen.

Da in den Datenquellen keine entsprechenden Präferenzen enthalten sind, wird für die jeweiligen Wertebereiche der Inputparameter von einer Gleichverteilung der Eintrittswahrscheinlichkeiten ausgegangen.

Da im Rahmen der Untersuchung auch kleinere Abnehmerkategorien betrachtet werden, werden die Preise für Erdgas und Strom anhand von Durchschnittswerten verschiedener Abnehmergrößenkategorien gemäß /EUROSTAT 2010/ entsprechend angepasst.

Der vorgegebene Strompreis dient sowohl zur Ermittlung der Versorgungskosten für die Technikalternative Wärmepumpe als auch als Grundlage der Stromgutschrift für die KWK-Techniken. Für die Strompreise werden in der Literaturquelle die entsprechenden Großhandelspreise zugrunde gelegt.

Zusätzlich werden für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung der Anwendungsfälle die Biomassekosten sowie die Zinsentwicklung auf Basis eigener Berechnungen und Annahmen in die Modellierung integriert, wobei von einer Gleichverteilung des Zinssatzes zwischen 5 und 12 % ausgegangen wird. Die CO₂-Emissionen des deutschen Strommixes werden in den Wertebereich von 180 bis 350 kg CO₂/MWh_{el} /Blesl et al. 2011/ gelegt.

Die jeweiligen Wertebereiche der unsicherheitsbehafteten exogenen Basisdaten für die im Rahmen der Monte Carlo-Simulation durchgeführten Wirtschaftlichkeitsanalyse und der Ermittlung der CO₂-Emissionen des Anlagenbetriebs der einzelnen Versorgungsaufgaben sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Wertebereiche der exogenen wirtschaftlichen und ökologischen Rahmendaten für unterschiedliche Verbrauchsgrößenklassen für das Jahr 2030 /Borggrefe, Lochner 2009/, /EWI 2008/, /eigene Berechnungen/, /Blesl et al. 2011/

Größe	Einheit	Großverbraucher		Mittelgroße Verbraucher		Kleine Verbraucher	
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Erdgaspreis	[€/MWh]	16	34	21,6	45,9	26,8	56,9
Strompreis	[€/MWh _e]	61,1	65,2	99,6	106,3	143,4	153,1
Biomassepreis	[€/MWh]	18,4	39,1	24,8	52,8	30,8	65,4
CO ₂ -Zertifikatspreis	[€/t CO ₂]	42	47	42	47	42	47
Zinssatz	[%]	5	12	5	12	5	12
CO ₂ -Emissionen Strommix Deutschland	[kg CO ₂ /MWh _e]	180	350	180	350	180	350

Endogene Parameter der Monte Carlo-Simulation

Die endogenen Einflussgrößen sind ausschließlich von den technik- und anwendungsseitigen Gegebenheiten abhängig. Bei den variierten endogenen Parametern handelt es sich neben den spezifischen Investitionskosten um den jeweiligen Wirkungsgrad bzw., im Fall der Wärmepumpe, die Jahresarbeitszahl (JAZ). Zusätzlich wird für die einzelnen Wärmeerzeugungstechniken noch ein variabler Dimensionierungsfaktor eingeführt, der das Verhältnis zwischen installierter und tatsächlich benötigter maximaler thermischer Leistung angibt. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass in der Praxis, insbesondere bei KWK-Techniken und v. a. aus wirtschaftlichen Gründen, die Auslegung nicht auf den maximal möglichen Lastzustand erfolgt.

Die endogenen Wertebereiche der einzelnen Versorgungssysteme (Effizienz, Investitionskosten) liegen zwischen dem heutigen Stand (entsprechend dem ungünstigsten Fall, dass keines der ermittelten technischen und wirtschaftlichen Verbesserungspotenziale bis 2030 realisiert werden kann) und dem jeweiligen, für 2030 bestimmten, Potenzialwert. Für diese Parameter wird über den jeweils betrachteten Wertebereich von einer Gleichverteilung der Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen. Aus Plausibilitätsgründen (Verbleib am Markt bis 2030) werden, als einzige Ausnahme, für die MCFC die aus /Blesl et al. 2004/ von den Produzenten vorgegebenen Zielwerte als obere Grenze der Investitionskosten eingesetzt, wohingegen die untere Grenze ebenfalls von den in Kapitel 3 ermittelten Potenzialwerten gebildet wird. Die Gleichverteilung der Werteauswahl bleibt auch in diesem Fall erhalten.

Weitere Kostenpunkte, die jedoch nicht variiert werden, umfassen die Aufwendungen für Personal und Wartung, bei denen hier sowohl bezüglich des Technikvergleichs als auch im Rahmen der zeitlichen Entwicklung keine wesentlichen Einflüsse zu erwarten sind. Nicht in der Wirtschaftlichkeitsrechnung berücksichtigt werden die Kosten für Grundstücke und bauliche Maßnahmen.

Die endogenen Parameter jeder Betriebskategorie sind in den entsprechenden Abschnitten tabellarisch dargestellt, für die Papierfabriken bspw. in Tabelle 5-2.

5.3 Papierfabriken

Die Analyse des Anwendungsfalls Papierfabrik behandelt die bereits aus Kapitel 4.2.1 zur Festlegung der jeweils eingesetzten Prozesse, der Ermittlung des Wärmebedarfs, der Bestimmung des Verlustwärmeanteils bekannten Papierfabriken unterschiedlicher Größenkategorien sowie die mit Hilfe dieser Daten erfolgte Dimensionierung der einzelnen Anlagen. Die entsprechenden technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der einzelnen Betriebsgrößen und Wärmeerzeugungstechniken sind in Tabelle 5-2 zusammengestellt.

Tabelle 5-2: Technisch-wirtschaftliche Rahmendaten für die verschiedenen Größenklassen der betrachteten Papierfabriken

Größe	Einheit	Papierfabrik groß		Papierfabrik mittel		Papierfabrik klein		Verteilung
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	
Laufzeit	[a]	10	10	10	10	10	10	gleichförmig
Dimensionierung bzgl. Maximallast	[%]	70	90	70	90	70	90	gleichförmig
Spez. Investitionskosten BHKW	[€/kW _{el}]	177	232	177	232	177	232	gleichförmig
Spez. Investitionskosten Brennwertkessel	[€/kW _{th}]	45	48	45	48	45	48	gleichförmig
Spez. Investitionskosten MCFC	[€/kW _{el}]	473	941	473	941	473	941	gleichförmig
Spez. Investitionskosten ORC-Anlage	[€/kW _{el}]	613	940	613	940	930	1.506	gleichförmig
Spez. Investitionskosten Wärmepumpe	[€/kW _{th}]	35	40	35	40	36	44	gleichförmig
El. Wirkungsgrad BHKW	[%]	48,9	50,9	48,9	50,9	48,9	50,9	gleichförmig
El. Wirkungsgrad MCFC	[%]	47	51,5	47	51,5	47	51,5	gleichförmig
El. Wirkungsgrad ORC-Anlage	[%]	15	20,2	15	20,2	15	20,2	gleichförmig
Therm. Wirkungsgrad Brennwertkessel	[%]	109	110	109	110	109	110	gleichförmig
Jahresarbeitszahl Wärmepumpe	[-]	4,0	4,3	4,0	4,3	4,0	4,3	gleichförmig

5.3.1 Große Papierfabrik

Unter den heutigen Bedingungen weist das BHKW in der großen Papierfabrik die geringsten Wärmeerzeugungskosten mit 26 €/MWh_{thNutz} (vgl. Tabelle 5-3) auf. Es folgen die ORC-Anlage, der Brennwertkessel und die Wärmepumpe mit Werten zwischen 33 und 36 €/MWh_{thNutz}. Aufgrund der hohen spezifischen Investitionskosten treten für den Anwendungsfall die höchsten Wärmeerzeugungskosten aller betrachteten Techniken mit 168 €/MWh_{thNutz} bei der MCFC auf.

Die in der nachfolgenden Tabelle 5-3 angegebene Rangfolge ergibt sich aus den für das Bezugsjahr 2030 zu erwartenden mittleren Wärmeerzeugungskosten auf Basis der jeweiligen Medianwerte der Monte Carlo-Simulation. Zusätzlich sind neben dem heutigen Kostenniveau und den Medianwerten für 2030 auch die sich für 2030 ergebenden möglichen Minimal- und

Maximalwerte der einzelnen Systeme aufgeführt. Zusätzlich sind in der Tabelle die heutigen Kosten der Wärmeversorgung erfasst.

Für alle weiteren Anwendungsfälle wird analog zur Untersuchung der großen Papierfabrik verfahren.

Tabelle 5-3: Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten der großen Papierfabrik in €/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	BHKW	26	34	17-50
2	ORC-Anlage	33	44	32-56
3	Brennwertkessel	33	45	33-57
4	Wärmepumpe	36	49	36-61
5	MCFC	168	53	13-95

Für das Jahr 2030 erweist sich das BHKW für den Anwendungsfall der großen Papierfabrik weiterhin als das deutlich günstigste unter den betrachteten Wärmeversorgungssystemen. Mit erheblichem Abstand folgen, in einer engen Bandbreite, ORC-Anlage, Brennwertkessel und Wärmepumpe. Die MCFC weist trotz der implizierten hohen Umsetzungsgrade bei der Verbesserung der Investitionskosten die höchsten Versorgungskosten auf, wobei sich der Abstand zu den übrigen Versorgungsalternativen deutlich verringert.

Es zeigt sich, dass das heute bestehende Kostenranking auch in 2030 erhalten bleibt, wobei die absoluten Kostenwerte generell deutlich über dem heutigen Stand liegen. Hintergrund ist, dass in keinem Fall der zu erwartende, in Tabelle 5-1 erfasste Kostenanstieg bei Primärenergie und CO₂-Zertifikaten durch die identifizierten Verbesserungen bei der Effizienz und den Investitionskosten sowie den höheren Stromvergütungssätzen ausgeglichen werden kann.

Korrelationsanalyse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für die große Papierfabrik

Nachfolgend wird die Gewichtung der verschiedenen Einflussfaktoren (Korrelation) auf das Ergebnis der Monte Carlo-Simulation für die Zielgröße der spezifischen Wärmeerzeugungskosten betrachtet (vgl. Abbildung 5-2).

Es zeigt sich, dass für alle untersuchten Versorgungssysteme der Erdgaspreis die Einflussgröße mit der höchsten Gewichtung darstellt. Dies gilt auch für die Systeme ORC-Anlage (Biomassebetrieb) und Wärmepumpe (elektrischer Antrieb), da bei diesen aufgrund der hohen temperaturseitigen Anforderungen der Papierherstellung die Wärmebereitstellung überwiegend aus dem in die jeweiligen Versorgungssysteme integrierten Erdgaskessel erfolgt, der in beiden Fällen entsprechend hohe Volllaststundenzahlen erreicht.

Bei der MCFC ist zudem ein signifikanter Einfluss der Unsicherheit bei den Investitionskosten (5,5%) und in der weiteren Folge auch beim Zinssatz (1,6 %) zu erkennen. Gegenüber den anderen betrachteten Systemen weist die MCFC zudem einen erhöhten Einfluss der Anlagendimensionierung auf die Wärmeerzeugungskosten auf.

Die Einflussgrößen Zertifikatspreise, Wirkungsgrad bzw. Jahresarbeitszahl (JAZ) und Anlagendimensionierung spielen für alle betrachteten Systeme keine große Rolle. Selbiges gilt für die Höhe der Stromvergütung, die selbst bei der MCFC mit ihrer hohen Stromkennzahl nur einen Korrelationswert von weniger als 1 % erreicht.

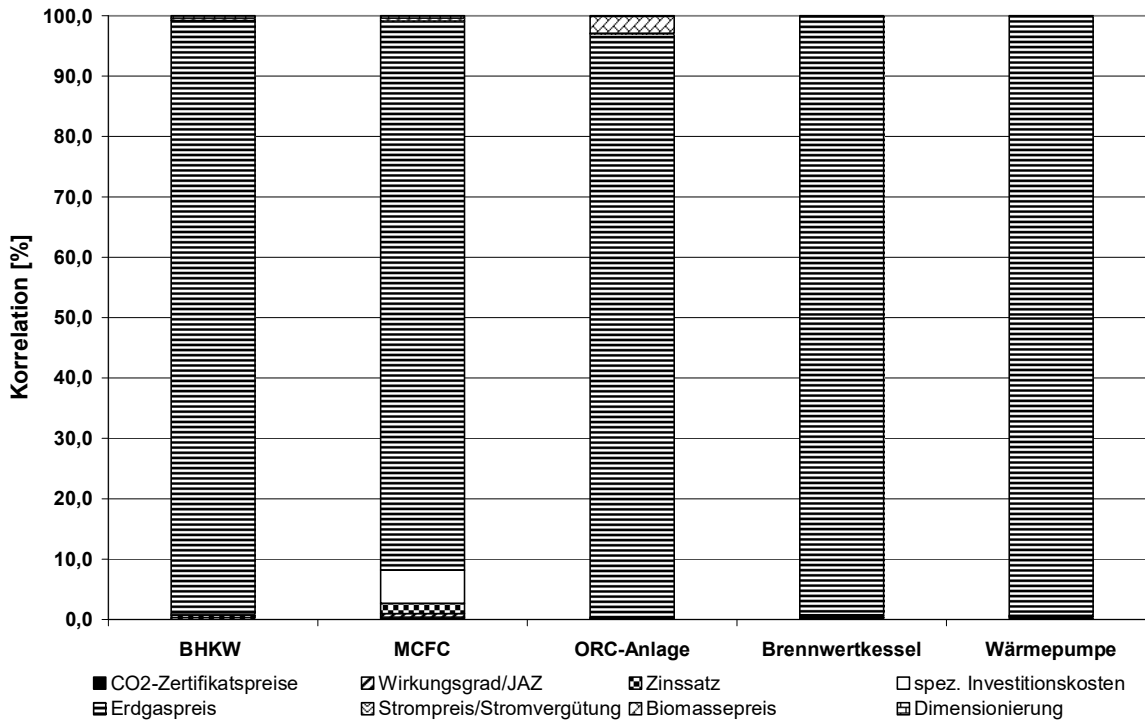


Abbildung 5-2: Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten der großen Papierfabrik

Die Ursache für die Beschränkung auf einen relevanten Einflussfaktor liegt in der gegenüber allen anderen untersuchten möglichen Einflussgrößen deutlich höheren möglichen Schwankungsbreite des Erdgaspreises. Dagegen sind bei diesen Techniken die möglichen Verbesserungen, bspw. in den technischen Wirkungsgraden oder den Investitionskosten, von nachgeordneter Bedeutung. Dieser Effekt wird bei ORC-Anlage und Wärmepumpe durch den infolge der Temperaturanforderungen geringen Anteil der mit diesen Techniken in der großen Papierfabrik erzeugbaren Wärme am Gesamtwärmebedarf weiter verstärkt.

Ökologische Analyse der großen Papierfabrik

Die Entwicklung der betrieblichen CO₂-Emissionen wird in Abhängigkeit von den möglichen Wirkungsgradsteigerungen der Wärmeerzeugungstechniken, der möglichen Entwicklung der CO₂-Emissionen im deutschen Strommix zur Bewertung der von den KWK-Techniken erzeugten bzw. der von der Wärmepumpe verbrauchten Strommengen sowie, analog zur ökonomischen Analyse, der Dimensionierung der jeweiligen Anlagenleistung bezüglich der höchsten auftretenden thermischen Last betrachtet.

Auf heutigem Stand weist demnach die MCFC mit $-77 \text{ kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{thNutz}}$ (vgl. Tabelle 5-4) die geringsten spezifischen Emissionswerte aller betrachteten Techniken für den untersuchten Anwendungsfall auf. Der Hauptgrund für den negativen CO_2 -Wert der MCFC liegt in ihrer bereits heute sehr hohen Stromkennzahl und den im Vergleich zu 2030 hohen Stromgutschriften. Es folgen mit dem BHKW ($75 \text{ kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{thNutz}}$) und der ORC-Anlage die weiteren Strom erzeugenden Techniken. Mit dem Brennwertkessel und der Wärmepumpe rangieren die beiden Versorgungsalternativen ohne Stromerzeugung am Ende der Tabelle.

Tabelle 5-4: Ergebnis der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO_2 -Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Papierfabrik groß“ in $\text{kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{thNutz}}$

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	MCFC	-77	138	-163-401
2	BHKW	75	196	151-235
3	ORC-Anlage	205	210	206-215
4	Brennwertkessel	241	241	241-241
5	Wärmepumpe	274	265	262-268

An den Untersuchungsergebnissen fällt zunächst auf, dass für die beiden KWK-Techniken BHKW und MCFC der Erwartungswert der Emissionen gegenüber dem heutigen Niveau deutlich höher liegt. Hintergrund sind die angestrebten Reduktionen der Treibhausgasemissionen im Bereich der allgemeinen Stromerzeugung, wie sie bspw. durch verstärkten Einsatz regenerativer Energiequellen erreicht werden können, und die sich über den deutschen Strommix in sinkenden Werten für die Stromgutschrift niederschlagen und entsprechend in den Rahmenannahmen der Monte Carlo-Simulation berücksichtigt sind (vgl. Tabelle 5-1). Aufgrund der gegenüber dem BHKW höheren Stromkennzahl macht sich dieser Effekt besonders bei der MCFC bemerkbar, die einen Großteil ihres Vorsprungs einbüßt, die Führungsrolle aber behält.

Sinkende Werte für die spezifische Stromgutschrift belasten auch die ORC-Anlage mit ihrer gegenüber BHKW und MCFC deutlich geringeren Stromkennzahl. Die ORC-Anlage kann jedoch die geringeren Gutschriften durch Steigerungen beim elektrischen Wirkungsgrad teilweise kompensieren, wodurch sich nur ein leicht höherer (+2 %) Emissionswert einstellt. Zudem besitzt die ORC-Anlage aufgrund ihres geringeren Abwärmepotenzials eine deutlich geringere elektrische Leistungsgröße, wodurch die absolute Höhe der Stromgutschrift gegenüber BHKW und MCFC ohnehin geringer ausfällt.

Beim Brennwertkessel bestehen aufgrund der geringen möglichen Wirkungsgradsteigerungen nur spezifische Vermeidungspotenziale im Nachkommabereich.

Die Wärmepumpe kann zwar mit sinkenden Emissionen infolge der Verbesserungen beim Strommix rechnen, die sich infolge des beschränkten abdeckbaren Temperaturspektrums bei der Papierherstellung allerdings nur unwesentlich (-3 %) auswirken.

Bei der Verteilung der möglichen spezifischen CO_2 -Emissionswerte ergeben sich für die Strom erzeugenden Techniken BHKW und Brennstoffzelle aufgrund der hohen Abhängigkeit

vom Strommix Deutschland entsprechend große Spielräume. Wegen der beschränkten Wirkungsgradentwicklung des Brennwertkessels und dem Nichtbestehen einer Stromgutschrift ergibt sich für diese Technik nur eine minimale Schwankungsbreite bei den CO₂-Emissionen. Generell ist zu beobachten, dass für Anlagen ohne oder mit geringer Stromerzeugung bzw. mit geringem Strombedarf (Wärmepumpe) die zukünftigen CO₂-Emissionen in Folge des sich ergebenden engen Wertebereichs auf einen relativ kleinen Unsicherheitsbereich beschränkt werden können. Dies ist eine Auswirkung der, auf die Anwendung bezogenen, geringen möglichen technischen Verbesserungen.

Korrelationsanalyse der ökologischen Untersuchung für die große Papierfabrik

Die Korrelationsanalyse der Werteverteilungen (vgl. Abbildung 5-3) ergibt für die Strom erzeugenden Techniken BHKW und MCFC die Stromgutschrift als entscheidenden Bestimmungsfaktor der Emissionsverteilungen. Neben der weiten Streuung der Werte für die Stromgutschrift ist hierfür v. a. die gegenüber der ORC-Anlage höhere Stromkennzahl beider Techniken verantwortlich.

Auch bei der Wärmepumpe und der ORC-Anlage dominiert dieser Einflussfaktor. Während beim Wärmepumpensystem der überwiegende Teil der Wärmeproduktion aus Temperaturgründen aus dem Erdgaskessel stammt, was sich in einer engen Bandbreite des CO₂-Spektrums ausdrückt (vgl. Tabelle 5-4), zeigen sich beim ORC-Anlagensystem mit seinem gegenüber der Wärmepumpe geringeren Wärmeanteil aus dem Erdgaskessel auch die Einflüsse der Dimensionierung und der Verbesserungen beim elektrischen Wirkungsgrad.

Dagegen dominieren beim völlig unabhängig vom Strommix und mit einer einheitlichen Leistungsgröße betriebenen Brennwertkessel die möglichen Verbesserungen beim Wirkungsgrad die Werteverteilung. Wegen der in der betrachteten Anwendung geringen nutzbaren Vorteile durch die möglichen Wirkungsgradsteigerungen ergibt sich für den Brennwertkessel ebenfalls ein enges Wertespektrum und ein Emissionsreduktionspotenzial von weniger als 1 kg CO₂/MWh_{thNutz} (vgl. Tabelle 5-4).

Generell zeigt sich für die Versorgungsaufgabe der großen Papierfabrik, dass die technische Weiterentwicklung insbesondere bei ORC-Anlage und Brennwertkessel zu emissionsseitigen Vorteilen führt. Das BHKW und die MCFC sind dagegen bezüglich der CO₂-Emissionen v. a. von der Entwicklung des deutschen Strommix abhängig, für den bis 2030 gegenüber den Wirkungsgradsteigerungen beider KWK-Techniken deutlich höhere Reduktionspotenziale zu erwarten sind. Somit ist für diese Systeme in der Summe mit höheren Emissionen zu rechnen.

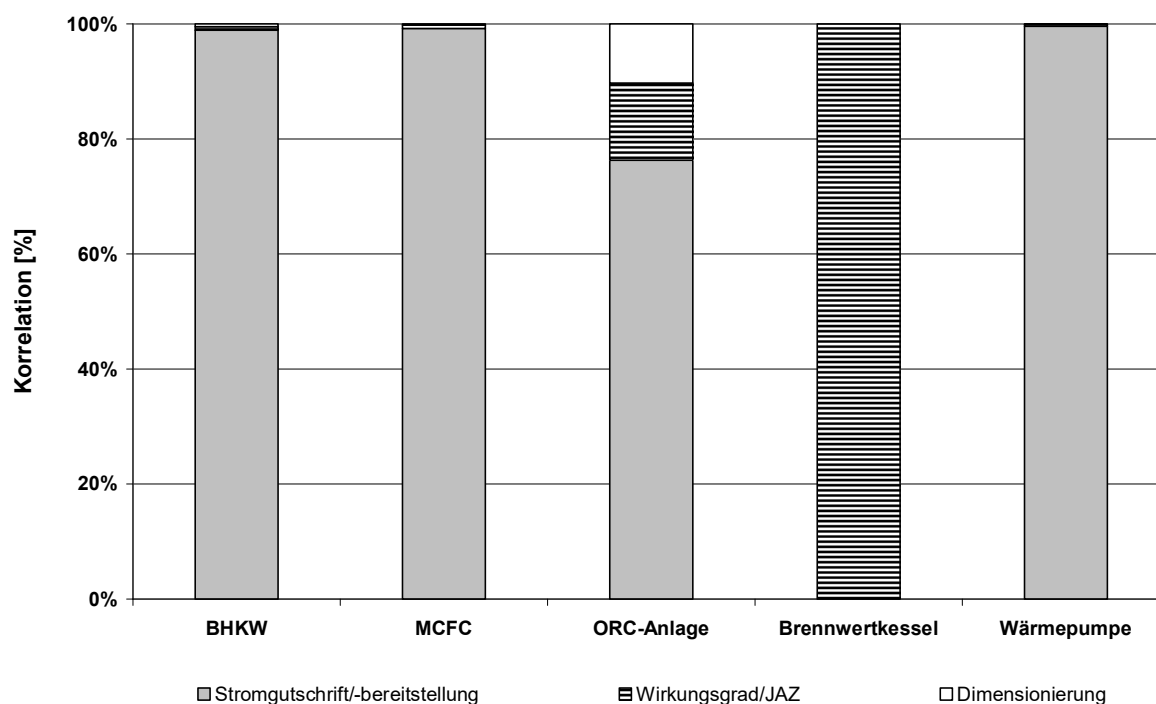


Abbildung 5-3: Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Papierfabrik groß“

5.3.2 Mittelgroße Papierfabrik

Auch die mittelgroße Papierfabrik zählt mit einem Nutzwärmebedarf von 445.500 MWh_{thNutz}/a zu den Wärmegroßverbrauchern. Dementsprechend können die jeweiligen Kostenwerte für Erdgas, Biomasse und Strom von der großen Papierfabrik übernommen werden.

Unter den heutigen Rahmenbedingungen stellt auch bei dieser Betriebsgröße das BHKW mit 25 €/MWh_{thNutz} die Technik mit den deutlich geringsten Wärmeerzeugungskosten dar. Aufgrund der gegenüber der großen Papierfabrik unterschiedlichen Prozessstruktur mit einem geringeren Prozessdampfbedarf fallen die Wärmeversorgungskosten für das BHKW trotz geringerer Volllaststundenzahl leicht niedriger aus. Dem BHKW folgen die Systeme von Brennwertkessel, ORC-Anlage und Wärmepumpe mit Werten zwischen 35 und 37 €/MWh_{thNutz}. Die, mit deutlichem Abstand zu den übrigen Varianten, höchsten Wärmeerzeugungskosten werden mit 192 €/MWh_{thNutz} für die MCFC ermittelt (vgl. Tabelle 5-5).

Das BHKW bleibt auch 2030 trotz steigender Wärmeerzeugungskosten die mit Abstand kostengünstigste Versorgungsalternative; die übrigen Systeme folgen in einem Abstand von über 40 %. Die MCFC bleibt trotz erheblicher Kostenverbesserungen (-70 %) Schlusslicht. Am heute bestehenden, engen Kostenabstand zwischen Brennwertkessel, ORC-Anlage und Wärmepumpe ändert sich wenig.

Tabelle 5-5: Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten der mittelgroßen Papierfabrik in €/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	BHKW	25	32	18-47
2	Brennwertkessel	35	46	34-58
3	ORC-Anlage	36	48	35-61
4	Wärmepumpe	37	50	38-61
5	MCFC	192	57	14-101

Korrelationsanalyse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für die mittelgroße Papierfabrik

Bei der Korrelationsanalyse ergibt sich für alle Versorgungsalternativen der Erdgaspreis als entscheidende Größe (vgl. Tabelle 5-4).

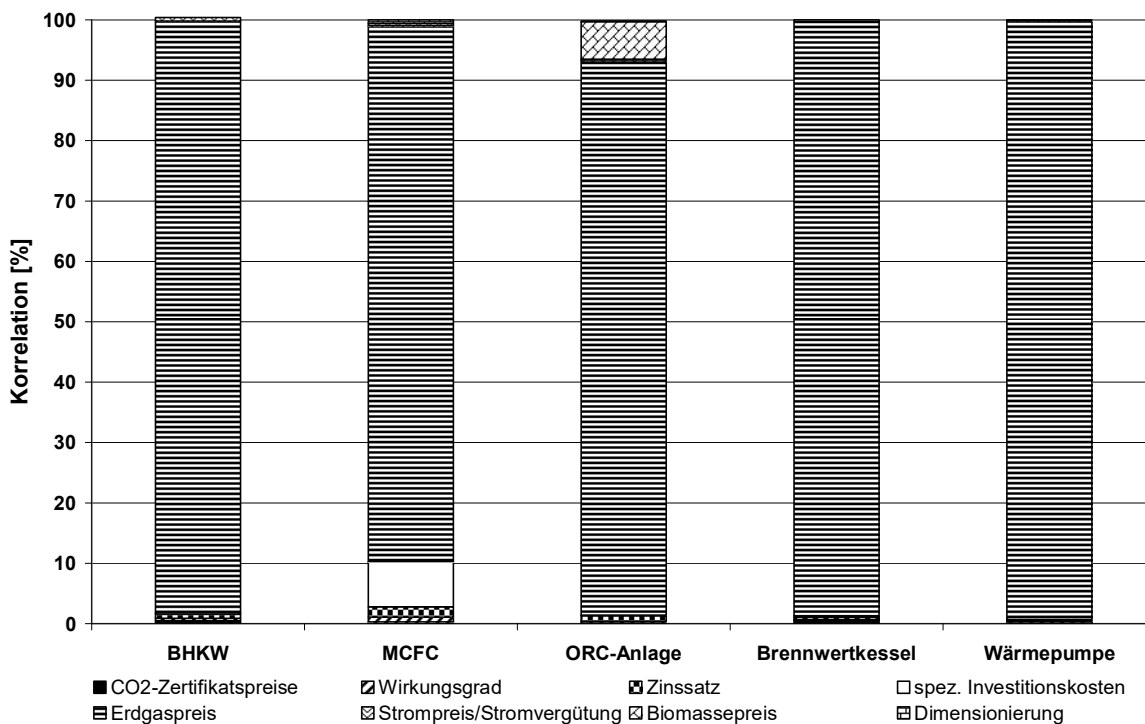


Abbildung 5-4: Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten der mittelgroßen Papierfabrik

Bei der MCFC spielen zusätzlich, trotz aller implizierter Verbesserungen, die Investitionskosten sowie in deren Folge auch der Zinssatz eine bedeutende Rolle.

Da die mittelgroße Papierfabrik gegenüber dem großen Werk einen höheren NT-Wärmebedarfsanteil aufweist, sinkt in diesem Fall für das System ORC-Anlage der Anteil der Wärme aus dem Erdgaskessel. In der Folge bekommt der Biomassepreis einen größeren Einfluss auf die Kostenstruktur, der entsprechende Wert für das Erdgas sinkt.

Bei den weiteren Einflussfaktoren, die in der Analyse berücksichtigt sind, wie bspw. die weitere Entwicklung der verschiedenen Wirkungsgradkennwerte, ist kein wesentlicher Einfluss

auf die Schwankungsbreite der Wärmeerzeugungskosten festzustellen. Daraus lässt sich schließen, dass die darstellbaren technischen Potenziale die möglichen Veränderungen im Energiepreisniveau sowie bei den Zertifikatspreisen nicht ausgleichen können.

Ökologische Analyse der mittelgroßen Papierfabrik

Aus heutiger Sicht erreichen MCFC und BHKW mit -86 bzw. 55 kg CO₂/MWh_{thNutz} bei der mittelgroßen Papierfabrik die geringsten spezifischen CO₂-Emissionswerte (vgl. Tabelle 5-6). Die übrigen Techniken liegen weit abgeschlagen zwischen 184 und 267 kg CO₂/MWh_{thNutz}. Durch den höheren Anteil der Niedertemperaturwärme verringert sich generell das Emissionsniveau leicht gegenüber der großen Papierfabrik.

Tabelle 5-6: Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Papierfabrik mittel“ in kg CO₂/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	BHKW	55	181	136-221
2	ORC-Anlage	184	193	186-200
3	Brennwertkessel	239	239	239-239
4	Wärmepumpe	267	253	248-259
5	MCFC	-86	256	87-400

Die Führung im Emissionsranking übernehmen 2030 das BHKW und die ORC-Anlage. Dabei muss auch in diesem Fall insbesondere das BHKW infolge der deutlich sinkenden Stromgutschrift mit steigenden Absolutwerten bei den CO₂-Emissionen rechnen. Die Emissionen von Brennwertkessel und Wärmepumpe verbleiben auf dem heutigen Niveau, wohingegen die MCFC mit hohen Verlusten bei den Stromgutschriften an das Ende der Tabelle zurückfällt.

Ähnlich der großen Papierfabrik ergeben sich für die Verteilung der möglichen spezifischen CO₂-Emissionswerte für die Strom erzeugenden Techniken BHKW und Brennstoffzelle wegen der hohen Abhängigkeit vom Strommix entsprechend große Schwankungsbreiten. Wegen der beschränkten nutzbaren Wirkungsgradentwicklung und dem Verzicht auf jegliche Stromgutschrift entsteht beim Brennwertkessel mit einem Spielraum im Nachkommabereich nur eine geringe Schwankungsbreite der CO₂-Emissionen.

Korrelationsanalyse der ökologischen Untersuchung der mittelgroßen Papierfabrik

Die Korrelationsanalyse (vgl. Abbildung 5-5) zeigt, dass für BHKW, MCFC, ORC-Anlage und Wärmepumpe die mögliche Entwicklung im deutschen Strommix bis 2030 der entscheidende Bestimmungsfaktor der jeweiligen Emissionsverteilungen darstellt.

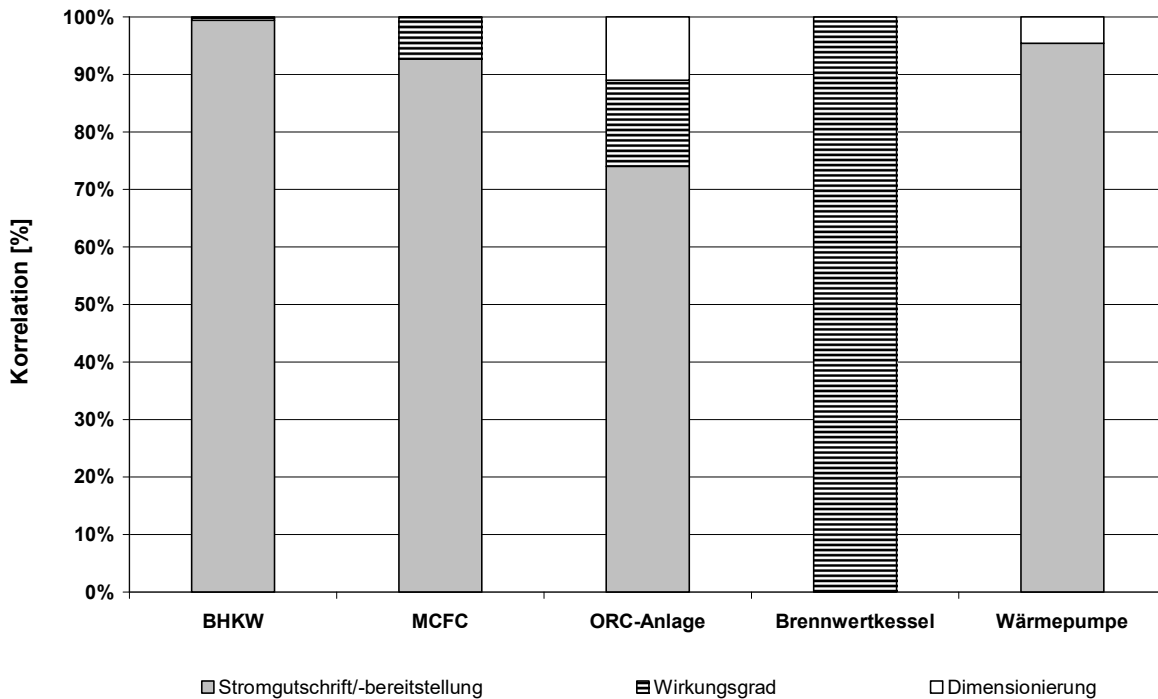


Abbildung 5-5: Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Papierfabrik mittel“

Bei der ORC-Anlage machen sich zudem die hohen möglichen Zuwächse beim elektrischen Wirkungsgrad bemerkbar, die - ebenso wie die Anlagendimensionierung - ihre Ursache im hohen NT-Wärmebedarfsanteil der mittelgroßen Papierfabrik haben. Bei deutlich geringeren Effizienzfortschritten ist letzterer Effekt in geringerem Umfang auch bei der Wärmepumpe zu beobachten. Beim BHKW machen sich mögliche Effizienzfortschritte dagegen kaum bemerkbar.

5.3.3 Kleine Papierfabrik

Auch die kleine Papierfabrik zählt mit einem Wärmebedarf von 146.257 MWh_{thNutz}/a zu den Energiegroßverbrauchern. Aus diesem Grund werden auch für die wirtschaftliche Analyse dieses Anwendungsfalls die entsprechenden Wertebereiche aus Tabelle 5-1 angewandt.

Die geringsten heutigen Wärmeerzeugungskosten erzielt mit 42 €/MWh_{thNutz} das BHKW (vgl. Tabelle 5-7). Der Brennwärerkessel, die ORC-Anlage und die Wärmepumpe folgen mit Werten zwischen 53 und 59 €/MWh_{thNutz}. Dagegen fällt die MCFC mit 295 €/MWh_{thNutz} auch bei dieser Betriebsgröße mit den mit deutlichem Abstand höchsten Wärmeerzeugungskosten aller betrachteten Systeme auf. Gegenüber den beiden anderen Werksgrößen von Papierfabriken liegt technikübergreifend das Kostenniveau der Wärmeerzeugung, v. a. aufgrund der deutlich geringeren Anlagenauslastung, deutlich höher.

Tabelle 5-7: Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten der kleinen Papierfabrik in €/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	BHKW	42	53	34-73
2	Brennwertkessel	53	70	53-88
3	ORC-Anlage	56	72	54-90
4	Wärmepumpe	59	78	59-97
5	MCFC	295	89	28-159

Für die kleine Papierfabrik bleibt auch im Jahr 2030 das heutige Kostenranking erhalten. Infolge steigender Primärenergiepreise steigt allerdings, mit Ausnahme der MCFC, das Kostenniveau der einzelnen Techniken um über 25 % an. Das BHKW bleibt somit unter den betrachteten Systemen die Technikalternative mit den geringsten Kosten der Wärmeerzeugung. Die MCFC kann zwar deutliche Reduktionen bei den Wärmeerzeugungskosten verbuchen, ist aber von der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit gegenüber allen übrigen Alternativen immer noch deutlich entfernt.

Korrelationsanalyse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für die kleine Papierfabrik

Bei der Gewichtung der verschiedenen Einflussfaktoren auf das Ergebnis der Monte Carlo-Simulation der Wirtschaftlichkeitsanalyse (vgl. Abbildung 5-6) ergibt sich auch für die kleine Papierfabrik das gewohnte Bild mit der für alle betrachteten Systeme geltenden Dominanz des Erdgaspreiseinflusses.

Die MCFC ist auch hier stärker als alle anderen betrachteten Technikalternativen von der Investitionskostenentwicklung sowie in dessen weiterer Folge auch von der Zinsentwicklung abhängig. Da die Wärmebedarfsstruktur der kleinen Papierfabrik für eine besonders kapitalintensive Technik wie die MCFC weniger Volllaststunden bietet als die beiden anderen betrachteten Werksgrößen, ist ein wirtschaftlicher Einsatz in dieser Größenklasse der Papierindustrie am wenigsten zu erwarten.

Da der kleinen Papierfabrik mit dem Verzicht auf eine eigene Altpapierrecyclingstufe eine große Menge des Wärmebedarfs im Niedertemperaturbereich fehlt, sinken gegenüber der mittleren Werksgröße die Einflüsse des Biomassekosten für die ORC-Anlage bzw. der Stromkosten bei der Wärmepumpe.

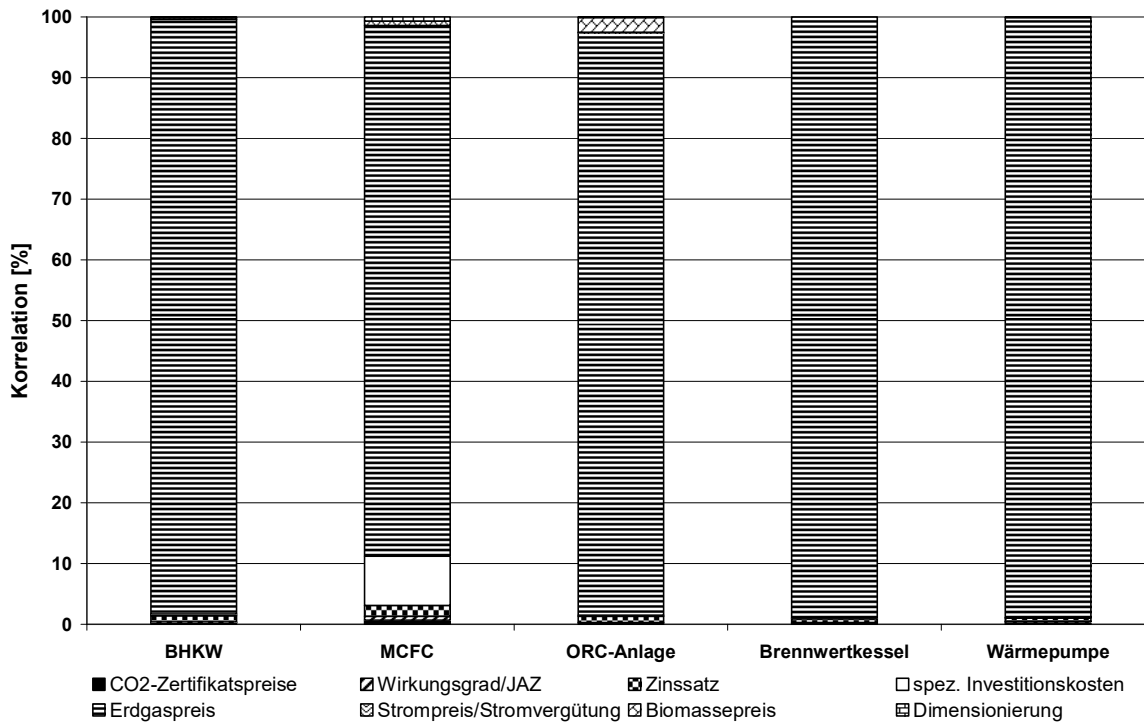


Abbildung 5-6: Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten der kleinen Papierfabrik

Ökologische Analyse der kleinen Papierfabrik

MCFC und BHKW stellen auch bei der kleinen Papierfabrik die Techniken mit den geringsten heutigen CO₂-Emissionswerten dar (vgl. Tabelle 5-8). Aufgrund der gegenüber der großen und mittelgroßen Papierfabrik geänderten Prozessstruktur (u. a. Verzicht auf eine Altpapierrecyclingstufe) liegen die Emissionswerte der kleinen Papierfabrik deutlich oberhalb der Werte der größeren Anlagen.

Tabelle 5-8: Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Papierfabrik klein“ in kg CO₂/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	BHKW	131	295	234-348
2	ORC-Anlage	305	310	297-320
3	Brennwertkessel	367	364	364-364
4	MCFC	-82	380	144-582
5	Wärmepumpe	410	395	390-400

Infolge sinkender Stromgutschriften ist insbesondere bei BHKW und MCFC mit deutlich steigenden Emissionswerten zu rechnen. Für die Werte von ORC-Anlage, Brennwertkessel und Wärmepumpe sind nur leichte Veränderungen zu erwarten, da die Belastungen bzw. Vorteile aus den Veränderungen beim Strommix infolge niedriger Stromkennzahl gering ausfallen.

Aus diesen Gründen fällt die bislang führende MCFC im Ranking auf den vierten Platz, das BHKW ist nun trotz deutlicher Steigerung des Absolutwertes die CO₂-emissionsärmste Al-

ternative. Aufgrund der ungünstigen anwendungsseitigen Temperaturanforderungen (Verzicht auf eigene Altpapierrecyclingstufe) verbleibt die Wärmepumpe die CO₂-emissionsseitig ungünstigste Variante.

Korrelationsanalyse der ökologischen Untersuchung der kleinen Papierfabrik

Für die KWK-Techniken BHKW, MCFC und ORC-Anlage ergibt sich die Stromgutschrift als bedeutendster Einflussfaktor (vgl. Abbildung 5-7). Insbesondere bei der ORC-Anlage spiegelt ein Korrelationswert von 7 % das hohe Optimierungspotenzial beim elektrischen Wirkungsgrad wider.

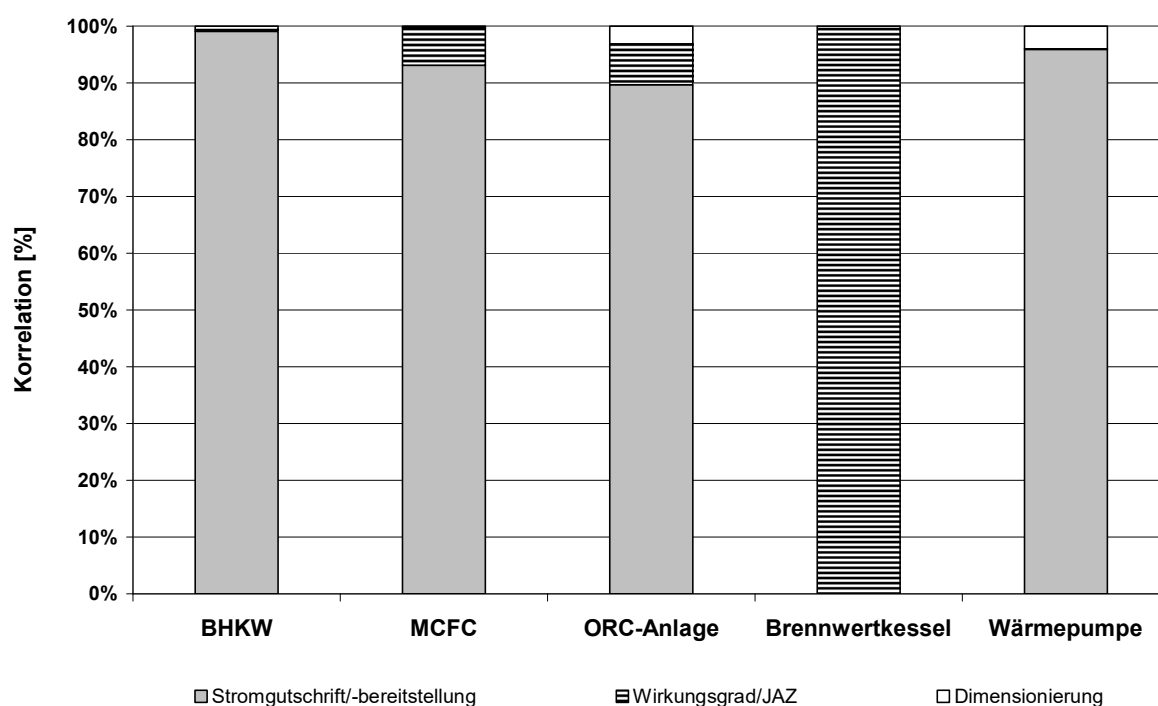


Abbildung 5-7: Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Papierfabrik klein“

Beim Brennwertkessel existiert mit der geringen möglichen Wirkungsgradsteigerung ohnehin nur eine einzige Einflussgröße mit Auswirkungen auf das Emissionsverhalten.

Die Wärmepumpe, die für 2030 in dieser Anwendung mit sinkenden CO₂-Emissionen rechnen kann, verdankt diesen Umstand überwiegend den Verbesserungen beim Strommix. Die möglichen technischen Verbesserungen haben dagegen bei dieser Technik keinen nennenswerten Einfluss auf das betriebliche Emissionsverhalten bezüglich CO₂.

5.4 Brauerei

Nachfolgend werden mit Hilfe der Monte Carlo-Simulation die Wärmeerzeugungskosten und betrieblichen CO₂-Emissionen im Jahr 2030 mit unterschiedlichen Erzeugungssystemen für die unterschiedlichen Größenklassen der Brauereien betrachtet. Bei den behandelten Werksgrößen handelt es sich um die bereits in Abschnitt 4.2.2 dargestellten Betriebe mit einem Jahresausstoß von 1.000.000 hl (große Brauerei), 300.000 hl (mittelgroße Brauerei) und 50.000 hl (kleine Brauerei).

Die der Wirtschaftlichkeitsrechnung zugrunde gelegten Wertebereiche der endogenen Einflussfaktoren für die verschiedenen Brauereigrößen sind in Tabelle 5-9 zusammengefasst.

Tabelle 5-9: Technisch-wirtschaftliche Rahmendaten des Anwendungsfalls Brauerei

Größe	Einheit	Brauerei groß		Brauerei mittel		Brauerei klein		Verteilung
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	
Laufzeit	[a]	10	10	10	10	10	10	gleichförmig
Dimensionierung bzgl. Maximallast	[%]	70	90	70	90	70	90	gleichförmig
Spez. Investitionskosten BHKW	[€/kW _{el}]	194	270	234	329	432	510	gleichförmig
Spez. Investitionskosten Brennwertkessel	[€/kW _{th}]	445	48	48	52	55	58	gleichförmig
Spez. Investitionskosten MCFC	[€/kW _{el}]	479	941	502	1.010	622	1.136	gleichförmig
Spez. Investitionskosten ORC-Anlage	[€/kW _{el}]	1.129	1.790	2.341	3.780	3.861	5.513	gleichförmig
Spez. Investitionskosten Wärmepumpe	[€/kW _{th}]	72	88	194	263	528	577	gleichförmig
El. Wirkungsgrad BHKW	[%]	46,2	49,3	43,2	46,4	37,4	40,0	gleichförmig
El. Wirkungsgrad MCFC	[%]	47	51,5	47	51,5	47	51,5	gleichförmig
El. Wirkungsgrad ORC-Anlage	[%]	15	20,2	15	20,2	15	20,2	gleichförmig
Therm. Wirkungsgrad Brennwertkessel	[%]	109	110	109	110	109	110	gleichförmig
Jahresarbeitszahl Wärmepumpe	[-]	4	4,3	4	4,3	4	4,3	gleichförmig

5.4.1 Große Brauerei

Für den Anwendungsfall der großen Brauerei stellt derzeit der Brennwertkessel (38 €/MWh_{thNutz}) die Techniken mit den günstigsten Wärmeerzeugungskosten dar (vgl. Tabelle 5-10). Damit unterscheidet sich die Brauerei von der aus den Papierfabriken bekannten Reihenfolge. Der Hintergrund ist unter den gegebenen Rahmenbedingungen neben dem höheren Gesamtwirkungsgrad des Brennwertkessels, insbesondere bezüglich der Dampferzeugung sowie im NT-Segment, v. a. in der Überschreitung der Kapazitätsgrenze für die Einbeziehung in den CO₂-Zertifikatehandel bei den Systemen BHKW und MCFC zu sehen.

In der betrieblichen Praxis wird, im Falle längerfristiger Unterschreitung der Produktionskapazität, bspw. durch sinkende Nachfrage, die nutzbare Feuerungsleistung durch amtlich zerti-

fizierte Versiegelungen reduziert und somit die Einbeziehung in den Zertifikatehandel vermieden.

Tabelle 5-10: Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten der großen Brauerei in €/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	Brennwertkessel	38	43	31-54
2	ORC-Anlage	44	49	36-62
3	BHKW	46	54	37-72
4	Wärmepumpe	52	59	45-73
5	MCFC	342	89	44-141

In der Betrachtung für das Jahr 2030 zeigt sich, dass der Brennwertkessel trotz um gegenüber den jetzigen Werten 13 % höherer Erzeugungskosten die kostengünstigste Technikalternative bleibt. Mit Ausnahme der MCFC weisen alle betrachteten Versorgungssysteme steigende Erzeugungskosten auf, was bedeutet, dass keine der Alternativen die steigenden Primärenergiepreise durch technischen Fortschritt vollständig ausgleichen kann. Auch bei der Reihenfolge des Kostenrankings ergeben sich gegenüber dem heutigen Stand keine Änderungen.

Bei der MCFC wiederholt sich der aus den Papierfabriken bekannte Effekt stark sinkender Wärmeerzeugungskosten: Die Kostensenkungen sind allerdings auch in der großen Brauerei für die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit nicht ausreichend.

Die ORC-Anlage weist zwar die höchsten Investitionskosten aller untersuchten Techniken auf, allerdings sind angesichts des hohen Prozessdampfbedarfs des Anwendungsfalls die sinnvoll realisierbaren Leistungsgrößen sehr gering, wodurch die absoluten Investitionskosten für die ORC-Anlage geringer ausfallen als bspw. bei der MCFC. Stattdessen wird bei der Systemvariante ORC-Anlage der überwiegende Anteil des Wärmebedarfs über den zugeschalteten Erdgaskessel abgedeckt.

Korrelationsanalyse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für die große Brauerei

Die erhaltenen Daten für die Korrelationsanalyse (vgl. Abbildung 5-8) zeigen auch im Fall der großen Brauerei für alle betrachteten Systeme einen dominanten Einfluss der Erdgaspreisentwicklung. Besonders ausgeprägt ist dieser bei den Systemen BHKW, Brennwertkessel, ORC und Wärmepumpe

Die MCFC bleibt auch in dieser Anwendung neben dem Erdgaspreis in erster Linie von der Investitionskostenentwicklung abhängig, außerdem gewinnen auch in diesem Fall das Zinsniveau und die auf die Maximallast bezogene Dimensionierung an Bedeutung.

Aufgrund des geringen Anteils der NT-Wärme am Gesamtbedarf sind bei der ORC-Anlage der Biomassepreis und die Stromvergütung von geringer Relevanz. Ähnlich verhält es sich bei der Wärmepumpe mit dem Strompreis.

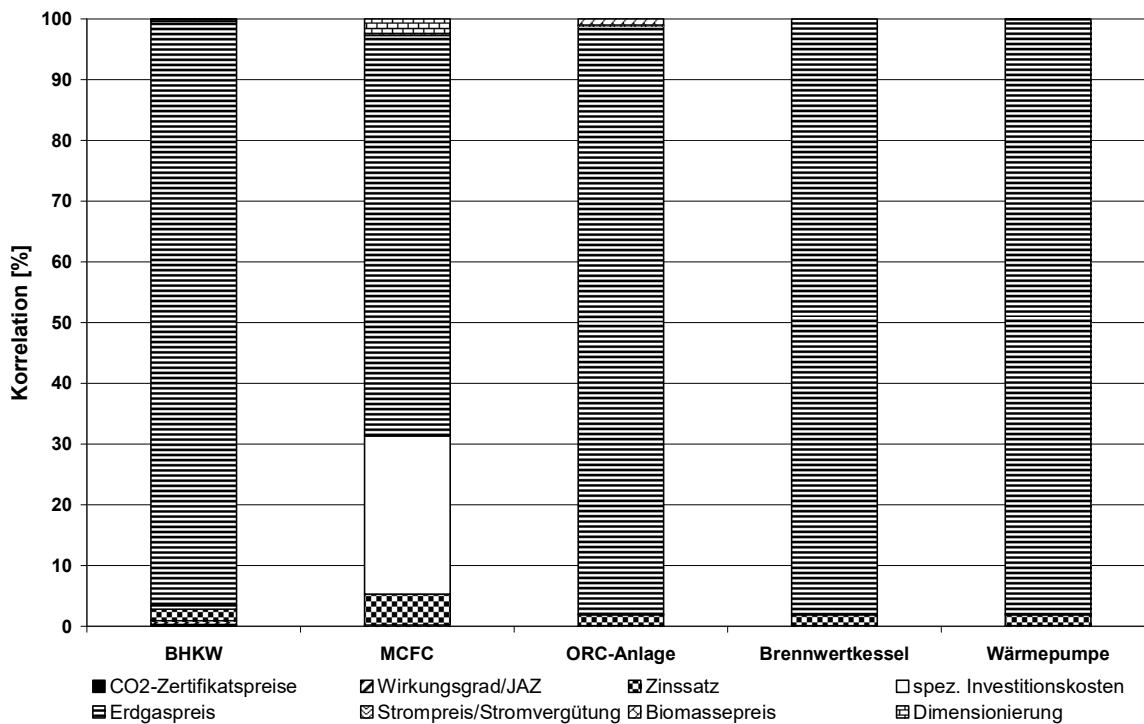


Abbildung 5-8: Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten der großen Brauerei

Ökologische Analyse der großen Brauerei

Aus heutiger Sicht stellt die MCFC (-9 kg CO₂/MWh_{thNutz}) die Technik mit den geringsten spezifischen CO₂-Emissionen dar (vgl. Tabelle 5-11). Bereits deutlich dahinter rangiert das BHKW mit einem Wert von 125 kg CO₂/MWh_{thNutz}, die übrigen Techniken ohne bzw. mit geringer Stromgutschrift folgen in weitem Abstand.

Ihren deutlichen Vorsprung kann die MCFC jedoch in der Zukunft nicht vollständig halten, sondern fällt sogar hinter das derzeitige Emissionsniveau des BHKW und auf den vierten Platz zurück. Das BHKW seinerseits muss, v. a. infolge reduzierter Stromgutschriften, ebenfalls Erhöhungen des Emissionsvolumens erwarten. Da diese aber stromkennzahlbedingt weniger stark ausfallen, als bei der MCFC, kann das BHKW im Jahr 2030 die Führung im Ranking übernehmen.

Tabelle 5-11: Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Brauerei groß“ in kg CO₂/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	BHKW	125	215	181-246
2	ORC-Anlage	224	228	225-231
3	Brennwertkessel	246	246	246-246
4	MCFC	-9	274	166-384
5	Wärmepumpe	284	278	276-280

Für die übrigen Techniken, bei denen alle deutlich geringere Strommengen in die Bilanz eingehen, ergeben sich bis 2030 CO₂-seitig keine bedeutenden Änderungen der Emissionshöhen.

Es fällt generell auf, dass sich in diesem Anwendungsfall die auf die Medianwerte bezogenen Emissionsniveaus der einzelnen Techniken in der Zukunft annähern, wobei der heutige Vorsprung von BHKW und MCFC deutlich schrumpft bzw. sogar aufgeholt wird.

Korrelationsanalyse der ökologischen Untersuchung der großen Brauerei

Die Korrelationsanalyse der Werteverteilungen (vgl. Abbildung 5-9) ergibt für die KWK-Techniken BHKW und MCFC (je 98 %) die Stromgutschrift als entscheidender Bestimmungsfaktor der Emissionsverteilungen. Ursache ist zum einen die weite Streuung der Werte für die Stromgutschrift und zum anderen die hohe Stromkennzahl beider Techniken.

Beim Brennwertkessel existiert auch in der Brauerei mit dem Wirkungsgrad nur ein einziger Ansatzpunkt für emissionsseitige Veränderungen.

Für die ORC-Anlage und die Wärmepumpe ergibt sich ein dominanter Einfluss der Emissionsentwicklung beim Strommix. Bei beiden Systemen ergeben sich in der CO₂-Betrachtung mit je 11 % hohe Einflusswerte für die Dimensionierung, die in der Kostenanalyse noch keine Rolle gespielt hatte. Daneben machen sich bei der ORC-Anlage mit einem Korrelationswert von 28 % trotz eines zu erwartenden geringeren Satzes für die Stromgutschrift die hohen möglichen Zuwächse beim elektrischen Wirkungsgrad bemerkbar.

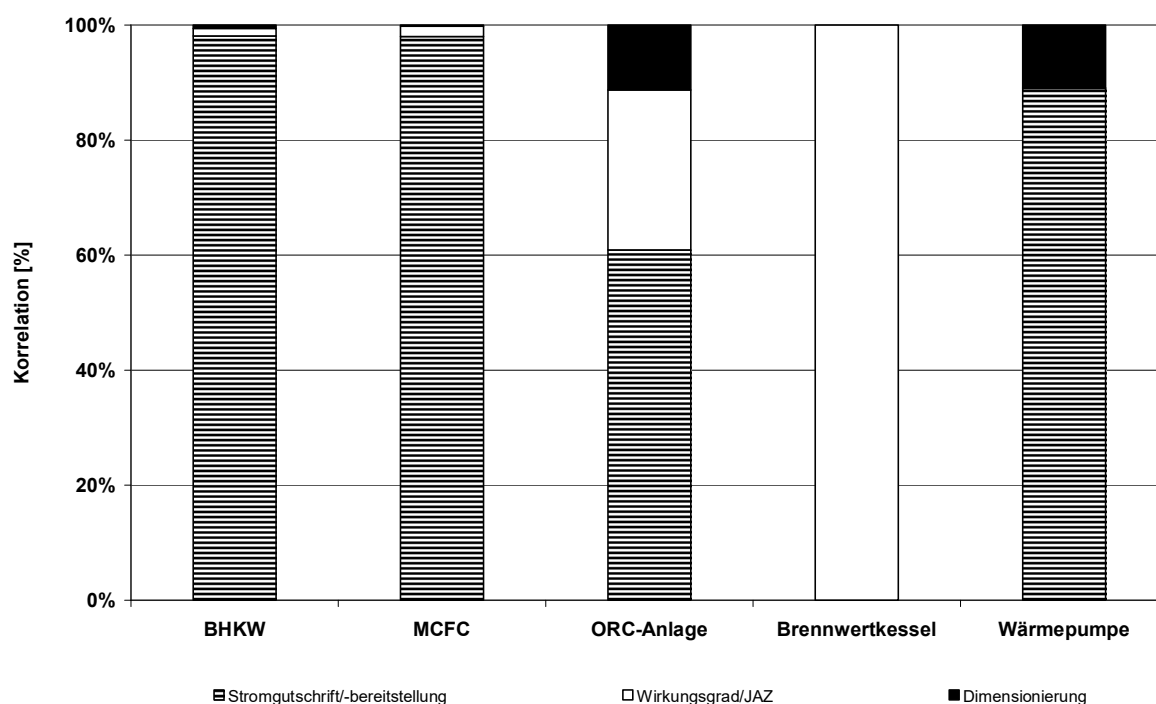


Abbildung 5-9: Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Brauerei groß“

5.4.2 Mittelgroße Brauerei

Mit einem Wärmebedarf von 8.600 MWh_{thNutz}/a zählt die mittelgroße Brauerei im Rahmen der Untersuchung zur Kategorie der mittelgroßen Energieverbraucher, so dass für die exogenen Kennzahlen die entsprechenden Wertebereiche aus Tabelle 5-1 genutzt werden. Zudem überschreitet die installierte Feuerungsleistung für keines der installierten Systeme den Grenzwert von 20 MW, ab dem die CO₂-Emissionen mit Zertifikaten belegt werden.

Mit diesen gegenüber der großen Brauerei geänderten Rahmendaten ergibt sich in der Wirtschaftlichkeitsanalyse derzeit für das BHKW ein kleiner Kostenvorsprung im Nachkommabereich vor dem Brennwertkessel (vgl. Tabelle 5-12). Mit ORC-Anlage und Wärmepumpe wird die benötigte Wärme bereits deutlich teurer produziert, die MCFC liegt preislich deutlich abgeschlagen am Ende der Tabelle.

Tabelle 5-12: Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten der mittelgroßen Brauerei in €/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	Brennwertkessel	69	65	54-76
2	BHKW	69	66	43-89
3	MCFC	424	82	24-152
4	ORC-Anlage	80	83	65-101
5	Wärmepumpe	84	88	69-107

Das heutige Kostenniveau liegt gegenüber der großen Brauerei bei allen fünf Wärmeerzeugungstechniken deutlich höher. Hintergrund sind neben den höheren Primärenergiepreisen auch die geringere Anlagenauslastung und die höheren spezifischen Investitionskosten infolge des geringeren Leistungsbedarfs (vgl. Kapitel 4.2.2).

Im Jahr 2030 übernimmt der Brennwertkessel die alleinige Führung im Kostenranking. Allerdings bleibt der Abstand zum BHKW sehr knapp. Es zeigt sich, dass die höhere zu erwartende Stromgutschrift trotz Verzichts auf die Einbeziehung in den Zertifikatehandel für das BHKW nicht ausreicht, um die steigenden Kosten für Primärenergie auszugleichen.

Für ORC-Anlage und Wärmepumpe ergeben sich geringe Kostenzuwächse, die beide Techniken an das Ende des Rankings rücken.

Die MCFC kann auch in dieser Anwendung deutliche Kostenreduktionen von über 80 % erreichen, die aber ebenfalls nicht genügen, um die führenden Technikalternativen in wirtschaftlicher Hinsicht ernsthaft zu gefährden.

Korrelationsanalyse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für die mittelgroße Brauerei

Die Relevanzanalyse der untersuchten Einflussfaktoren (vgl. Abbildung 5-10) zeigt für das BHKW die bereits aus der großen Brauerei bekannte Dominanz des Erdgaspreises mit einem Korrelationswert von 95 %. Alle anderen betrachteten Faktoren sind von entsprechend nachgeordneter Bedeutung, einschließlich der möglichen Wirkungsgradverbesserungen.

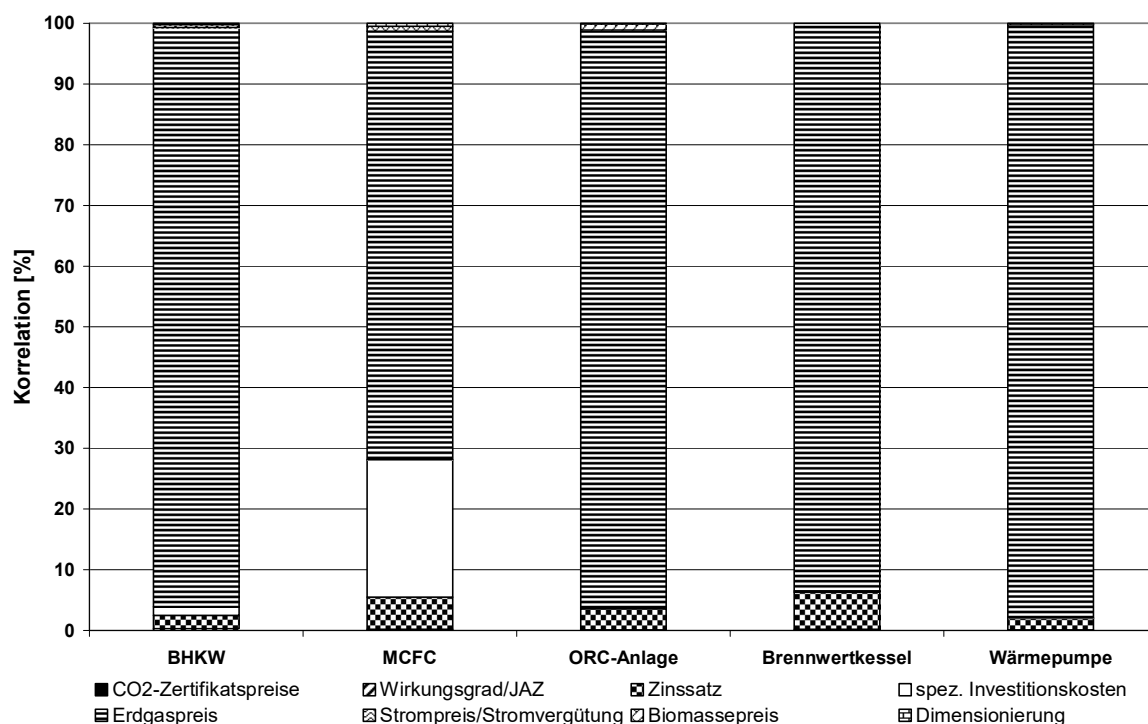


Abbildung 5-10: Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten der mittelgroßen Brauerei

Bei der MCFC bestimmen nahezu ausschließlich der Erdgaspreis (71 %), die Investitionskosten (23 %) und der Zinssatz die mögliche Kostenentwicklung (5 %).

Für die übrigen Techniken ORC-Anlage, Brennwertkessel und Wärmepumpe ergibt sich im Wesentlichen das bereits aus der großen Brauerei bekannte Bild. Allerdings steigt in Folge der geringeren Anlagenleistung und der niedrigeren Auslastung der Einfluss der Zinsentwicklung.

Ökologische Analyse der mittelgroßen Brauerei

Auch in der mittelgroßen Brauerei entfallen auf heutigem Stand die geringsten CO₂-Emissionen für den Einsatz der MCFC an, gefolgt von BHKW und ORC-Anlage (vgl. Tabelle 5-13).

Tabelle 5-13: Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Brauerei mittel“ in kg CO₂/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	BHKW	145	218	190-244
2	ORC-Anlage	226	230	226-233
3	Brennwertkessel	247	247	247-247
4	MCFC	-1	275	169-379
5	Wärmepumpe	285	280	278-282

Gegenüber der großen Brauerei ist generell ein leicht steigendes Emissionsniveau zu verzeichnen, lediglich beim BHKW schlägt sich die kleinere Modulgröße über den deutlich sinkenden elektrischen Wirkungsgrad und einer geringeren Menge an zu vergütendem Strom in einer deutlichen Zunahme der betrieblichen Emissionen nieder (vgl. hierzu auch Abbildung 3-3). Die übrigen Systeme weisen aus heutiger Sicht mit Werten zwischen 226 und 287 kg CO₂/MWh_{thNutz} deutlich höhere CO₂-Emissionen auf.

Während in der zukünftigen Betrachtung die CO₂-Emissionswerte von BHKW und MCFC in Abhängigkeit der Stromkennzahl steigen, ist bei ORC-Anlage, Brennwertkessel und Wärmepumpe von einer Stagnation auf dem heutigen hohen Niveau auszugehen.

Insgesamt rücken auch bei der mittelgroßen Brauerei die Werte der betrachteten Alternativen in ein deutlich engeres Spektrum zusammen, dass etwa zwischen 210 und 280 kg CO₂/MWh_{thNutz} verläuft.

Korrelationsanalyse der ökologischen Untersuchung der mittelgroßen Brauerei

Die Korrelationsanalyse der Werteverteilungen (vgl. Abbildung 5-11) zeigt das bereits aus den anderen Anwendungen von großer Brauerei und den Papierfabriken bekannte Bild: Für das BHKW (99 %) und die Brennstoffzelle (98 %) stellt auch in diesem Fall die Stromgutschrift den entscheidenden Bestimmungsfaktor der Emissionsverteilungen dar.

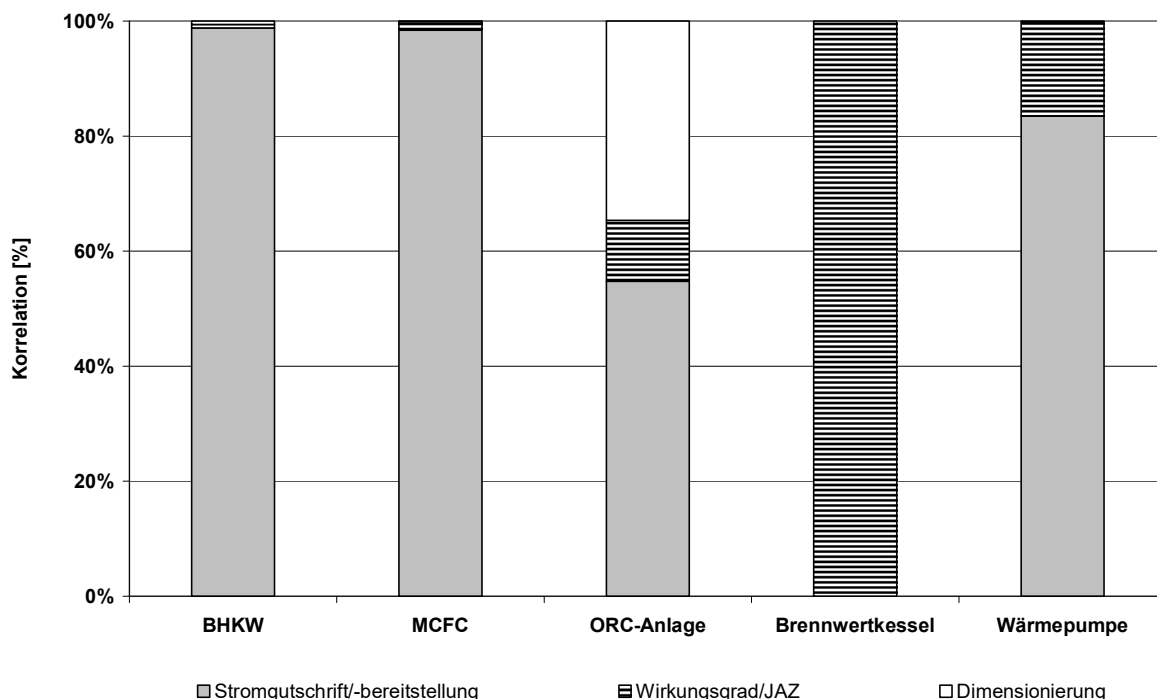


Abbildung 5-11: Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Brauerei mittel“

Beim System ORC-Anlage muss für die Prozessdampfversorgung ein hoher Wärmebedarfsanteil aus dem Spitzenkessel zugeliefert werden, so dass sich die Veränderungen bei der Stromvergütung auch hier deutlich weniger auswirken. Stattdessen gewinnen der hohe mögliche Wirkungsgradzuwachs und die Anlagendimensionierung an Bedeutung.

Für den Brennwertkessel bleibt als einzige Einflussgröße die technische Weiterentwicklung, die allerdings gering ausfällt und daher in wirtschaftlicher und CO₂-emissionsseitiger Hinsicht ohne große praktische Auswirkungen bleibt.

Bei der Wärmepumpe teilen sich die CO₂-bezogenen Verbesserungen in der Strombereitstellung und die identifizierten technischen Verbesserungen die Verantwortlichkeit für die – in absoluten Zahlen – äußerst gering ausfallenden Rückgänge der CO₂-Emissionen beim Einsatz in der mittelgroßen Brauerei.

5.4.3 Kleine Brauerei

Die kleine Brauerei mit einem Bedarf von 1,43 GWh_{thNutz}/a stellt den kleinsten Wärmeabnehmer aller untersuchter Industriebetriebe dar. Dementsprechend zählt der Betrieb aus energetischer Sicht zu den kleinen Verbrauchern mit dem jeweils höchsten Preisniveau für Erdgas, Biomasse und Strom (vgl. Tabelle 5-1). Aufgrund des geringen Leistungsbedarfs entfällt auch für diesen Betriebstyp die Einbeziehung in den Zertifikatehandel.

Als günstigste Wärmeerzeugungstechnik für diesen Anwendungsfall gilt nach heutigem Stand der Brennwertkessel mit spezifischen Kosten von 130 €/MWh_{thNutz} (vgl. Tabelle 5-14). Es folgen, mit sehr deutlichem Abstand, das BHKW und die ORC-Anlage, deren Einsatz aus wirtschaftlicher Sicht genau wie der von MCFC und Wärmepumpe für diesen Anwendungsfall nicht sinnvoll ist. Es zeigt sich, dass die Wärmeerzeugungskosten kleiner Brauereien mit geringen installierten Leistungen und wenigen Volllaststunden deutlich über denen großer und mittelgroßer Betriebe der Branche liegen.

Tabelle 5-14: Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten der kleinen Brauerei in €/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	Brennwertkessel	130	131	106-156
2	BHKW	203	196	168-225
3	MCFC	709	203	122-292
4	ORC-Anlage	213	213	189-236
5	Wärmepumpe	218	220	194-244

Es zeigt sich, dass der Brennwertkessel auch in Zukunft für die kleine Brauerei das mit deutlichem Abstand kostengünstigste Versorgungssystem darstellt. Alle übrigen Alternativen können in dem kleinen Leistungsbereich die heute vorhandenen Mehrkosten nicht nachhaltig abbauen.

Neben den höheren spezifischen Investitionskosten kleinerer Leistungsgrößen spielt hierbei auch die generell geringe Anzahl an erreichbaren Volllaststunden eine Rolle.

Korrelationsanalyse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für die kleine Brauerei

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Korrelationsermittlung (vgl. Abbildung 5-12) fällt auf den ersten Blick insbesondere der gegenüber den anderen Anwendungsfällen starke Einfluss des Zinssatzes auf, der sich bei allen Versorgungstechniken bemerkbar macht und Korrelationswerte zwischen 3 (Brennwertkessel) und 8 % (MCFC) erreicht. Die Ursachen liegen zum einen im Wegfall der CO₂-Zertifikatspreise als zusätzlichem Kostenfaktor sowie zum anderen in der äußerst geringen Anlagenauslastung und dem daraus resultierenden, im Vergleich zu anderen Anwendungen hohen Anteil der Kapitalkosten begründet.

Die stärkste Einflussgröße stellt auch in der kleinen Brauerei die Entwicklung beim Erdgaspreis dar, die Korrelationswerte zwischen 68 (MCFC) und 97 % (Brennwertkessel) erreicht. Bei der MCFC erreichen die Investitionskosten einen Wert von 22 %.

Alle übrigen Parameter sind bei allen Varianten von geringem Einfluss auf das Untersuchungsergebnis.

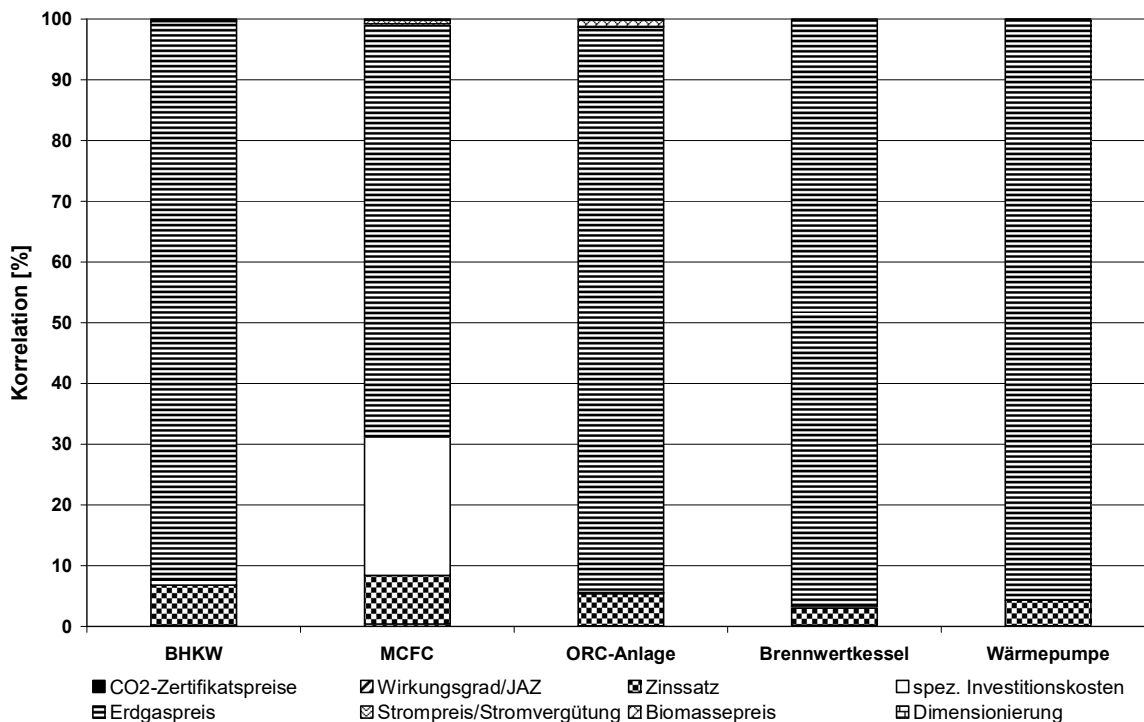


Abbildung 5-12: Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten der kleinen Brauerei

Ökologische Analyse der kleinen Brauerei

Zurzeit stellt die MCFC mit einem Wert von $-14 \text{ kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{thNutz}}$ (vgl. Tabelle 5-15) die Erzeugungstechnik mit den geringsten spezifischen Emissionswerten aller betrachteten Techniken dar. Es folgen mit einigem Abstand mit dem BHKW ($159 \text{ kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{thNutz}}$) und der

ORC-Anlage die beiden anderen KWK-Techniken. Der Brennwertkessel und die Wärmepumpe weisen spezifische Emissionen von 248 bzw. 286 kg CO₂/MWh_{thNutz} auf und bilden die Schlusslichter der Untersuchung.

In der Betrachtung für 2030 übernimmt das BHKW trotz deutlicher Steigerung beim Absolutwert die Führung, knapp vor der ORC-Anlage, deren Emissionshöhe nahezu unverändert bleibt.

Tabelle 5-15: Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Brauerei klein“ in kg CO₂/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	BHKW	159	219	196-239
2	ORC-Anlage	225	227	222-232
3	Brennwertkessel	248	247	247-248
4	MCFC	-14	278	167-388
5	Wärmepumpe	286	281	279-283

Auch bei der kleinen Brauerei ist zu beobachten, dass sich in Zukunft die wärmemengenspezifischen CO₂-Emissionswerte der verschiedenen Techniken tendenziell annähern.

Korrelationsanalyse der ökologischen Untersuchung der kleinen Brauerei

Die Korrelationsanalyse zeigt auch in dieser Anwendung (vgl. Abbildung 5-13) für das BHKW, die MCFC und die Wärmepumpe mit jeweils 98 % die Stromgutschrift als entscheidenden Bestimmungsfaktor der Emissionsverteilungen.

Mit einem Wert von 83 % erweist sich auch für das System ORC-Anlage die Stromgutschrift als entscheidender Bestimmungsfaktor der Emissionsverteilung. Hier kommen allerdings zusätzlich noch die Anlagendimensionierung (9 %) sowie die realisierbaren Wirkungsgradfortschritte (8 %) in nennenswertem Umfang ins Spiel.

Für den Brennwertkessel entfallen auch in dieser Anwendung alle möglichen Verbesserungen beim CO₂-Emissionsverhalten auf die Effizienzfortschritte aus der technischen Weiterentwicklung.

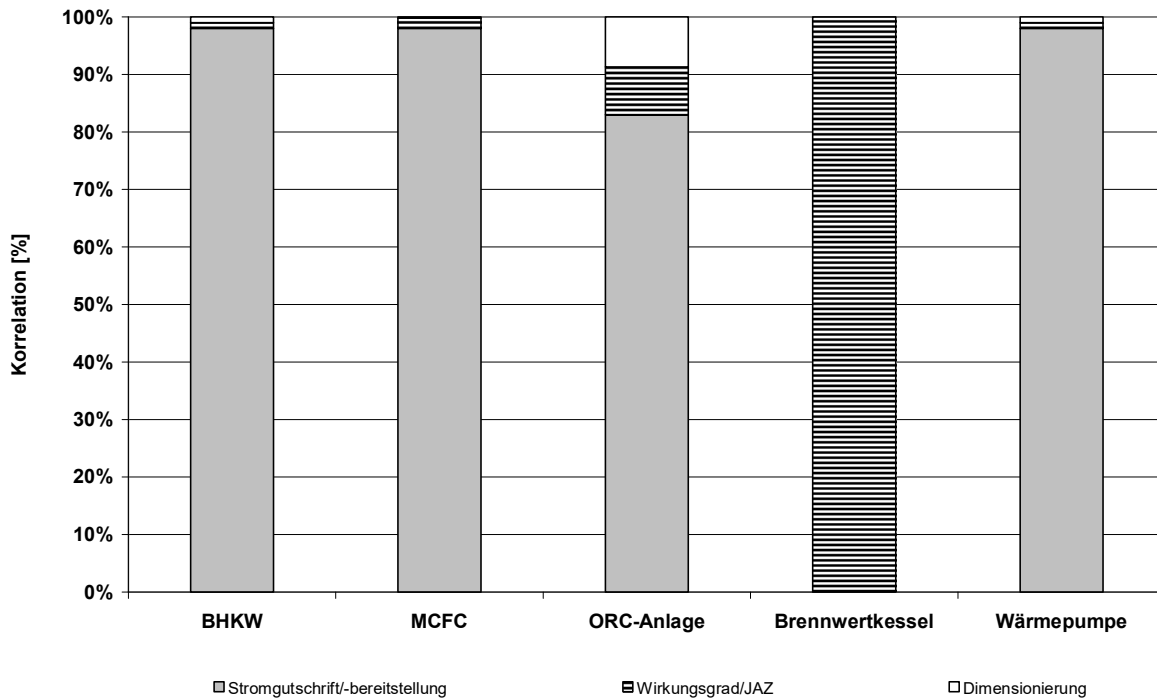


Abbildung 5-13: Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Brauerei klein“

5.5 Zuckerfabrik

Die Zuckerfabrik zählt mit einem Wärmebedarf von 260 GWh_{thNutz}/a zu den Großverbrauchern in der Nahrungsmittelbranche. In Deutschland werden aus wirtschaftlichen Gründen mittlerweile nur noch Anlagen der Kategorie „Großbetriebe“ zur Zuckerproduktion genutzt. Aus diesem Grund erstreckt sich die Analyse der Wärmeerzeugungskosten und der betrieblichen CO₂-Emissionen auf lediglich eine Größenklasse. Durch den kampagnenweisen Betrieb der Werke von Ende September bis Dezember ergeben sich für alle Wärmeerzeugungstechniken maximal mögliche Auslastungen von etwa 2.500 h/a.

Die exogenen Rahmendaten für die Großabnehmer von Energie werden der Tabelle 5-1 entnommen. Die Zuckerfabrik ist aufgrund ihrer hohen installierten Leistungen in den Emissionshandel einbezogen. Die weiteren zugrunde gelegten technischen und wirtschaftlichen Rahmendaten der Untersuchung des Anwendungsfalls Zuckerfabrik sind in Tabelle 5-16 zusammengefasst.

Tabelle 5-16: Technisch-wirtschaftliche Rahmendaten Zuckerfabrik „groß“ für 2030

Größe	Einheit	Zuckerfabrik groß		Verteilung
		Minimum	Maximum	
Laufzeit	[a]	10	10	-
Dimensionierung bzgl. Maximallast	[%]	70	90	gleichförmig
Spez. Investitionskosten BHKW	[€/kW _e]	177	232	gleichförmig
Spez. Investitionskosten MCFC	[€/kW _e]	473	941	gleichförmig
Spez. Investitionskosten ORC-Anlage	[€/kW _e]	930	1.480	gleichförmig
Spez. Investitionskosten Brennwertkessel	[€/kW _{th}]	45	48	gleichförmig
Spez. Investitionskosten Wärmepumpe	[€/kW _{th}]	57	70	gleichförmig
El. Wirkungsgrad BHKW	[%]	48,9	50,9	gleichförmig
El. Wirkungsgrad MCFC	[%]	47	51,5	gleichförmig
El. Wirkungsgrad ORC-Anlage	[%]	15	20,2	gleichförmig
Therm. Wirkungsgrad Brennwertkessel	[%]	109	110	gleichförmig
Jahresarbeitszahl Wärmepumpe	[-]	4,0	4,3	gleichförmig

Die geringsten Wärmeerzeugungskosten mit 39 €/MWh_{thNutz} ergeben sich auf dem heutigen Stand für das BHKW (vgl. Tabelle 5-17). Es folgen mit knappem Abstand die ORC-Anlage, der Brennwertkessel und die Wärmepumpe, die Werte zwischen 40 und 45 €/MWh_{thNutz} aufweisen. Auch in der Zuckerfabrik weist die MCFC mit 333 €/MWh_{thNutz} aus heutiger Sicht die mit weitem Abstand höchsten Wärmeerzeugungskosten auf.

Tabelle 5-17: Ergebnis der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten der Zuckerfabrik in €/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	BHKW	39	48	30-65
2	ORC-Anlage	40	52	40-64
3	Brennwertkessel	44	58	44-72
4	Wärmepumpe	45	59	45-73
5	MCFC	333	84	41-134

Die weitere Entwicklung sieht das BHKW weiterhin in der Rolle der Kostenführerschaft, auch an der bestehenden Reihenfolge der Techniken ergeben sich keine Änderungen. Gegenüber den heutigen Kosten ergibt sich für das BHKW, wie für alle übrigen Techniken, ein Anstieg von jeweils oberhalb 20 %. Die einzige Ausnahme bildet auch hier die MCFC, für die sich deutlichere Kostensenkungen um ca. 75 % ergeben, die sich jedoch im Ranking nicht niederschlagen.

Korrelationsanalyse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für die Zuckerfabrik

Die Korrelationsanalyse (vgl. Abbildung 5-14) zeigt für alle Technikvarianten den Erdgaspreis als Parameter mit dem stärksten Einfluss. Mit einem Korrelationswert von 25 % hat zudem die Investitionskostenentwicklung bei der MCFC noch eine hervorgehobene Bedeutung, die auch stärker ausfällt als in den meisten anderen betrachteten Anwendungsfällen. Der Hintergrund ist in der geringen Anzahl möglicher Volllaststunden zu sehen, der den Anteil

der Kapitalkosten an den Gesamtkosten stärkt. Bei den übrigen Versorgungsalternativen ist dieser Effekt, allerdings in weit geringerer Ausprägung, ebenfalls zu beobachten.

Die technische Weiterentwicklung der einzelnen Versorgungstechniken, die höhere Wirkungsgrade bewirken soll, spielt in allen Systemvarianten für die Zuckerfabrik keine nennenswerte Rolle. Dies gilt auch für die ORC-Anlage, die zwar bis 2030 mit besonders hohen Wirkungsgradzuwächsen rechnen kann. Aufgrund der temperaturseitigen Anforderungen der Zuckerfabrik kommen diese aber in dieser Versorgungsaufgabe nicht in besonders hohem Umfang zur Geltung.

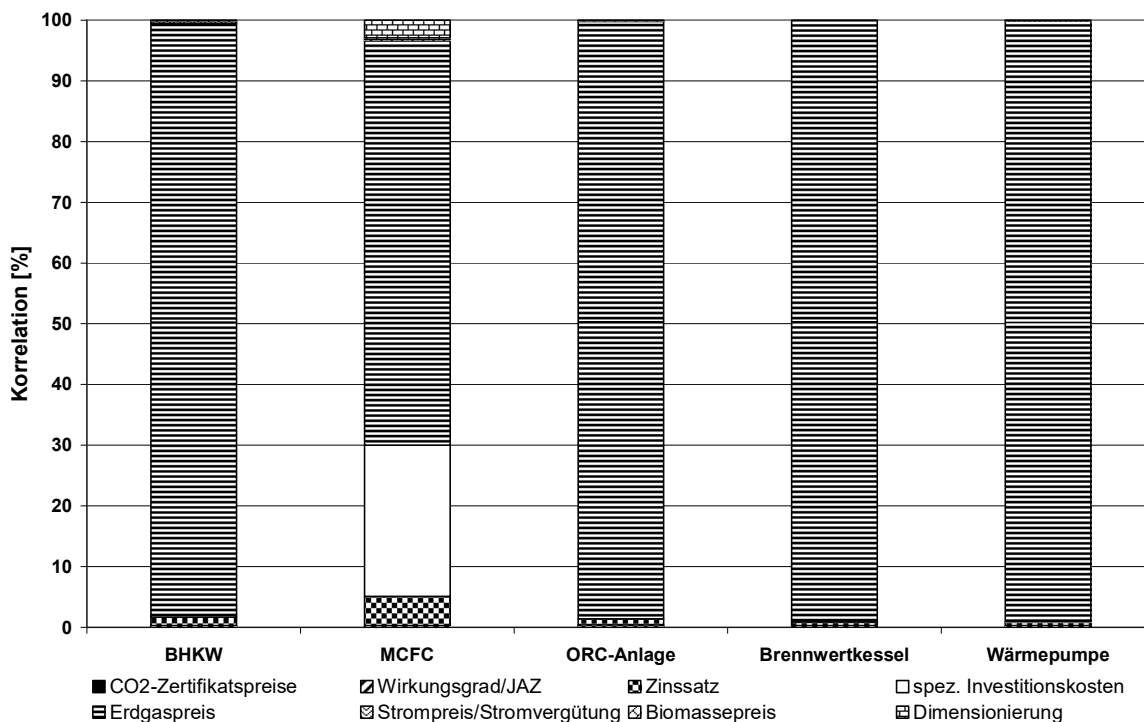


Abbildung 5-14: Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten der Zuckerfabrik

Ökologische Analyse der Zuckerfabrik

Die Technik mit den geringsten spezifischen CO₂-Emissionen in der Zuckerfabrik ist die MCFC, die zurzeit einen Wert von 10 kg CO₂/MWh_{thNutz} (vgl. Tabelle 5-18) erreicht. Es folgt mit dem BHKW (123 kg CO₂/MWh_{thNutz}) eine weitere KWK-Technik. Der Brennwärtekessel, die ORC-Anlage und die Wärmepumpe folgen mit deutlich höheren Werten auf den weiteren Plätzen.

Für die weitere Entwicklung zeigt sich, dass sich an der grundlegenden Reihenfolge der Techniken bezüglich ihres Mittelwertes des CO₂-Ausstoßes keine Veränderungen ergeben. Auch in diesem Fall kann der Wirkungsgradzuwachs bei BHKW und MCFC die Verluste bei der Stromgutschrift im Gegensatz zur ORC-Anlage nicht ausgleichen. Die Versorgungsalternative Wärmepumpe kann aufgrund ihres temperaturbedingt hohen Anteils von Wärme, die

aus dem Spitzenkessel zugeführt werden muss, von den Emissionsreduktionen im Strommix Deutschland nur in geringem Umfang profitieren.

Tabelle 5-18: Ergebnis der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Zuckerfabrik“ in kg CO₂/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	MCFC	10	155	-132-375
2	BHKW	123	224	187-257
3	ORC-Anlage	240	242	240-242
4	Brennwertkessel	247	247	247-247
5	Wärmepumpe	289	287	286-288

Wie bereits in den Anlagen der Wärmeversorgung von Papierfabriken und Brauereibetrieben zu beobachten, wird sich auch in der Zuckerfabrik das Spektrum der betrieblichen CO₂-Emissionswerte für die betrachteten Systeme in Folge der starken Zuwächse bei den KWK-Techniken bei gleichzeitiger Stagnation bei Wärmepumpe und Brennwertkessel deutlich verengen.

Korrelationsanalyse der ökologischen Untersuchung der Zuckerfabrik

Auch für die Zuckerproduktion (vgl. Abbildung 5-15) gilt für die beiden KWK-Techniken BHKW und MCFC die Stromgutschrift als entscheidender Bestimmungsfaktor der Emissionsverteilungen. Beim Brennwertkessel besteht mit der Wirkungsgradentwicklung nur eine einzige im Rahmen der Monte Carlo-Simulation variierte Einflussgröße.

Für die beiden Versorgungsalternativen ORC-Anlage und Wärmepumpe ergeben sich jeweils hohe Korrelationswerte für die Dimensionierung bezüglich der Maximallast. Dieser Effekt erklärt sich aus den temperaturbedingt geringen möglichen Leistungsgrößen beider Techniken und dem extrem engen möglichen Emissionsbereich.

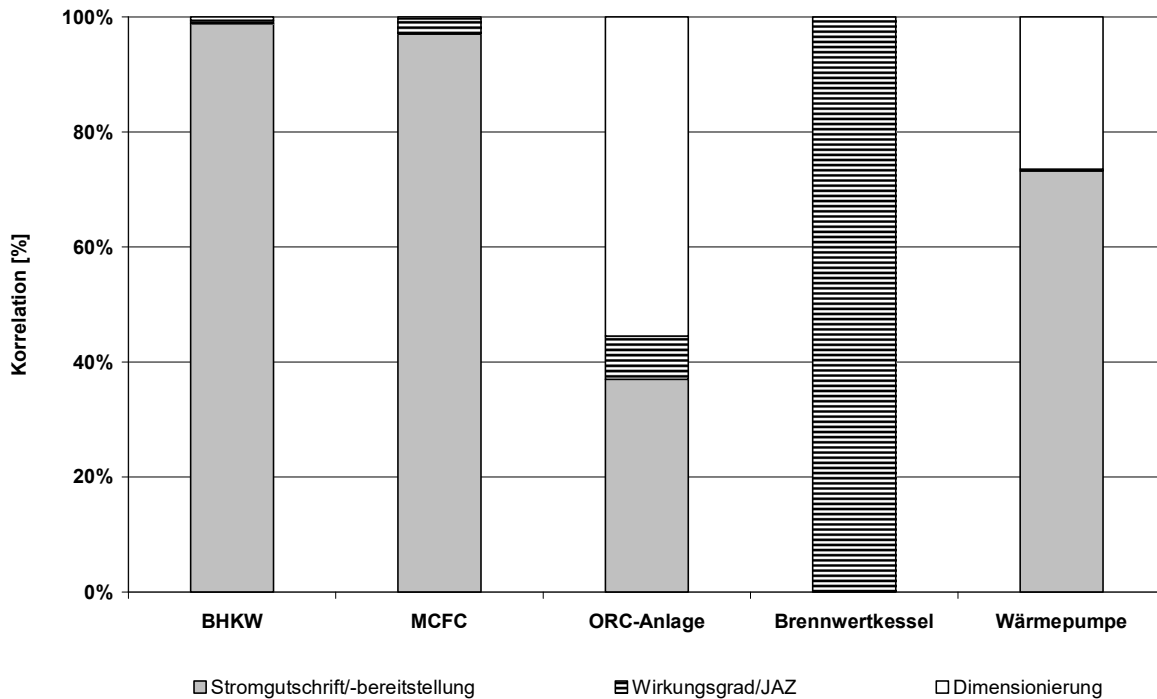


Abbildung 5-15: Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Zuckerfabrik“

5.6 Automobilmontagewerke

Die zugrunde gelegten wirtschaftlichen Rahmendaten der Untersuchung der Automobilwerke sind in Tabelle 5-19 zusammengefasst. Die exogenen Rahmendaten werden auch für diesen Anwendungsbereich aus Tabelle 5-1 übernommen. Dabei ist zu beachten, dass für alle drei untersuchten Größenkategorien von Werken die exogenen Rahmendaten für Großverbraucher herangezogen werden. Hintergrund ist die Einbettung sämtlicher Werke in die Konzernstrukturen der deutschen Automobilindustrie, die zur Folge hat, dass über die Bündelung der Nachfrage über alle jeweils zugehörigen Betriebsstätten günstigere Einkaufspreise erzielt werden sollen.

Gegenüber den zuvor untersuchten Anwendungen unterscheidet sich das Automobilwerk neben den geänderten Prozessstrukturen v. a. durch die höhere Dampftemperatur, die zu höheren energetischen Verlusten bei der Dampfbereitstellung führt. Gleichzeitig weisen die Automobilwerke die höchsten Bedarfsanteile an Niedertemperaturwärme aller untersuchten Industrianwendungen auf.

Tabelle 5-19: Technisch-wirtschaftliche Rahmendaten Automobilmontagewerke

Größe	Einheit	Automobilmonta- gewerk groß		Automobilmonta- gewerk mittel		Automobilmonta- gewerk klein		Verteilung
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	
Laufzeit	[a]	10	10	10	10	10	10	gleichförmig
Dimensionierung bzgl. Maximallast	[%]	70	90	70	90	70	90	gleichförmig
Spez. Investitionskosten BHKW	[€/kW _a]	177	232	177	232	198	271	gleichförmig
Spez. Investitionskosten Brennwertkessel	[€/kW _{th}]	45	48	45	48	45	48	gleichförmig
Spez. Investitionskosten MCFC	[€/kW _a]	473	941	473	941	473	941	gleichförmig
Spez. Investitionskosten ORC-Anlage	[€/kW _a]	613	981	770	1.173	1.025	1.657	gleichförmig
Spez. Investitionskosten Wärmepumpe	[€/kW _{th}]	35	40	35	40	43	53	gleichförmig
El. Wirkungsgrad BHKW	[%]	48,7	50,9	48,7	50,9	46,1	49,0	gleichförmig
El. Wirkungsgrad MCFC	[%]	47	51,5	47	51,5	47	51,5	gleichförmig
El. Wirkungsgrad ORC-Anlage	[%]	15	20,2	15	20,2	15	20,2	gleichförmig
Therm. Wirkungsgrad Brennwertkessel	[%]	109	110	109	110	109	110	gleichförmig
Jahresarbeitszahl Wärmepumpe	[-]	4	4,3	4	4,3	4	4,3	gleichförmig

5.6.1 Großes Automobilmontagewerk

Für das große Automobilmontagewerk ergibt sich ein Nutzwärmebedarf von 219 GWh_{thNutz}/a. Nach heutigem Stand stellt das BHKW mit 23 €/MWh_{thNutz} (vgl. Tabelle 5-20) die kostengünstigste Versorgungsalternative dar. Es folgen, mit einigem Abstand, die ORC-Anlage, die Wärmepumpe und der Brennwertkessel, die alle in einem extrem schmalen Bereich zwischen 36 und 37 €/MWh_{thNutz} liegen.

Somit stellt das große Automobilmontagewerk die Anwendung mit dem niedrigsten Kosteniveau im Rahmen der Untersuchung dar. Zusätzlich zu den Großverbraucherbezugspreisen leistet hierzu v. a. der hohe Anteil an NT-Wärme (vgl. Abschnitt 4.2.4) seinen Beitrag, der die Auswirkungen der ungünstigeren dampfseitigen Betriebsparameter überkompensiert.

Für die MCFC ergibt sich trotz dieser vorteilhaften Rahmenbedingungen auch in diesem Fall aus heutiger Sicht keine wirtschaftlich attraktive Nutzung.

Tabelle 5-20: Ergebnis der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten des großen Automobilmontagewerks in €/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	BHKW	23	29	16-41
2	ORC-Anlage	36	44	30-57
3	Wärmepumpe	36	45	36-55
4	Brennwertkessel	37	47	36-59
5	MCFC	120	76	26-138

Im Jahr 2030 behält das BHKW seine kostenseitige Führung trotz eines erheblichen Anstiegs beim Absolutwert (+26 %). Da sich aber auch die Wärmeversorgung mit den übrigen Alternativen außer der MCFC verteuert, ergeben sich im Ranking keine Veränderungen. Der enge Kostenbereich, in dem sich die ORC-Anlage, die Wärmepumpe und der Brennwertkessel befinden, bleibt im Jahr 2030 erhalten, allerdings auf einem gegenüber den heutigen Werten um ca. 20 % höheren Niveau.

Die MCFC kann auch im Automobilwerk nicht von den sinkenden Absolutkosten profitieren und belegt auch 2030 den letzten Platz.

Korrelationsanalyse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für das große Automobilwerk

Die Korrelationsanalyse (vgl. Abbildung 5-16) ergibt für das BHKW einen dominierenden Einfluss der Erdgaspreisentwicklung (94 %). Die Stromgutschrift erreicht einen Wert von 0,7 % und weist somit nur geringe Auswirkungen auf das künftige Kostenniveau der Wärmeerzeugung im großen Automobilmontagewerk auf. Auch der Beitrag der CO₂-Zertifikatspreise liegt ebenso deutlich unter 1 % wie die mögliche Entwicklung des elektrischen Wirkungsgrads.

Die MCFC weist neben dem Erdgaspreis- (76 %) und dem Investitionskosteneinfluss (18 %) insbesondere noch die Zinssatzentwicklung (4 %) als relevante Einflussgröße auf.

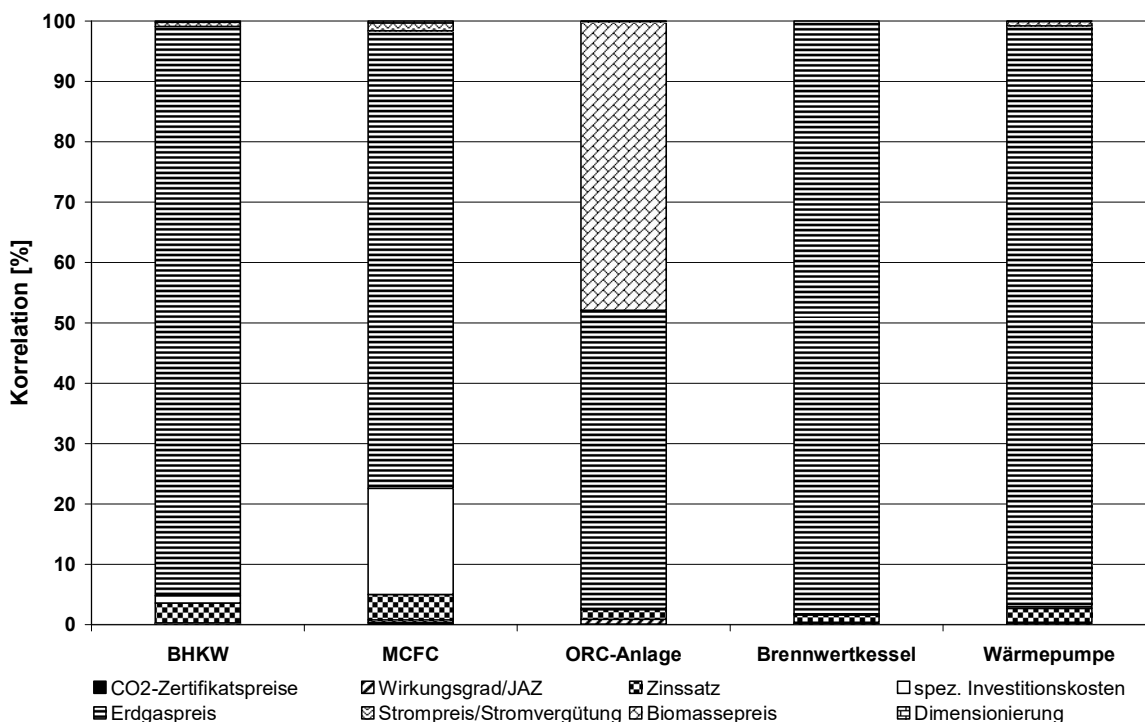


Abbildung 5-16: Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten des großen Automobilmontagewerks

Bei der ORC-Anlage schlägt sich der in der Anwendung vorhandene hohe Bedarfsanteil an NT-Wärme in hoher Abhängigkeit von der Preisentwicklung im Biomassebereich (48 %) nieder, der nach dem Erdgaspreises (49 %) zum zweitgrößten Einflussfaktor wird. Die Vari-

ante Brennwertkessel ist kostenseitig nahezu vollständig (98 %) von der zugrunde gelegten Erdgaspreisentwicklung abhängig. Ähnliches gilt mit einem Korrelationswert von 96 % auch für die Wärmepumpe.

Ökologische Analyse des großen Automobilwerks

Auch im Anwendungsfall des großen Automobilmontagewerks stellt die MCFC mit einem Wert von -135 kg CO₂/MWh_{thNutz} die Technik mit den aus heutiger Sicht geringsten spezifischen Emissionswerten dar. Es folgt das BHKW mit 8 kg CO₂/MWh_{thNutz} (vgl. Tabelle 5-21).

Tabelle 5-21: Ergebnis der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Automobilmontagewerk groß“ in kg CO₂/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	BHKW	8	115	71-152
2	ORC-Anlage	112	135	112-155
3	Wärmepumpe	225	192	177-206
4	MCFC	-135	268	112-415
5	Brennwertkessel	220	220	220-220

Wegen des Biomasseanteils infolge des prozessbedingt geringen Wärmebedarfs aus dem Brennwertkessel erreicht die ORC-Anlage 112 kg CO₂/MWh_{thNutz}. Die Varianten Brennwertkessel und Wärmepumpe emittieren jeweils deutlich höhere Mengen.

Es zeigt sich, dass aus künftiger Sicht trotz eines deutlich steigenden Wertes das BHKW die bezüglich der betrieblichen CO₂-Emissionen ökologisch günstigste Technik darstellt. Für das BHKW spricht v. a. der - aufgrund der gegenüber der MCFC geringeren Stromkennzahl - weniger stark zu Buche schlagende geringere Stromgutschriftsatz. Die ORC-Anlage kann trotz geringerer spezifischer Stromgutschrift ihre wärmemengenbezogenen CO₂-Emissionen durch technische Fortschritte nahezu halten. Auch bei der Wärmepumpe schlägt sich die prozesstemperaturbedingt mögliche höhere Stromnutzung in künftig sinkenden Emissionswerten nieder. Im Vergleich zu anderen untersuchten Branchen fallen dabei die Rückgänge deutlich höher aus.

Die möglichen CO₂-emissionsseitigen Verringerungen beim Brennwertkessel sind dagegen infolge geringerer Reduktionspotenziale beim thermischen Wirkungsgrad nur gering.

Korrelationsanalyse der ökologischen Untersuchung des großen Automobilwerks

Die Emissionswertverteilungen der Strom erzeugenden Techniken BHKW und MCFC werden auch in der Automobilindustrie von der Stromgutschrift bestimmt (vgl. Abbildung 5-17).

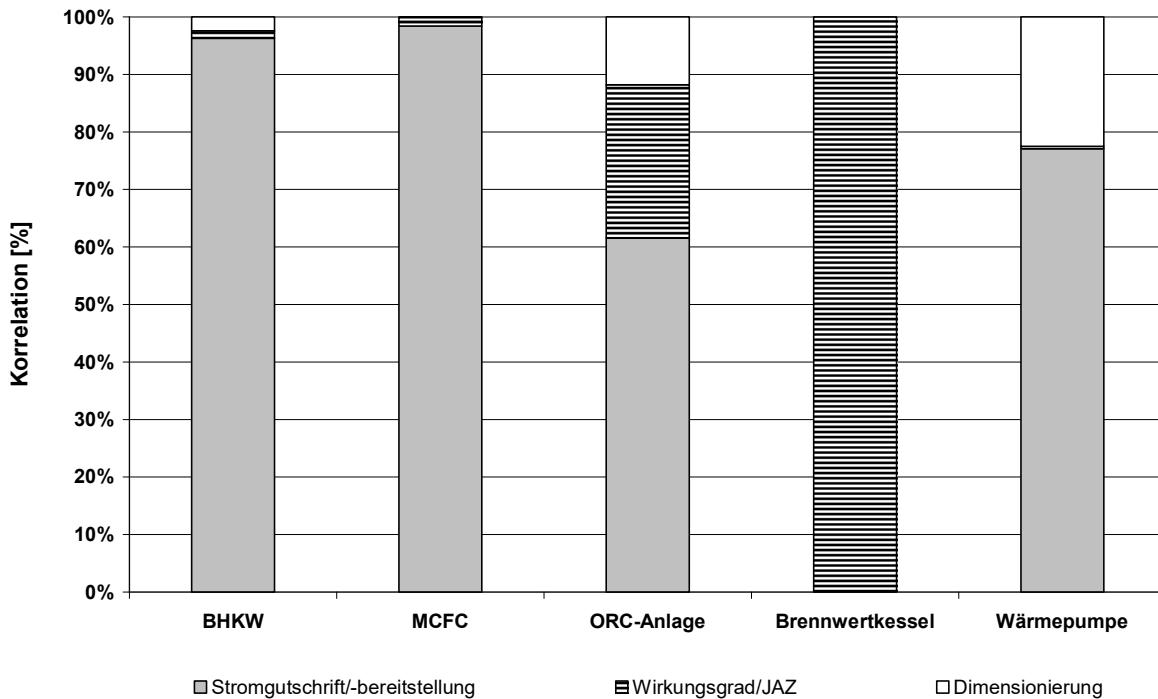


Abbildung 5-17: Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Automobilmontagewerk groß“

Im Fall der ORC-Anlage besitzen neben den strombezogenen Emissionen auch die Anlagen-dimensionierung sowie insbesondere die mögliche Wirkungsgradentwicklung einen nachhal-tigen Einfluss auf das Wertespektrum. Der Brennwärerkessel ist auch in diesem Beispiel völlig von den Fortschritten beim Wirkungsgrad abhängig. Bei der Wärmepumpe dominiert tempe-raturbedingt die Strombereitstellung die ökologische Perspektive.

5.6.2 Mittelgroßes Automobilmontagewerk

Aus der Prozessanalyse ergibt sich für das mittelgroße Automobilwerk ein Nutzwärmebedarf von 110 GWh_{thNutz}/a. Nach heutigem Stand stellt das BHKW mit 26 €/MWh_{thNutz} die Alterna-tive mit den geringsten Wärmeerzeugungskosten (vgl. Tabelle 5-22) dar. Analog zum großen Automobilmontagewerk folgen mit dem Brennwärerkessel, der Wärmepumpe und der ORC-Anlage mit Werten zwischen 38 und 44 €/MWh_{thNutz} drei Alternativen in einem engen Kos-tenbereich. Die MCFC weist auch hier mit weitem Abstand die höchsten Wärmeerzeugungskosten der Untersuchung auf.

Tabelle 5-22: Ergebnis der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten des mittelgroßen Automobilmontagewerks in €/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	BHKW	26	30	17-43
2	Wärmepumpe	38	47	38-57
3	Brennwertkessel	38	48	37-60
4	ORC-Anlage	44	52	38-67
5	MCFC	328	74	19-133

Für die weitere Entwicklung bleibt die heutige Reihenfolge unverändert, wobei auf Basis der Medianwerte generell mit leicht steigenden Wärmeerzeugungskosten zu rechnen ist; Ausnahme bleibt auch hier die MCFC, die trotz ihres starken Erzeugungskostenrückgangs die mit deutlichem Abstand teuerste Alternative bleibt.

Korrelationsanalyse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für das mittelgroße Automobilmontagewerk

Es zeigt sich auch im mittelgroßen Automobilmontagewerk die für das BHKW typische Dominanz des Erdgaspreises (vgl. Abbildung 5-18). Bei der MCFC sind zusätzlich noch die Investitionskosten bestimmend.

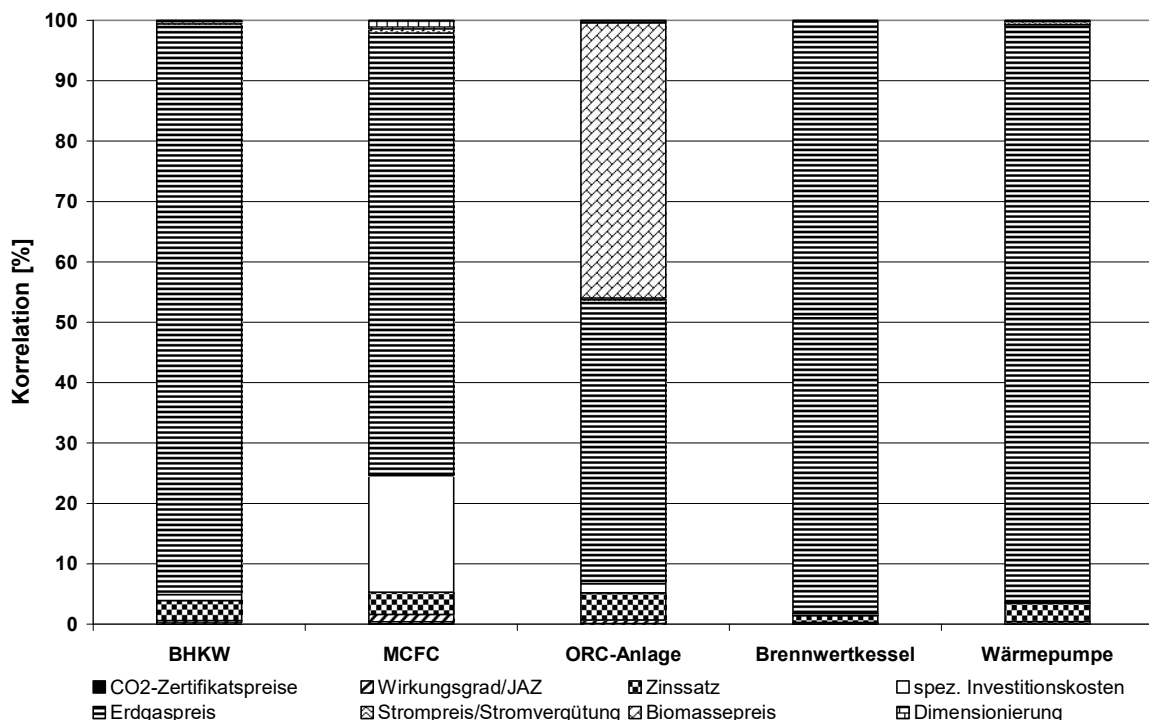


Abbildung 5-18: Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten des mittelgroßen Automobilmontagewerks

Auch in dieser Anwendung stellt die ORC-Anlage die Versorgungsvariante mit der diversifiziertesten Verteilung der untersuchten Parameterwerte dar. Wesentlicher Hintergrund des

hohen Wertes für den Biomassepreis (46 %) ist der hohe Wärmebedarfsanteil der niedertemperaturigen Prozesse. Damit muss eine geringere Wärmemenge aus dem zugeschalteten Erdgaskessel bezogen werden, wodurch u. a. die Erdgasbezugsmenge und die daraus resultierenden CO₂-Emissionen sinken.

Beim Brennwertkessel ergibt sich hingegen das bekannte Bild der Dominanz des Erdgaspreises.

Für die Wärmepumpe ergibt sich ebenfalls das bereits aus dem großen Automobilwerk bekannte Bild. Das Kostenspektrum hängt v. a. von den Erdgaspreisen (96 %) sowie dem Zinssatz (3 %) ab. Die weitere Entwicklung der spezifischen Investitionskosten und die möglichen Verbesserungen bei der Jahresarbeitszahl spielen dagegen keine wesentliche Rolle.

Ökologische Analyse des mittelgroßen Automobilwerks

Auch für die mittlere Werksgröße erweist sich die MCFC mit -156 kg CO₂/MWh_{thNutz} als die Technik mit den geringsten heutigen spezifischen CO₂-Emissionswerten (vgl. Tabelle 5-23). Es folgen mit dem BHKW und der ORC-Anlage die beiden weiteren KWK-Techniken, wohingegen Brennwertkessel und Wärmepumpe mit jeweils über 200 kg CO₂/MWh_{thNutz} die höchsten spezifischen Emissionswerte aufweisen.

Die weitere Entwicklung folgt ebenfalls der aus dem großen Werk bekannten Entwicklung. So wird auch hier das BHKW durch die geringeren Einbußen bei der Stromgutschrift die Führung von der MCFC übernehmen, die auf den letzten Platz zurückfällt. Die ORC kann ihr Emissionsniveau nahezu behaupten.

Bei der Wärmepumpe kommt es in Folge der Veränderungen im Strommix zu leichten Emissionsreduktionen, der Brennwertkessel stagniert auf hohem Niveau.

Tabelle 5-23: Ergebnis der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Automobilmontagewerk mittel“ in kg CO₂/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	BHKW	8	117	76-154
2	ORC-Anlage	112	135	112-156
3	Wärmepumpe	230	194	179-209
4	Brennwertkessel	221	221	221-221
5	MCFC	-156	246	94-390

Korrelationsanalyse der ökologischen Untersuchung des mittelgroßen Automobilwerks

Es ergibt sich das bekannte Bild, wonach bei BHKW und MCFC die Stromgutschrift den einzigen bedeutenden Einflussfaktor darstellt (vgl. Abbildung 5-19). Bei der ORC-Anlage schlagen sich die Verbesserungen des Wirkungsgrads mit einem Korrelationswert von 8 % deutlich im Wertebereich der CO₂-Emissionen nieder.

Für den Brennwertkessel und die Wärmepumpe spiegeln die sich ergebenden Relevanzverteilungen ebenfalls die bereits für das große Automobilwerk erhaltenen Ergebnisse wider.

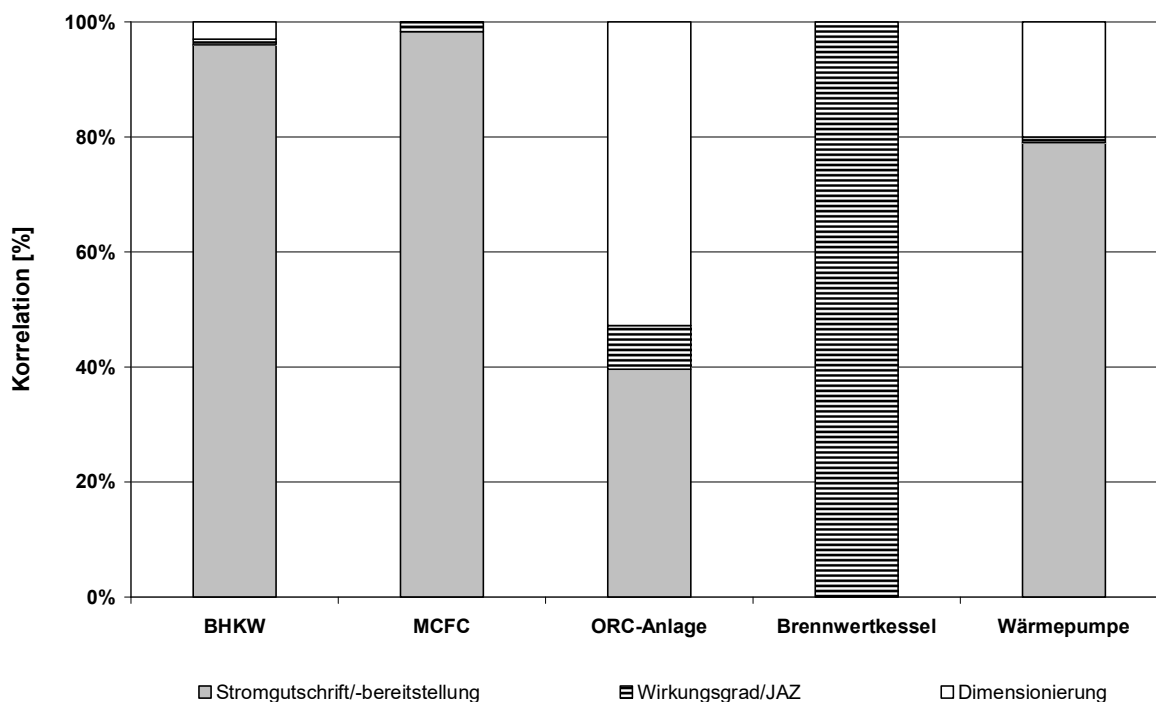


Abbildung 5-19: Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Automobilmontagewerk mittel“

5.6.3 Kleines Automobilmontagewerk

Das kleine Automobilmontagewerk verfügt über eine Kapazität von 50.000 Einheiten pro Jahr und einen Nutzwärmebedarf von 27 GWh_{thNutz}/a. Wegen der installierten Feuerungsleistung werden nur die Varianten BHKW und MCFC in den Emissionshandel einbezogen.

Nach heutigem Stand weist das BHKW als günstigste Wärmeerzeugungstechnik Kosten in Höhe von 35 €/MWh_{thNutz} (vgl. Tabelle 5-24) auf. Es folgen der Brennwertkessel, der 37 €/MWh_{thNutz} erreicht sowie Wärmepumpe, ORC-Anlage und MCFC.

Tabelle 5-24: Ergebnis der Monte Carlo-Simulation der spezifischen Wärmeerzeugungskosten des kleinen Automobilmontagewerks in €/MWh_{thNutz}

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	BHKW	35	37	24-51
2	Brennwertkessel	37	41	30-53
3	Wärmepumpe	42	47	38-57
4	ORC-Anlage	51	55	40-71
5	MCFC	411	83	32-142

Die weitere Entwicklung zeigt, dass sich das BHKW nicht nur an der Spitze halten kann, sondern dabei auch noch mit nur leicht steigenden Wärmeerzeugungskosten rechnen kann. Die übrigen Techniken mit Ausnahme der MCFC weisen dagegen gegenüber dem derzeitigen Stand prozentual höhere Kostenzuwächse auf. Im Kostenranking ergeben sich für 2030 somit

keine Änderungen gegenüber dem heutigen Stand. Auch bei hohem NT-Wärmebedarfsanteil, wie in dieser Anwendung vorgegeben, vermag die MCFC gegenüber den untersuchten Alternativen nicht in den Bereich der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit vorzustoßen.

Korrelationsanalyse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für das kleine Automobilwerk

Die Korrelationswertbestimmung des BHKW weist auch im Anwendungsfall des kleinen Automobilmontagewerks im Jahr 2030 die Erdgaspreisentwicklung als mit Abstand wichtigsten Parameter aus (vgl. Abbildung 5-20). Der zugehörige Korrelationswert beträgt 93 %. Die bis dahin möglichen Wirkungsgradverbesserungen haben auch in diesem Versorgungsbeispiel keinen nennenswerten Einfluss auf die Werteverteilung.

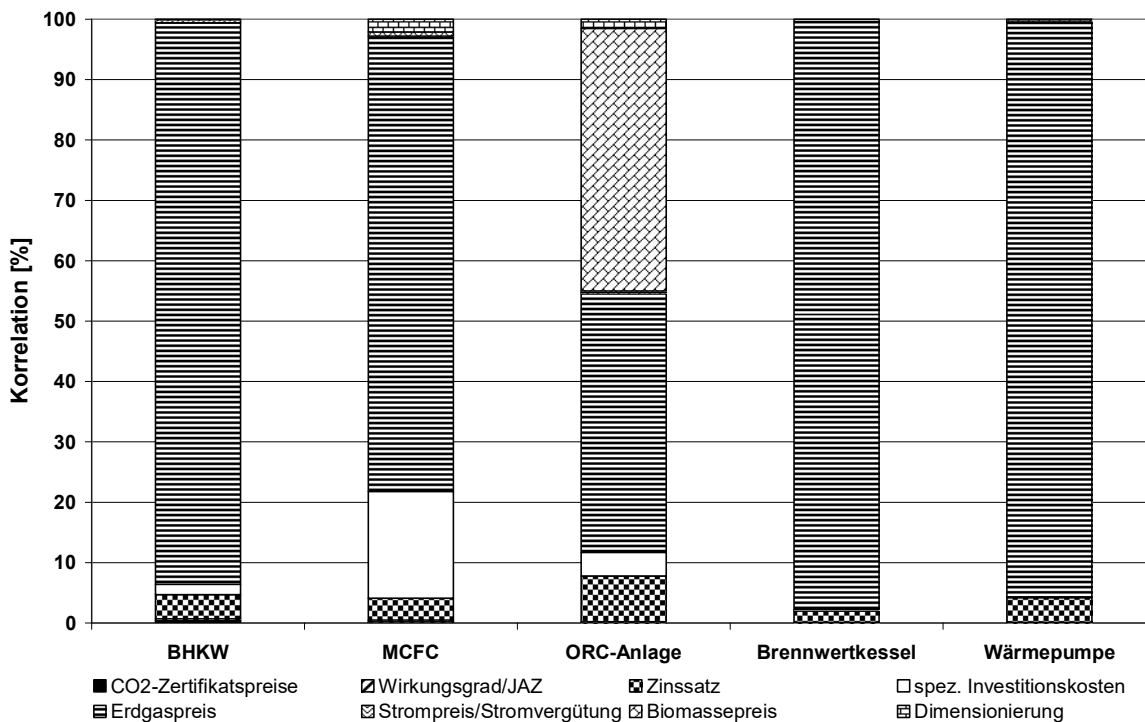


Abbildung 5-20: Analyse der Einflussfaktoren auf die Wärmeerzeugungskosten des kleinen Automobilmontagewerks

Die Wirtschaftlichkeitsrechnung für die MCFC wird neben dem Erdgaspreis (75 %) v. a. auch durch die Investitionskostenentwicklung (18 %) determiniert.

Analog zu den beiden größeren Automobilwerken stellt die ORC-Anlage die Technik dar, die den vielfältigsten Einflussgrößen unterworfen ist. Hintergrund ist auch hier die Struktur des Wärmebedarfs mit seinem hohen Anteil an NT-Wärme, der die Wärmezulieferungen aus dem angeschlossenen Erdgaskessel reduziert, wodurch der Erdgasbezug sinkt und gleichzeitig der Biomasseverbrauch steigt. Dementsprechend ergeben sich die Preisentwicklungen beim Erdgas (43 %) und bei der Biomasse (44 %) als die bedeutendsten Kosteneinflussfaktoren.

Die Kostenstruktur des Brennwertkessels wird, wie ebenfalls bereits aus anderen Anwendungen bekannt, vorwiegend vom Erdgaspreis geprägt.

Bei der Wärmepumpe erweist sich v. a. der zugrunde gelegte Wertebereich für den Erdgaspreis als entscheidende Einflussgröße auf die Kostenstruktur des Jahres 2030. Trotz des gegenüber anderen Branchen höheren Bedarfsanteils an NT-Wärme in der Automobilfertigung, der den Erdgasbezug ebenfalls reduziert, bleibt der Einfluss des Strompreises auf die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe nicht entscheidend.

Ökologische Analyse des kleinen Automobilwerks

Die MCFC weist in dieser Anwendung für die heutigen Rahmenbedingungen mit einem Wert von $-135 \text{ kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{thNutz}}$ die geringsten spezifischen Emissionen aller betrachteten Techniken auf (vgl. Tabelle 5-25). Es folgen mit dem BHKW und der ORC-Anlage die beiden weiteren Strom erzeugenden Techniken, wohingegen der Brennwertkessel und die Wärmepumpe mit jeweils über $200 \text{ kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{thNutz}}$ die höchsten spezifischen Werte erreichen.

Im kleinen Automobilwerk verliert die MCFC ihre führende Rolle aufgrund der Veränderungen in der Höhe der Stromgutschrift an die ORC-Anlage, die im Ranking knapp vor dem BHKW landet. Neben den Veränderungen bei der Stromgutschrift ist v. a. der hohe Bedarfsanteil an NT-Wärme für diesen Effekt verantwortlich, der einen hohen Biomasseeinsatz bei gleichzeitig sinkendem Erdgasverbrauch ermöglicht (vgl. hierzu auch Abbildung 5-20).

Tabelle 5-25: Ergebnis der Monte Carlo-Simulation für die spezifischen betrieblichen CO_2 -Emissionen der Wärmeerzeugung im Fall „Automobilmontagewerk klein“ in $\text{kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{thNutz}}$

Rang	System	heute	Mittelwert (Median) 2030	Bereich (Min.-Max.) 2030
1	ORC-Anlage	88	111	88-130
2	BHKW	19	119	79-152
3	Wärmepumpe	225	192	177-206
4	Brennwertkessel	220	220	220-220
5	MCFC	-135	244	53-414

Dagegen ergeben sich für den Brennwertkessel stagnierende und für die Wärmepumpe, ebenfalls in Folge des hohen NT-Bedarfsanteils sowie den Veränderungen im deutschen Strommix, sinkende Emissionswerte.

Die MCFC mit ihrer hohen Stromkennzahl muss bei den Emissionen deutliche Steigerungen verkraften und landet im Ranking nunmehr nur auf dem fünften Rang.

Korrelationsanalyse der ökologischen Untersuchung des kleinen Automobilwerks

Für die Korrelationsanalyse ergibt sich im Wesentlichen das bereits von den zuvor behandelten Werksgrößen der Automobilbranche bekannte Bild (vgl. Abbildung 5-21).

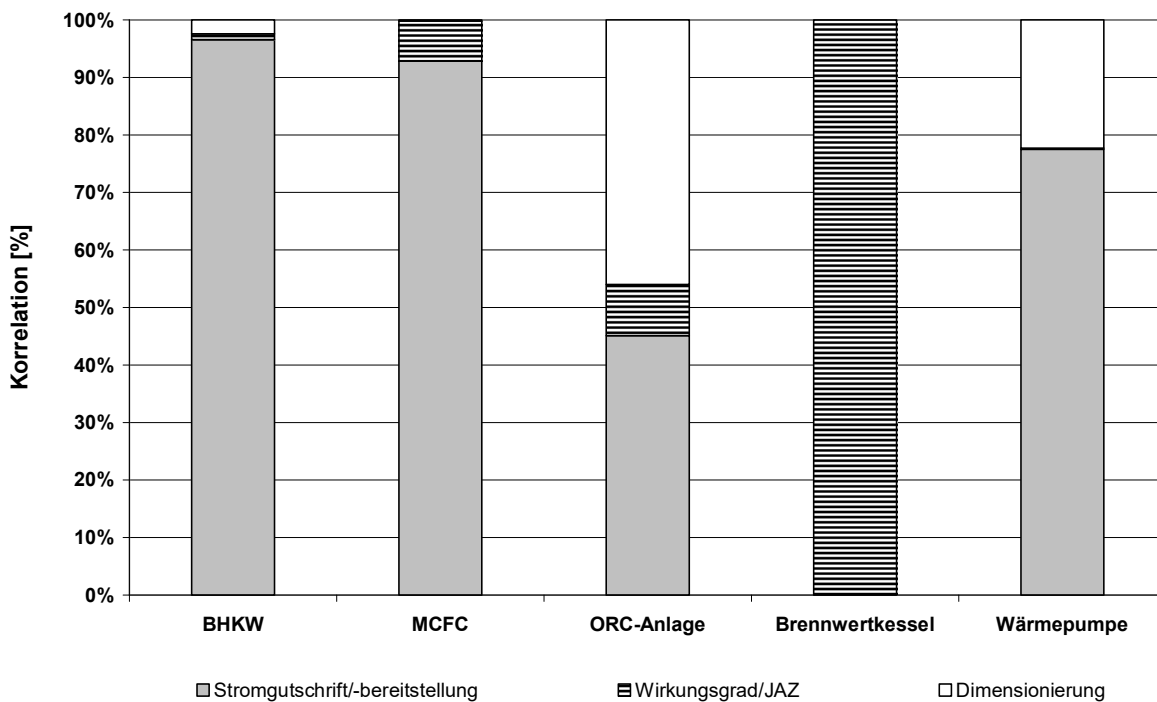


Abbildung 5-21: Analyse der Einflussfaktoren auf die spezifischen betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken für die Anwendung „Automobilmontagewerk klein“

Die sich bei BHKW und MCFC ergebenden Auswirkungen auf das CO₂-Emissionsverhalten haben ihre Ursache in erster Linie und nahezu ausschließlich im Wandel beim Strommix, der die entsprechenden Gutschriften deutlich reduziert.

Die ORC-Anlage und die Wärmepumpe profitieren bei der Höhe der Emissionen vom NT-Anteil der Bedarfsstruktur, was sich in hohen Korrelationswerten für die Dimensionierung bezüglich der Maximallast sowie im Fall der ORC-Anlage zusätzlich in einer vergleichsweise hohen Bedeutung der Wirkungsgradentwicklung niederschlägt.

Beim Brennwärtekessel können in der Monte Carlo-Simulation außer dem geringen Wirkungsgradzuwachs keine weiteren Einflussgrößen variiert werden. Somit entfällt auf den Einfluss des möglichen Wirkungsgradzuwachses ein Korrelationswert von 100 %; in der Praxis führt dieser technische Fortschritt allerdings lediglich zu spezifischen Emissionsreduktionen im Nachkommabereich.

5.7 Zusammenfassung der Technologiebewertung für die Fallbeispiele

In den vorangegangenen Kapitelabschnitten werden wirtschaftliche und ökologische Kennziffern für die Anwendung der zuvor untersuchten Wärmeerzeugungstechniken für industrielle Anwendungsfälle für den heutigen Stand und das Jahr 2030 ermittelt. Die für das Jahr 2030 zu erwartenden Unsicherheiten der endogenen und exogenen Einflussgrößen fließen im Rahmen einer Monte Carlo-Simulation in den jeweiligen Bestimmungsalgorithmus ein.

In der Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeitsanalyse der untersuchten industriellen Einsatzfelder der Wärmeerzeugungstechniken zeigen sich bereits auf dem heutigen Stand technik-, betriebsgrößen- und anwendungsabhängige Kostenbereiche. So fallen die derzeit günstigsten Wärmeerzeugungskosten unter den betrachteten Versorgungsaufgaben im großen Automobilwerk (bspw. BHKW 23 €/MWh_{thNutz}) oder in der großen Papierfabrik (bspw. BHKW 24 €/MWh_{thNutz}) an (vgl. Tabelle 5-26). Beide Anwendungen weisen einen hohen absoluten Wärmebedarf und eine hohe Anlagenauslastung auf, das große Automobilwerk wartet zusätzlich noch mit einem hohen Anteil des Wärmebedarfs im Niedertemperaturbereich auf, der - insbesondere beim BHKW - für eine sinnvolle Nutzung der auf geringem Temperaturniveau anfallenden Anteil der Wärmeproduktion sorgt. Dagegen fallen erwartungsgemäß die höchsten Wärmeerzeugungskosten bei den kleinen Verbrauchern, wie etwa der kleinen Brauerei (bspw. Brennwertkessel 130 €/MWh_{thNutz}) an, insbesondere auch dann, wenn der Anteil des Niedertemperaturwärmebedarfs gering ausfällt (wie z. B. in der Papierindustrie oder der Bierherstellung). Hierfür sind, neben den prozessbedingten Temperaturanforderungen, technikübergreifend v. a. das hohe Primärenergiepreisniveau infolge geringer Abnahmemengen, aber auch die geringen installierten Leistungsgrößen sowie die in der Regel geringe Anlagenauslastung verantwortlich.

Tabelle 5-26: Heutige Wärmeerzeugungskosten für verschiedene Wärmeerzeugungssysteme und Anwendungsfälle in €/MWh_{thNutz}

Branche	Papierfabrik			Brauerei			Zuckerfabrik	Automobilwerk		
	groß	mittel	klein	groß	mittel	klein	groß	groß	mittel	klein
BHKW	26	25	42	46	69	203	39	23	26	35
Brennwertkessel	33	35	53	38	69	130	44	37	38	37
ORC-Anlage	33	36	56	44	80	213	40	36	44	51
Wärmepumpe	36	37	59	52	84	218	45	36	38	42
MCFC	168	192	295	342	424	709	333	120	328	411

Im brancheninternen Vergleich sind, trotz teilweise unterschiedlicher Wärmebedarfsstrukturen, bei den jeweils größeren Betriebseinheiten bei allen Wärmeerzeugungstechniken tendenziell günstigere Wärmeerzeugungskosten realisierbar. So betragen zum Beispiel für das BHKW in der großen Papierfabrik die Wärmeerzeugungskosten 26 €/MWh_{thNutz}, wohingegen beim Betrieb eines BHKW in einer kleinen Papierfabrik 42 €/MWh_{thNutz} aufzuwenden sind. Die generellen Ursachen können teilweise in den geringeren Primärenergiepreisen, den höheren erreichbaren Auslastungswerten, den günstigeren spezifischen Investitionskosten infolge höherer Anlagenleistungen sowie teilweise auch in den umfangreicheren Prozessschemata der größeren Betriebe, die – wie etwa beim BHKW - bspw. auch für die anfallende Niedertemperaturwärme Nutzungsmöglichkeiten bereithalten. Die höheren angesetzten Stromvergütungssätze der kleineren Betriebe oder die Befreiung vom Emissionshandel können diese Effekte in der Regel nur teilweise ausgleichen.

Die Versorgungsalternative Brennwertkessel stellt insbesondere für kleinere Anwendungen eine günstige Möglichkeit der Wärmeversorgung dar. Hintergrund ist, dass die Brennwerttechnik in Folge ihrer langjährigen Marktpräsenz, den Fertigungsstrukturen im industriellen Maßstab und, v. a., dem ausschließlich auf Standardkomponenten basierenden Aufbau sehr günstige Investitionskosten verzeichnet und eine entsprechend geringe Kapitalbindung erfordert. Somit lassen sich auch bei geringen Volllaststundenzahlen, wie bei kleineren Industriebetrieben üblich, gegenüber konkurrierenden Erzeugungstechniken geringere Wärmeversorgungskosten erzielen. Zudem weist die Brennwerttechnik im Niedertemperaturbereich sehr hohe thermische Wirkungsgrade auf und kann in Folge des hohen erreichbaren Temperaturniveaus auch zur Prozessdampferzeugung eingesetzt werden. Ein weiterer Vorteil der Brennwerttechnik ist die gegenüber den anderen betrachteten Wärmeversorgungstechniken, insbesondere der Wärmepumpe, problemlose Systemintegration in betriebliche Versorgungssysteme. Zudem handelt es sich um eine sehr raumsparende und wartungsarme Methode der Wärmeerzeugung.

Die ORC-Anlage stellt aus heutiger Sicht für die meisten der untersuchten Anwendungen keine wirtschaftlich konkurrenzfähige Alternative zu BHKW und Brennwertkessel dar. Die Hintergründe liegen v. a. in den - insbesondere für kleine Leistungsgrößen - hohen Investitionskosten. Zudem verfügt die Technik nur über ein eingeschränktes nutzbares Temperaturniveau, und der bauliche Aufwand sowie der Platzbedarf sind aller Regel sehr hoch.

Die Wärmepumpe stellt für viele Versorgungsaufgaben angesichts des geringen abdeckbaren Temperaturspektrums die teuerste der serienmäßig verfügbaren Wärmeerzeugungstechniken dar. Lediglich bei Anwendungen mit hohem Niedertemperaturanteil am Wärmebedarf, wie etwa den analysierten Automobilwerken, kommt die Wärmepumpe in die Nähe eines konkurrenzfähigen Kostenniveaus der Wärmeerzeugung. Abseits der Betriebskostenbetrachtung weist der Einsatz von Wärmepumpen in der industriellen Fertigung in aller Regel einen hohen, einzelprozessbezogenen Planungsaufwand auf, der in der Praxis schwierig mit den Anforderungen an moderne Industriebetriebe nach hoher betrieblicher und prozessbezogener Flexibilität zu vereinbaren ist.

Schlusslicht aller Kostenbetrachtungen ist aus heutiger Sicht mit deutlichem Abstand jeweils die MCFC. Wesentlicher Hintergrund ist die bislang noch nicht erreichte Verfügbarkeit von entsprechenden Anlagen aus industrieller Serienproduktion. Stattdessen existieren bislang lediglich handgefertigte Vorserienmodelle, u. a. mit deutlich über den Marktanforderungen liegenden Investitionskosten.

Analog zur Bestimmung der Wärmeversorgungskosten werden für die einzelnen industriellen Wärmeanwendungen die aus heutiger Sicht anfallenden betrieblichen CO₂-Emissionen ermittelt, wobei im Falle der Wärmepumpe auch die indirekten Emissionen aus der Strombereitstellung gemäß Strommix Deutschland berücksichtigt werden. Die mit der Erdgas- bzw. der Biomassebereitstellung einhergehenden Umweltauswirkungen sind dagegen nicht Teil der Analyse.

Die sich ergebenden heutigen Ausgangswerte sind in Tabelle 5-27 zusammengefasst.

Tabelle 5-27: Heutige betriebliche CO₂-Emissionen für verschiedene Wärmeerzeugungssysteme und Anwendungsfälle in kg CO₂/MWh_{thNutz}

Branche	Papierfabrik			Brauerei			Zuckerfabrik	Automobilwerk		
	groß	mittel	klein	groß	mittel	klein	groß	groß	mittel	klein
MCFC	-77	-86	-82	-9	-1	-14	10	-135	-156	-135
BHKW	75	55	131	125	145	159	123	8	8	19
ORC-Anlage	205	184	305	224	226	225	240	112	112	88
Brennwertkessel	241	239	367	246	247	248	247	220	221	220
Wärmepumpe	274	267	410	284	285	286	289	225	230	225

Es zeigt sich, dass die MCFC-Wärmeversorgungssysteme in allen betrachteten Anwendungsfällen aus heutiger Sicht die geringsten CO₂-Emissionswerte ausweisen. Es folgen die beiden weiteren KWK-Techniken BHKW und ORC-Anlage, die, u. a. aufgrund ihrer niedrigeren Stromkennzahlen, mit geringeren Stromgutschriften auskommen müssen. Zudem haben auch die Abwärmtemperatur, die temperaturbezogene Struktur des Wärmebedarfs, der eingesetzte Brennstoff und der thermische Wirkungsgrad Auswirkungen auf das Emissionsverhalten. Tendenziell ergeben sich für Anwendungen mit hohen Bedarfsanteilen an Niedertemperaturwärme geringere CO₂-Emissionswerte, da die entsprechenden Prozesse u. a. nicht über auch in energetischer Hinsicht aufwendige Prozessdampfsysteme versorgt werden müssen. Zudem können Wärmemengen auf geringem Temperaturniveau, wie etwa aus dem Kühlwasserkreislauf von BHKW, noch genutzt werden. Dagegen sind die sich aus der Betriebsgröße ergebenden emissionsseitigen Unterschiede für alle betrachteten Systeme gering. Diesbezüglich haben unterschiedliche Werte ihre Ursache vor allem in den betriebsgrößenspezifischen Prozessstrukturen, die sich über den Wärmebedarf und dessen Temperaturprofil in den Emissionen niederschlagen.

Ausgehend vom heutigen Kostenstand und den heutigen CO₂-Emissionswerten werden in der durchgeführten Monte Carlo-Simulation für das Jahr 2030 für die genannten Versorgungsaufgaben die unsicherheitsbehafteten technischen und wirtschaftlichen Entwicklungspotenziale der einzelnen Wärmeerzeugungssysteme mit den ebenfalls unsicherheitsbehafteten exogenen ökonomischen und ökologischen Einflussfaktoren, wie etwa Primärenergiepreise, Zinssätze oder CO₂-Gutschriften kombiniert.

In der anwendungsfallsspezifischen Analyse mit Hilfe der rechnerbasierten Monte Carlo-Simulation ergeben sich Kosten- und CO₂-Emissionswertebereiche mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten der einzelnen Zielgrößenwerte. Für die Bewertung werden die sich ergebenden Medianwerte der Wärmeerzeugungskosten bzw. der CO₂-Emissionswerte als die Resultate mit der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit herangezogen. Dabei ergibt sich kostenseitig das in Tabelle 5-28 dargestellte Bild.

Tabelle 5-28: Medianwerte der Wärmeerzeugungskosten für verschiedene Wärmeerzeugungssysteme und Anwendungsfälle für das Jahr 2030 in €/MWh_{thNutz}

Branche	Papierfabrik			Brauerei			Zuckerfabrik	Automobilwerk		
	groß	mittel	klein	groß	mittel	klein	groß	groß	mittel	klein
BHKW	34	32	53	54	66	196	48	29	30	37
Brennwertkessel	45	46	70	43	65	131	58	47	48	41
ORC-Anlage	44	48	72	49	83	213	52	44	52	55
Wärmepumpe	49	50	78	59	88	220	59	45	47	47
MCFC	53	57	89	89	82	203	84	76	74	83

Ingesamt zeigt sich, dass allen möglichen technischen und investitionskostenseitigen Verbesserungen zum Trotz für das Jahr 2030 mit tendenziell höheren Wärmeerzeugungskosten gerechnet werden muss. Die einzige Ausnahme stellt hierbei die MCFC dar, die unabhängig von der jeweiligen betrachteten Anwendung, deutlich sinkende Kostenwerte aufweist. Hintergrund ist die in den Rahmenannahmen der Monte Carlo-Simulation in Form von deutlich sinkenden Investitionskosten hinterlegte Phase der industriellen Serienfertigung, in welche dieser Anlagentyp bis 2030 eingetreten sein muss, wenn überhaupt noch eine Chance auf kommerzielle Nutzung dieses Konzepts bestehen soll.

Ebenso bleibt die heute bestehende Kostenstaffelung der einzelnen Technikkonzepte bezüglich der Anlagengröße erhalten, d. h., in größeren Betrieben kann eine eingesetzte Wärmeerzeugungstechnik tendenziell günstigere Versorgungskosten generieren.

Das BHKW stellt für die Anwendungen mit hohem Leistungs- und Wärmebedarf trotz höherer Wärmeerzeugungskostenniveaus und gegenüber den betrachteten Konkurrenztechniken tendenziell sinkender Kostenvorsprünge nach wie vor die wirtschaftlich günstigste Alternative dar. Somit bestätigt die Monte Carlo-Analyse die in den meisten Anwendungsfällen bestehende heutige Kostenführerschaft des BHKW auch unter den dann zu erwartenden marktseitigen Rahmenbedingungen für das Jahr 2030.

Die schärfste Konkurrenz des BHKW stellt auch in der zukünftigen Betrachtung der Brennwertkessel dar, der für Industrieanwendungen mit vergleichsweise geringem Wärmebedarf sowie geringer Anlagenauslastung (insbesondere im Brauereiwesen) die wirtschaftlich bessere Lösung darstellt. Zudem kann der Brennwertkessel aufgrund des fehlenden Leistungsanteils für die Stromerzeugung mit geringeren erforderlichen Feuerungsleistungen aufwarten, die neben geringeren Investitionskosten u. U. auch die Befreiung vom Zertifikatehandel ermöglichen.

Die ORC-Anlage und die Wärmepumpe sind aus wirtschaftlicher Sicht auch zukünftig nur für Einsatzfelder mit hohem Niedertemperaturwärmebedarf interessant. Allerdings ist selbst in diesen Fällen hinweg noch mit einem erheblichen Kostenabstand zu den aus wirtschaftlicher Sicht führenden Erzeugungstechniken BHKW bzw. Brennwertkessel zu rechnen.

Für die MCFC ergeben sich zwar über alle Anwendungsgebiete hinweg starke Senkungen der Wärmeerzeugungskosten, diese reichen jedoch in keinem Fall aus, um ein konkurrenzfähiges Niveau zu erreichen.

Als weiteres Resultat der Monte Carlo-Simulation kann die Relevanz der einzelnen Einflussfaktoren mit Hilfe der Korrelationswertbestimmung ermittelt werden. Der ausgegebene Prozentwert zeigt in Form eines normierten Betrags die Auswirkungen eines Inputwertebereichs auf einen Outputwertebereich. Ein niedriger Korrelationswert eines Parameters steht dabei für einen geringen Einfluss auf das Ergebnis, ein hoher Wert für einen entsprechend großen Einfluss.

In der Korrelationswertanalyse der Monte Carlo-Simulation ergibt sich für alle Anwendungsfälle und alle untersuchten Erzeugungssysteme jeweils eine Dominanz der möglichen Erdgaspreisentwicklung. Die für die ORC-Anlage zusätzlich errechnete Korrelation mit den Biomassepreisen ist stark von der Temperaturstruktur der versorgten Prozesse abhängig und erreicht hohe Werte v. a. bei Anlagen mit geringem Temperaturbedarf und entsprechend hohem Biomasseverbrauch bzw. entsprechend niedrigerem Erdgaseinsatz.

Bei der Untersuchung der direkten betrieblichen CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugungstechniken hatte sich gezeigt, dass aus heutiger Sicht die MCFC die in allen Anwendungen führende Technik darstellt.

In der Zukunft (vgl. Tabelle 5-29) ist allerdings für die MCFC mit deutlich steigenden Emissionsniveaus zu rechnen, die sich aus den sinkenden Stromgutschriftsätzen ergeben und die sich durch einen höheren elektrischen Wirkungsgrad nicht ausgleichen lassen. Das BHKW kann somit, bei ebenfalls steigenden Emissionswerten, den Abstand verringern und aufgrund seines höheren Gesamtwirkungsgrads in mehreren Fällen sogar mit knappem Vorsprung die Spitze erobern. Insgesamt lässt sich aus den Untersuchungen ableiten, dass die entscheidende Einflussgröße für die Emissionsentwicklung von MCFC und BHKW v. a. im weiteren Verlauf der Stromgutschriftsätze zu suchen ist. Andere mögliche Faktoren, wie etwa die möglichen Wirkungsgradsteigerungen, spielen keine herausragende Rolle, wie sich ebenfalls aus der Korrelationsanalyse der Monte Carlo-Simulation ergibt.

Tabelle 5-29: Medianwerte der betrieblichen CO₂-Emissionen für verschiedene Wärmeerzeugungssysteme und Anwendungsfälle für das Jahr 2030 in kg CO₂/MWh_{thNutz}

Branche	Papierfabrik			Brauerei			Zuckerfabrik	Automobilwerk		
	groß	mittel	klein	groß	mittel	klein	groß	groß	mittel	klein
BHKW	196	181	295	215	218	219	224	115	117	119
MCFC	138	256	380	274	275	278	155	268	246	244
ORC-Anlage	210	193	310	228	230	227	242	135	135	111
Brennwertkessel	241	239	364	246	247	247	247	220	221	220
Wärmepumpe	265	253	395	278	280	281	287	192	194	192

Bei der ORC-Anlage halten sich demnach die Verluste aus reduzierter Stromgutschrift und die möglichen Wirkungsgradgewinne die Waage. Damit ist die ORC-Anlage unter den betrachteten Wärmeerzeugungstechniken diejenige mit dem für das Jahr 2030 größten Einfluss möglicher Wirkungsgradsteigerungen auf die betrieblichen CO₂-Emissionen.

Beim Brennwertkessel ergeben sich aufgrund der eingeschränkten technischen Verbesserungspotenziale nur leichte Veränderungen im Nachkommabereich. Da für diesen Fall aber keine weiteren variierten Parameter angesetzt werden, gehen die eintretenden Emissionsrückgänge ausschließlich auf das Konto möglicher Wirkungsgradverbesserungen.

Die Wärmepumpe kann bei Anwendungen mit hohem Wärmebedarf im NT-Segment von den ökologischen Verbesserungen im Strommix profitieren und die spezifischen Emissionen deutlich reduzieren, in der Automobilmontage bspw. im Bereich von 10 %. Da die wirksamen Verbesserungen der Jahresarbeitszahl gering ausfallen, wird der erreichbare Rückgang durch die Entwicklung im Strommix sowie, in deutlich geringerem Umfang, von der Variation der Anlagendimensionierung bestimmt.

6 Bestimmung der technischen Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in ausgewählten Branchen der Industrie in Deutschland

Mit den gewonnenen Wärmebedarfsdaten aus Abschnitt 4.2 und den Technikkennzahlen aus Kapitel 3 lassen sich die technischen Einsatzpotenziale der jeweiligen Techniken für die betrachteten Branchen abschätzen.

Die betriebsgrößenklassenspezifische Potenzialermittlung erlaubt für die einzelnen Wärmeerzeugungstechniken eine Einschätzung der Größe bzw. Relevanz der jeweiligen Marktsegmente. Außerdem können, technikbezogen, die maximalen CO₂-Emissionsvermeidungsumfänge einzelner Branchen bzw. Branchensegmente bestimmt werden. Weiterhin ermöglicht die Potenzialanalyse die Abschätzung des technikspezifischen Stromerzeugungspotenzials aus KWK-Anlagen in den betrachteten Branchen bzw. Betrieben.

Die Potenzialbestimmung geht von den heutigen Rahmendaten der Produktionsmengen, der Anzahl und Größenverteilung der jeweiligen Betriebe und des technischen Stands der Wärmeerzeugung und -verteilung aus. Da sich die Auswahl auf Branchen mit in der Vergangenheit wenigen Innovationen bei den verwendeten Produktionsprozessen fokussiert, wird auch vom heutigen Prozessschema und den heutigen Prozesskennwerten ausgegangen.

6.1 Ermittlung der technischen Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in Deutschland für Papierfabriken

In Deutschland existieren auf dem Stand von 2006 etwa 1.000 Werke der Papierindustrie (vgl. Tabelle 6-1), die eine kumulierte Jahresproduktion von über 20 Millionen Tonnen erreichen. Zahlenmäßig sind die kleinen und die mittleren Betriebe mit einem Anteil von insgesamt etwa 96 % in der Überzahl. Bei den ermittelten Produktionsmengen dominiert jedoch die vergleichsweise geringe Zahl an Großbetrieben, auf die ein Anteil von ca. 60 % entfällt.

Tabelle 6-1: Größenstruktur der Papierfabriken in Deutschland 2006 /eigene Recherche/, /VdP 2007/

	Einheit	Große Betriebe	Mittelgroße Betriebe	Kleine Betriebe	Summe
Produktionskapazität	[10 ⁶ t/a]	>1	0,2-1	<0,2	-
Betriebe	[-]	44	369	601	1.014
Jahresproduktion	[10 ⁶ t/a]	13,6	6,8	2,3	22,6

Eine weitergehende Größenklassifizierung der Papierfabriken nach der Personalstärke findet sich im Anhang (vgl. Tabelle 9-1).

Mit Hilfe der in Kapitel 4.2.1 vorgegebenen betriebsgrößenspezifischen Wärmebedarfsstrukturen und den daraus hervorgehenden Jahresdauerlinien ergeben sich die unterschiedlichen

technischen Einsatzpotenziale der einzelnen Wärmeerzeugungstechniken (vgl. Abbildung 6-1).

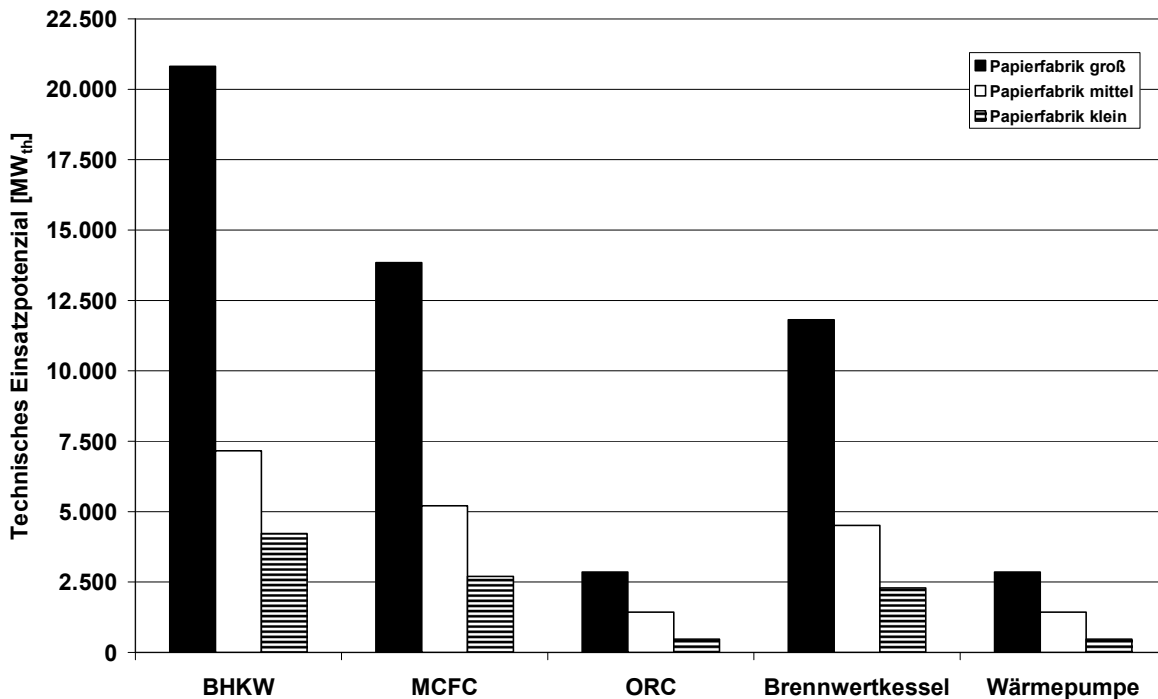


Abbildung 6-1: Technische Einsatzpotenziale der untersuchten Wärmeerzeugungstechniken in den betrachteten Werken der Papierindustrie in Deutschland in Abhängigkeit der Werksgröße

Da es sich bei der Papierherstellung um eine energieintensive Produktion handelt, die zudem in Deutschland ein hohes Herstellungsvolumen aufweist, errechnen sich für die betrachteten Wärmeerzeugungstechniken die höchsten Einsatzpotenzialwerte aller untersuchten Anwendungen. Damit stellt die Papierindustrie bei den untersuchten Anwendungen den größten Markt für die jeweiligen Wärmeerzeugungstechniken dar.

Wegen des hohen Anteils an Hochtemperaturwärme bzw. an Prozessdampf am Wärmebedarf der Papierfabriken und des geringen Hochtemperaturanteils der BHKW-Abwärme ergeben sich mit insgesamt über 32 GW_{th} die höchsten Potenzialwerte für das BHKW. Trotz des höheren elektrischen Wirkungsgrads der MCFC fallen deren Potenzialwerte durchweg geringer als die des BHKW aus, da die Abwärmemengen der MCFC auf einem einheitlichen, zur Dampferzeugung nutzbaren, Temperaturniveau anfallen.

Aufgrund der temperaturseitigen Anforderungen der Papierfabriken an die Wärmeerzeugung weisen die ORC-Anlage und die Wärmepumpe nur geringe Einsatzpotenziale auf. Dabei ist hier der Potenzialanteil der größeren Betriebseinheiten aufgrund deren prozessbedingt höheren Anteilen am Niedertemperaturwärmebedarf noch höher als bei den übrigen betrachteten Techniken, bei denen in erster Linie das Verhältnis der betriebsgrößenabhängigen Einsatzpotenziale von der Branchenstruktur in Deutschland vorgegeben wird.

6.2 Ermittlung der technischen Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in Deutschland für Brauereien

In Deutschland gab es im Jahr 2007 insgesamt etwa 1.300 Brauereien, die eine kumulierte Produktionskapazität von über 100 Millionen hl/a aufweisen (vgl. Tabelle 6-2). Analog zur Papierindustrie dominieren auch im Brauwesen zahlenmäßig die kleinen Betriebe, die einen Anteil von über 90 % ausmachen. Bezüglich der Produktionskapazitäten entfällt jedoch mit einem Wert von über 70 % der überwiegende Anteil auf die Großbetriebe, deren Anzahl lediglich 3 % aller Brauereien in Deutschland entspricht.

Tabelle 6-2: Betriebsstruktur der Brauereien in Deutschland 2007 /Stat. Bundesamt 2008/, /eigene Berechnung/

		Große Betriebe	Mittelgroße Betriebe	Kleine Betriebe	Summe
Bereich	[10 ⁶ hl/a]	>1	0,2-1	<0,2	-
Betriebe	[-]	45	73	1.184	1.302
Jahresproduktionskapazität	[10 ⁶ hl/a]	74,5	17,5	13,9	106,0

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.2.2 aufgeführten Produktionsprozesse ergeben sich die in Tabelle 6-3 in Abhängigkeit der Betriebsgrößenklasse dargestellten technischen Einsatzpotenziale der einzelnen Wärmeerzeugungstechniken.

Wegen des Prozessdampfbedarfs der Bierproduktion und des geringen Hochtemperaturwärmeanteils des BHKW ergeben sich für diese Wärmeerzeugungstechnik mit über 3 GW_{th} die höchsten Einsatzpotenzialwerte.

Aufgrund des insgesamt höheren nutzbaren Abwärmemeterniveaus fallen die Potenzialwerte von MCFC und Brennwärmtessel deutlich geringer aus. Die ORC-Anlage und, trotz bestehenden Kältebedarfs im Produktionsprozess, die Wärmepumpe, weisen, ebenfalls temperaturbedingt, keine großen Einsatzpotenziale auf.

Tabelle 6-3: Technische Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in der Brauindustrie in Deutschland in Abhängigkeit der Betriebsgröße

		Große Betriebe	Mittelgroße Betriebe	Kleine Betriebe	Summe
BHKW	[MW _{th}]	2.071	789	343	3.203
MCFC	[MW _{th}]	1.096	418	191	1.705
ORC-Anlage	[MW _{th}]	76	24	10	110
Brennwärmtessel	[MW _{th}]	895	341	158	1.393
Wärmepumpe	[MW _{th}]	76	24	10	110

Die überwiegenden Potenzialanteile erstrecken sich für alle Erzeugungstechniken auf das Anwendungsgebiet der Großbetriebe.

Da sich der Betrieb von KWK-Anlagen im Brauereiwesen für kleinere Betriebsgrößen weder aus heutiger noch aus künftiger Sicht wirtschaftlich sinnvoll darstellen lässt, dürfte deren Einsatzgebiet auf die Versorgung der Großbetriebe beschränkt sein (vgl. Abschnitt 5.4). Das

trotz der Vielzahl an existierenden Braubetrieben zu erwartende geringe Marktvolumen im Kleinanwenderbereich dürfte die KWK-Anlagenhersteller nicht zu entsprechenden, kostenintensiven Weiterentwicklungen ihrer Produkte in Richtung dieser Zielgruppe animieren können. In diesem Marktsegment dürfte daher der Brennwertkessel das Standardmodul bleiben.

6.3 Ermittlung der technischen Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in Deutschland für Zuckerfabriken

Im Jahr 2005 lag die Zuckerproduktion aller 24 Betriebe in Deutschland bei etwa 4 Millionen Tonnen (vgl. Tabelle 6-4), wofür etwa 26,9 PJ Prozess- und Raumwärme benötigt wurden. Infolge eines langjährigen Konzentrationsprozesses, in dessen Verlauf die kleinen und mittelgroßen Standorte stillgelegt wurden, weisen mittlerweile alle in Deutschland betriebenen Werke dieselbe Größenkategorie auf.

Tabelle 6-4: Größenstruktur der Zuckerfabriken in Deutschland 2005 /eigene Recherche/

		Große Betriebe	Mittelgroße Betriebe	Kleine Betriebe	Summe
Produktionskapazität	[10 ³ t/a]	>70	30-70	<30	
Betriebe	[-]	24	-	-	24
Jahresproduktion	[10 ⁶ t/a]	4,0	-	-	4,0

Für die Zuckerfabriken in Deutschland ergibt sich das höchste Einsatzpotenzial mit 5,1 GW_{th} für BHKW (vgl. Tabelle 6-5). Hauptgrund für die Dominanz ist der geringe Anteil an anfallender Hochtemperaturwärme, welche für die Dampfversorgung benötigt wird. Bei einer Installation des kompletten nutzbaren technischen Potenzials an BHKW ist somit mit einem hohen Aufkommen an KWK-Strom sowie überschüssiger Niedertemperaturwärme zu rechnen.

Tabelle 6-5: Technische Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in Zuckerfabriken in Deutschland /eigene Berechnungen/

		Potenzial
BHKW	[MW _{th}]	5.127
MCFC	[MW _{th}]	2.753
ORC-Anlage	[MW _{th}]	47
Brennwertkessel	[MW _{th}]	2.254
Wärmepumpe	[MW _{th}]	47

Wegen der abgastemperaturbedingt besseren Fähigkeit zur Dampferzeugung fallen die Einsatzpotenziale von MCFC mit 2,7 GW_{th} und Brennwertkessel mit 2,2 GW_{th} deutlich geringer aus.

Für BHKW, MCFC und Brennwertkessel ergeben sich, bezogen auf die in der Zuckerfabrik benötigte Nutzwärmemenge, jeweils hohe Werte für das technische Einsatzpotenzial. Eine

wesentliche Ursache liegt in der geringen Anzahl an Volllaststunden, die für den kampagnenweisen Betrieb der Zuckerfabriken typisch sind.

Die ORC-Anlage und die Wärmepumpe weisen ein für die Dampfproduktion zu geringes Temperaturniveau auf und besitzen daher nur marginale technische Einsatzpotenziale für die Anwendung in Zuckerfabriken in Deutschland.

6.4 Ermittlung der technischen Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in Deutschland für Automobilmontagewerke

In Deutschland werden zurzeit insgesamt 29 Automobilmontagewerke mit einer Jahreskapazität von ca. 6,4 Millionen Einheiten betrieben (vgl. Tabelle 6-6). Während sich bezüglich der Anzahl der Werke eine vergleichsweise homogene Verteilung auf die drei Größenkategorien ergibt, dominieren bei der Jahresproduktion die großen Betriebe mit einem Anteil von etwa 75 %.

Tabelle 6-6: Größenstruktur der Automobilmontagewerke in Deutschland /eigene Recherche/

		Große Betriebe	Mittelgroße Betriebe	Kleine Betriebe	Summe
Produktionskapazitätsbereich	[1000 Einh./a]	>200	100-200	<100	-
Betriebe	[-]	13	6	10	29
Produktionskapazität	[1000 Einh./a]	4.920	1.090	395	6.405

Die höchsten Einsatzpotenziale in den Automobilmontagewerken Deutschlands ergeben sich für MCFC und BHKW von jeweils 3,0 GW_{th} in der Summe über die verschiedenen Betriebsgrößen (vgl. Abbildung 6-2).

Automobilmontagewerke weisen einen besonders hohen Anteil an Niedertemperaturwärme am ihrem gesamten Wärmebedarf auf, wovon die ORC-Anlage und die Wärmepumpe profitieren, die mit jeweils 0,9 GW_{th} im Vergleich zu den übrigen betrachteten Branchen hohe Potenzialanteile erzielen.

Da die zu versorgenden Prozesse temperatur- und wärmemengenseitig von der Betriebsgröße unabhängig sind, spiegeln die jeweiligen Potenzialanteile der einzelnen Betriebsgrößen vor allem die Branchenstruktur der Automobilmontagewerke in Deutschland wider.

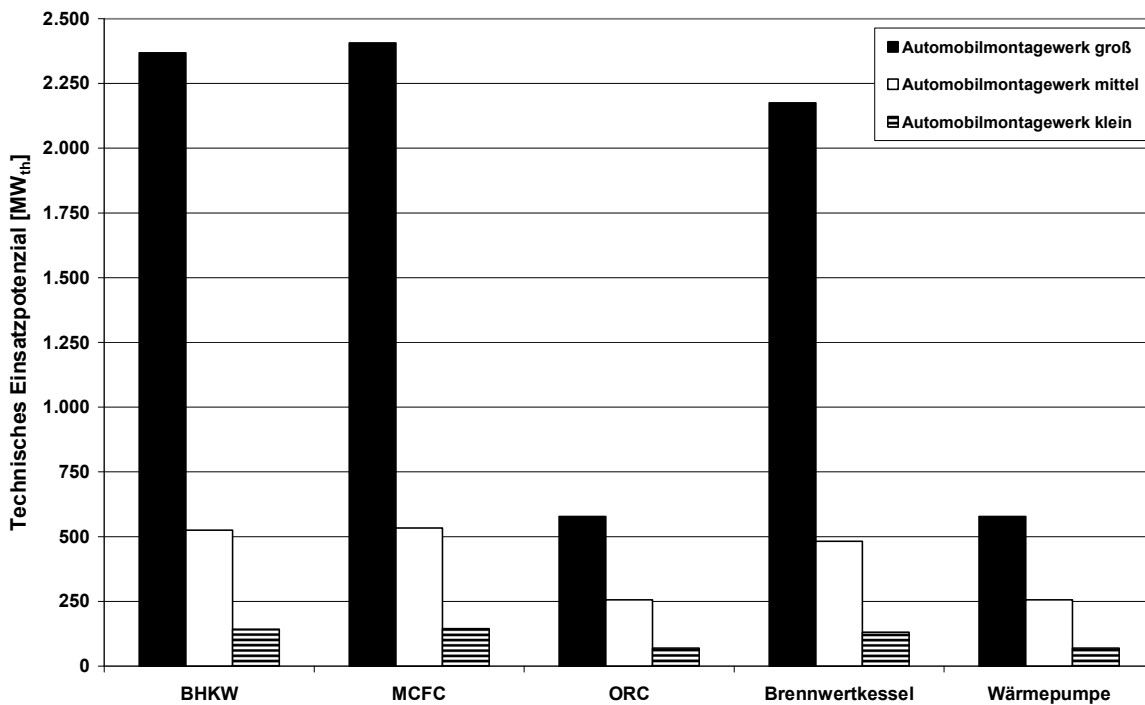


Abbildung 6-2: Technische Einsatzpotenziale der untersuchten Wärmeerzeugungstechniken in den betrachteten Montagewerken der deutschen Automobilindustrie in Abhängigkeit der Werksgröße

6.5 Zusammenfassung der Ermittlung der technischen Einsatzpotenziale für die betrachteten Branchen

Über alle betrachteten Branchen und Betriebe ergibt sich das höchste technische Einsatzpotenzial aller untersuchter Wärmeerzeugungstechniken mit 44 GW_{th} für das BHKW (vgl. Tabelle 6-7).

Tabelle 6-7: Technische Einsatzpotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in den Betrieben der Papierfabriken, Brauereien, Zuckerfabriken und Automobilmontagewerke in Deutschland in Abhängigkeit der Betriebsgrößenklasse

		Große Betriebe	Mittelgroße Betriebe	Kleine Betriebe	Summe
BHKW	[GW _{th}]	30,4	8,5	4,7	43,6
MCFC	[GW _{th}]	20,1	6,2	3,0	29,2
ORC-Anlage	[GW _{th}]	3,6	1,7	0,6	5,8
Brennwertkessel	[GW _{th}]	17,1	5,3	2,6	25,0
Wärmepumpe	[GW _{th}]	3,6	1,7	0,6	5,8

Mit dieser Leistung kann der Gesamtwärmebedarf der untersuchten Betriebe vollständig gedeckt werden. Der Grund für den im Vergleich zu den anderen Techniken deutlich höheren Wert ist der hohe Anteil an für die Prozessdampferzeugung nicht nutzbarer Niedertemperaturwärme, v. a. aus dem Kühlwasser- bzw. dem Schmierölkreislauf, der ca. 50 % der thermischen Leistung beträgt, für deren Einsatz sich in der Regel in den Betrieben auch kein ent-

sprechend hoher NT-Wärmebedarf findet. Aus diesem Grund müssen BHKW-Anlagen, insbesondere bei angeschlossener Dampferzeugung, größer dimensioniert werden. Dagegen fällt bspw. die Abwärme der MCFC auf einem einheitlichen, hohen Temperaturniveau an (ca. 400 °C). In diesem Fall kann die gesamte anfallende Wärmemenge zur Dampferzeugung genutzt werden.

Die ORC-Anlage und die Wärmepumpe weisen aufgrund ihrer temperaturbedingt beschränkten Verwendbarkeit für die Prozesswärmeversorgung nur geringe Einsatzpotenziale auf.

Während die Höhe der jeweiligen Einsatzpotenziale der Wärmeerzeugungstechniken in den einzelnen Branchen v. a. von den Temperaturverhältnissen der Wärmebereitstellung und der Wärmenachfrage abhängig ist, spiegelt sich bei der Verteilung der Potenzialwerte auf die Betriebsgrößenklassen hauptsächlich die jeweilige Branchenstruktur wider. Dabei entfallen auf die Großbetriebe jeweils die höchsten kumulierten Wärmebedarfsanteile, mittlere und kleine Betriebe weisen auch in der Summe einen deutlich kleineren Verbrauch auf. Bei der Leistungsermittlung kann dieser Aspekt durch die geringere Auslastung der Wärmeerzeugungssysteme in den kleineren Betriebsklassen, die dabei ebenfalls eine bedeutende Rolle spielt, nicht aufgewogen werden.

7 Zusammenfassung

Das Ziel der Arbeit stellt die Erstellung und beispielhafte Anwendung eines Berechnungssystems zur Abschätzung künftiger Wärmeerzeugungskosten und betrieblicher CO₂-Emissionen verschiedener Wärmeerzeugungstechniken für die industrielle Wärmenutzung für den Zeithorizont 2030 dar. Bei den betrachteten Wärmeerzeugungstechniken handelt es sich um das Erdgasmotor-BHKW, die MCFC-Brennstoffzelle, die biomassebetriebene ORC-Anlage sowie die Kompressionswärmepumpe und den Erdgasbrennwertkessel, für welche die jeweiligen technischen und investitionskostenseitige Entwicklungspotenziale innerhalb des Betrachtungszeitraums ermittelt werden. Die Untersuchung der Wärmeerzeugungstechniken erfolgt auf Basis einer Einzelkomponenten- bzw. Baugruppenbetrachtung.

Die für die genannten Wärmeerzeugungstechniken untersuchten Anwendungsfälle umfassen Papier- und Zuckerfabriken, Brauereien und Automobilmontagerwerke, jeweils in unterschiedlichen Betriebsgrößen. Die Analyse dieser Anwendungsfälle erfolgt auf Basis der prozessspezifischen Auflösung der jeweiligen Wärmebedarfsstruktur in zeitlicher und temperaturbedarfsseitiger Hinsicht.

Als Zielgrößen werden die jeweiligen Wärmeerzeugungskosten und die betrieblichen CO₂-Emissionen betrachtet. Die Ermittlung der Zielgrößen erfolgt jeweils im Rahmen einer Monte Carlo-Simulation, in der bestehende Unsicherheiten sowohl bezüglich der technikseitigen als auch der exogenen Eingangsgrößen berücksichtigt werden können. Die dabei für die einzelnen Anwendungsgebiete erhaltenen Ergebnisse ermöglichen v. a. die Bewertung von Marktchancen und Umweltwirkungen der einzelnen Wärmeerzeugungstechniken sowie die Identifikation anwendungs- und betriebsgrößenspezifischer Relevanzwerte der jeweils betrachteten Einflussfaktoren.

Im ersten Abschnitt erfolgt zunächst die komponentenbezogene Ermittlung der technischen und wirtschaftlichen Entwicklungspotenziale der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken in für den industriellen Einsatz typischen Leistungsgrößenbereichen. Die Betrachtung auf Komponentenebene erlaubt, u. a. durch die Berücksichtigung von Änderungen im Funktionsumfang und der Funktionsverteilung der Wärmeerzeugungssysteme, die genauere Abschätzung deren technischer und investitionskostenseitiger Entwicklungen. Im Rahmen der Untersuchung werden so u. a. auch detaillierte Datengrundlagen auf Einzelteil- bzw. Baugruppenebene geschaffen und komponentenweise Lernkurven ermittelt, auf deren Basis die jeweiligen technischen und wirtschaftlichen Entwicklungspotenziale bestimmt werden. Dabei wird auch berücksichtigt, inwieweit innovative neuartige Komponenten bzw. bereits in anderen Techniken etablierte Bauteile zum Einsatz kommen.

Die Technikuntersuchung liefert für ein BHKW mit einer Referenzleistungsgröße von 180 kW_{el} eine mögliche Steigerung beim elektrischen Wirkungsgrad von derzeit 35,0 auf 36,6 %, wobei die spezifischen Investitionskosten von heute 727 bis auf 560 €/kW_{el} sinken

können. Die wirtschaftliche Weiterentwicklung bezieht ihre Potenziale in erster Linie aus der Nutzung von Lerneffekten. Hintergrund ist der hohe Anteil von Standardkomponenten an den einzelnen Baugruppen des BHKW, die nur noch wenig Raum für technische Vereinfachungen lassen.

Bei der MCFC mit $250 \text{ kW}_{\text{el}}$ ist ein maximaler Zuwachs des elektrischen Wirkungsgrads von heute 47 auf 51,5 % zu erwarten. Insbesondere durch die vollständige Umstellung der Anlagenproduktion auf industrielle Abläufe und Verfahren können die spezifischen Investitionskosten von heute noch über 6.000 bis auf günstigstenfalls $797 \text{ €/kW}_{\text{el}}$ sinken.

Die ORC-Anlage (Organic Rankine Cycle) mit einer Leistung von 1 MW_{el} kann bei Einsatz von Biomasse für die Referenzgröße ihren heutigen elektrischen Wirkungsgrad von 15 % bis auf maximal 20,2 % steigern. Die entsprechenden spezifischen Investitionskosten, die heute noch $1.337 \text{ €/kW}_{\text{el}}$ (ohne Gebäude) betragen, können sich nur geringfügig um bis zu 3 % auf $1.298 \text{ €/kW}_{\text{el}}$ reduzieren.

Der Erdgasbrennwertkessel reicht bereits heute mit einem maximalen Wirkungsgrad von 109 % sehr nahe an das theoretische Maximum von 111 % heran. Für den Betrachtungszeitraum kann daher nur noch von einer maximalen Steigerung um einen Prozentpunkt ausgegangen werden. Dementsprechend gering fallen auch die wirtschaftlichen Verbesserungspotenziale aus, bei denen die spezifischen Investitionskosten bei einer Referenzgröße von $115 \text{ kW}_{\text{th}}$ von heute 84 auf $80 \text{ €/kW}_{\text{th}}$ sinken können.

Für die Wärmepumpen kann anhand der identifizierten Verbesserungsmöglichkeiten bezüglich der Jahresarbeitszahl ein Steigerungspotenzial von heute 4,0 bis auf 4,3 abgeschätzt werden. Die spezifischen Investitionskosten können von heute 152 auf bestenfalls $135 \text{ €/kW}_{\text{th}}$ (Referenzgröße: $143 \text{ kW}_{\text{th}}$) zurückgehen.

Neben dem technikseitigen Wärmeangebot wurde, als zweites Untersuchungsziel, auch die industrielle Wärmenachfrage analysiert. Dabei wurde die Wärmebedarfsstruktur der Industrie in Deutschland auf Basis der Einzelprozesse erstellt, bei dem neben der Ermittlung des jeweiligen Wärmemengenbedarfs insbesondere auch die für den Einsatz einer Wärmeerzeugungstechnik relevanten Einflussgrößen des erforderlichen Temperaturniveaus und des verwendeten Wärmeübertragungssystems ermittelt wurden. Der Vorteil der prozessspezifischen Betrachtung liegt in der Möglichkeit, den Einfluss der Temperaturverhältnisse und der eingesetzten Wärmeübertragungssysteme quantifizieren und detailliert bei der weiteren wirtschaftlichen und ökologischen Analyse von Einsatzfällen nutzen zu können. Zudem erlaubt die Methode Rückschlüsse über den Einfluss der anwendungsbezogenen Parameter auf die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeits- und Emissionsbetrachtung.

Auf diese Weise konnte der industrielle Wärmebedarf in Deutschland, der sich im Bereich von $450\text{-}500 \text{ TWh}_{\text{th}}/\text{a}$ bewegt, einzelnen Branchen, Betriebsgruppen und Prozessen zugeordnet werden. Dabei ergibt sich der überwiegende Anteil des Wärmebedarfs infolge der hohen Temperaturbereiche und der damit gefertigten Massengüter (bspw. Stahl, Aluminium, Glas) für den Hochtemperaturbereich. Auf das für den KWK-Einsatz besonders interessante Seg-

ment mit Prozesstemperaturen von bis zu 300 °C entfällt demnach ein Wärmebedarf von 87 TWh_{th}/a bzw. etwa 18 % des industriellen Gesamtwärmeverbrauchs in Deutschland.

Die ermittelten technik- und bedarfsseitigen Rahmendaten werden anschließend für konkrete Anwendungen unter Berücksichtigung bestehender endogener und exogener Unsicherheiten bezüglich der Wirtschaftlichkeit und der Umweltwirkung mit dem Ziel der Bewertung der einzelnen Wärmeerzeugungssysteme im Rahmen einer Monte Carlo-Simulation untersucht. Dabei werden zunächst die heute gültigen Werte der Zielgrößen Wärmeerzeugungskosten und betriebliche CO₂-Emissionen bestimmt. In der Monte Carlo-Simulation werden mit Hilfe der in der Technikanalyse bestimmten Wertebereiche für Investitionskosten und Wirkungsgrade der einzelnen Wärmeerzeugungstechniken die Zielgrößenwerte für das Bezugsjahr 2030 ermittelt.

Bei den behandelten Anwendungsbeispielen aus der Industrie in Deutschland handelt es sich um Betriebe der Papierproduktion, Brauereien, Automobilmontagewerke sowie eine Zuckerfabrik. Mit Ausnahme der Zuckerproduktion, für die alle in Deutschland betriebenen Anlagen dieselbe Größenordnung aufweisen, werden die betrachteten Produktionsstätten jeweils in den Größenklassen groß, mittelgroß und klein analysiert, wobei bereits bei der Wärmebedarfsermittlung werksgroßenrelevante Einflussfaktoren, wie etwa das eingesetzte Prozessschema oder die Anlagenbetriebszeiten, berücksichtigt werden. Bei der Anlagendimensionierung werden die einzelnen Wärmeerzeugungstechniken, mit Ausnahme des Brennwertkessels, mit einem mit Erdgas betriebenen Spitzenkessel zu einem Wärmeversorgungssystem gekoppelt. Die unsicherheitsbehafteten exogenen Parameter, wie etwa die zugrunde gelegten Wertebereiche der Energiepreise, werden ebenfalls, wo erforderlich, an die jeweilige Betriebsgröße angepasst.

Im Ergebnis zeigt sich, dass aus heutiger Sicht die Wirtschaftlichkeit der industriellen Wärmeerzeugung vor allem von der benötigten Wärmemenge und damit auch wesentlich von der Betriebsgröße abhängt. So stellt unter den heutigen Marktbedingungen das BHKW für Wärmegroßverbraucher die günstigste Erzeugungstechnik dar, wohingegen der Brennwertkessel für die kleineren betrachteten Verbraucher am günstigsten abschneidet. So betragen bspw. bei der großen Papierfabrik mit einem Jahresbedarf von 1,3 TWh_{thNutz} die Wärmeerzeugungskosten des BHKW 26 €/MWh_{thNutz}, wohingegen in dieser Anwendung die Variante Brennwertkessel mit 33 €/MWh_{thNutz} zu Buche steht - eine Preisdifferenz von 27 %. Dagegen betragen im Fall der kleinen Brauerei mit einem jährlichen Bedarf von 1,4 GWh_{thNutz} die entsprechenden Werte 130 €/MWh_{thNutz} für den Brennwertkessel gegenüber 203 €/MWh_{thNutz} für das BHKW. Hintergrund für die Dominanz des BHKW bei sehr hohem Wärmebedarf sind zum einen die günstigeren Primärenergiepreise für große Abnehmer, zum anderen die in Folge des hohen thermischen Leistungsbedarfs geringeren spezifischen Investitionskosten sowie die mögliche höhere zeitliche Auslastung der Anlagen in Folge von Mehrschicht- und Wochenendbetrieb. Die Versorgungssysteme ORC-Anlage und Wärmepumpe folgen im Kostenranking der jeweils günstigsten Alternative in allen Anwendungen mit deutlichem Abstand

(>20 %). Die bislang nicht in Serienproduktion am Markt verfügbare MCFC stellt mit ihren entsprechend hohen Investitionskosten anwendungs- und betriebsgrößenunabhängig das Schlusslicht im Kostenranking dar, wobei der Rückstand bei den untersuchten kleinen Leistungsgrößen (im Bereich um 800 kW_{el}) besonders deutlich ausfällt, wo sich neben den Investitionskosten ebenfalls die aus betrieblichen Gründen geringeren möglichen Auslastungszeiten bemerkbar machen.

In der ökologischen Analyse stellt, u. a. als eine Folge des hohen heutigen CO₂-Gutschriftsatzes, von den betrachteten Wärmeerzeugungstechniken die MCFC in allen untersuchten Anwendungen die Alternative mit den geringsten betrieblichen CO₂-Emissionen dar. So erreicht dieser Brennstoffzellentyp beispielsweise im Fall der großen Papierfabrik mit einem Wert von -77 kg CO₂/MWh_{thNutz} sogar den negativen Bereich. Die höchsten Emissionswerte weisen dagegen die Alternativen Brennwertkessel und Wärmepumpe auf, im Falle der großen Papierfabrik 241 kg CO₂/MWh_{thNutz} (Brennwertkessel) bzw. 274 kg CO₂/MWh_{thNutz} (Wärmepumpe).

Bei der Analyse der entsprechenden Zielgrößen für die betrachteten Betriebe für das Jahr 2030, die mit Hilfe der Monte Carlo-Simulation durchgeführt wird, zeigen sich für die zu erwartenden Rahmenbedingungen bei allen Anwendungen und für alle untersuchten Wärmeerzeugungssysteme, mit Ausnahme der MCFC, steigende Wärmeerzeugungskosten. Somit können die zuvor identifizierten technischen Verbesserungen und Reduktionsmöglichkeiten bei den Investitionskosten der meisten Erzeugungstechniken sowie höhere Stromvergütungssätze die kostensteigernden Einflüsse höherer Primärenergiepreise und höherer CO₂-Zertifikatspreise voraussichtlich nicht vollständig ausgleichen.

In der wirtschaftlichen Betrachtung kommt es somit zwar für alle Anwendungen zu Verschiebungen bei den absoluten Kosten der Wärmeerzeugung, im Ranking der Techniken ergeben sich allerdings nur geringe Änderungen. Dies bedeutet insbesondere, dass das BHKW seine Stellung als günstigste der betrachteten Wärmeerzeugungstechniken für Wärmegroßverbraucher ebenso behalten wird, wie die Brennwertkesseltechnik für kleinere industrielle Anwendungen führend bleiben wird. Für das Beispiel der großen Papierfabrik behält somit das BHKW seine Kostenführerschaft trotz eines zu erwartenden Anstiegs auf 34 €/MWh_{thNutz} (+31 %), im Fall der kleinen Brauerei bleibt der Brennwertkessel mit 131 €/MWh_{thNutz} bei geringfügig steigenden Kosten die günstigste Art der Wärmeversorgung. Die MCFC kann zwar, als einziges der untersuchten Systeme, im Falle der implizierten Verfügbarkeit in Großserie, in allen Anwendungsfällen der Untersuchung trotz steigender Primärenergieaufwendungen mit stark sinkenden Wärmeerzeugungskosten von jeweils ca. 70 % rechnen. Diese Reduktionen reichen angesichts der für das Jahr 2030 zu erwartenden Marktrahmendaten allerdings bei weitem nicht aus, um für die analysierten Anwendungsfälle eine wirtschaftlich konkurrenzfähige Alternative der Wärmeversorgung darzustellen. So werden bspw. selbst im Fall sehr großer Wärmenachfrager Werte oberhalb 50 €/MWh_{thNutz} erreicht, womit die Kosten über 50 % über der günstigsten Alternative (BHKW) liegen. Neben den 2030 voraussichtlich

immer noch zu hohen Investitionskosten trägt, in deren Folge, auch das zugrunde gelegte Zinsniveau zu dem ökonomischen Rückstand bei, den auch höhere absolute Stromvergütungen aufgrund der hohen Stromkennzahl dieser Technik nicht mehr nachhaltig mildern können.

Bei den ORC-Anlagen und den Wärmepumpen kommt es, insbesondere bei Anwendungen mit hohen Niedertemperaturwärmebedarfsanteilen, zu kostenseitigen Annäherungen an die jeweils wirtschaftlich führende Alternative. Allerdings ist dieser Effekt bei der ORC-Anlage nur für Einsatzfälle mit hohem Leistungsbedarf von Relevanz. Bei kleinen Leistungsgrößen unter 5 MW_{el} sind die mit kostenbehafteter Biomasse betriebenen ORC-Systeme, v. a. wegen der hohen Investitionskosten, für die untersuchten Anwendungen auch in Zukunft kaum wirtschaftlich konkurrenzfähig zu betreiben.

Generell zeigt sich in der Korrelationsanalyse der Monte Carlo-Simulation bei allen Wärmeerzeugungstechniken ein hoher Einfluss der Primärenergiepreise auf das künftige Kostenniveau, wohingegen die weniger stark steigenden Stromvergütungen geringere Auswirkungen haben und somit weniger stark zur Kostendämpfung beitragen können. Ebenso auffällig sind in allen Fällen die geringen Auswirkungen der zugrunde gelegten CO₂-Zertifikatspreise sowie des möglichen technischen Fortschritts bezüglich der Verbesserungen der Wirkungsgrade der einzelnen Wärmeerzeugungstechniken.

Bei der Emissionsbetrachtung für 2030 verliert die MCFC für die untersuchten Fälle ihre heutige führende Position teilweise an das BHKW (bspw. im Bereich der Brauereien) und, insbesondere bei den Anwendungen mit hohem Niedertemperaturwärmebedarf, an die ORC-Anlage (v. a. in der Automobilproduktion). Hintergrund ist v. a. die bis 2030 voraussichtlich stark sinkende CO₂-Gutschrift für die Stromerzeugung der KWK-Techniken, welche durch technische Verbesserungen in der Anlageneffizienz nicht auszugleichen sein werden. Die Wärmepumpe kann von den künftigen Veränderungen im deutschen Strommix ebenfalls mit sinkenden CO₂-Emissionen profitieren, allerdings aufgrund ihres geringen erreichbaren Temperaturniveaus und des damit einhergehenden niedrigen Anteils an der Gesamtwärmeproduktion nur in entsprechend beschränktem Umfang. Beim Brennwertkessel als nichtstromerzeugende Technik tritt mit den – ohnehin geringen - möglichen Wirkungsgradzuwächsen nur ein einzelner variabler Parameter auf. Somit bleiben die emissionsseitigen Verbesserungen des Brennwertkessels, die sich ohnehin im Wesentlichen auf den Niedertemperaturbereich fokussieren, auf den Nachkommabereich beschränkt.

Die betrieblichen CO₂-Emissionen der KWK-Techniken BHKW und MCFC hängen in starkem Maße von der Höhe der Stromgutschrift ab. Bei einem zu erwartenden Rückgang der spezifischen CO₂-Emissionen des deutschen Strommixes und der damit einhergehenden Verminderung der Höhe des Stromgutschriftsatzes sind – trotz der identifizierten möglichen technischen Fortschritte – teilweise deutliche Steigerungen der spezifischen CO₂-Emissionen der mit fossiler Primärenergie betriebenen KWK-basierten Wärmeerzeugungssysteme zu erwarten. So steigen bspw. für das BHKW im Fall der großen Papierfabrik die spezifischen

Emissionen in einer Größenordnung von mehr als 100 kg CO₂/MWh_{thNutz}. Unter diesen Umständen kann sich die Überprüfung und ggf. Neubewertung von KWK-Fördermaßnahmen empfehlen.

Die Analyse der technischen Einsatzpotenziale der einzelnen Techniken in den betrachteten Anwendungsfeldern ergibt die höchsten Werte für die Papierindustrie, wo maximal 32 GW_{th} installiert werden können. Dagegen stellen die Brauereien mit einem maximal möglichen Leistungswert von 3 GW_{th} das kleinste Anwendungsfeld dar. Infolge der jeweiligen Branchenstrukturen entfällt der Großteil der technischen Einsatzpotenziale auf die Großbetriebe, bspw. für das BHKW 70 % des ermittelten Gesamtpotenzials. In der technikspezifischen Betrachtung weist das BHKW mit 43 GW_{th} das höchste technische Einsatzpotenzial auf. Den entscheidenden Faktor für den hohen Potenzialwert stellt dabei der zur Dampferzeugung in der Praxis tatsächlich nutzbare Anteil der Hochtemperaturabwärme dar, der mit 45 % der gesamten thermischen Leistung insbesondere gegenüber der MCFC und dem Brennwertkessel gering ausfällt und eine entsprechend größere Anlagendimensionierung zur Folge hat. Es zeigt sich insbesondere für das BHKW, dass für die aus wirtschaftlichen Gründen angebrachte Fokussierung auf größere Bedarfseinheiten tatsächlich entsprechende Marktsegmente vorhanden sind. Vorteilhaft wäre allerdings eine verbesserte Nutzung der anfallenden NT-Wärmemengen, die derzeit in vielen Fällen nur zur – saisonal beschränkten – Versorgung mit Raumwärme sowie in geringerem Umfang auch zur Warmwasserbereitung eingesetzt werden können. Einen wesentlichen Beitrag hierzu könnte die Verwendung netzbasierter und mobiler Wärmeverteilsysteme leisten.

Den bislang gewonnenen Ergebnissen können durch methodische Weiterentwicklungen weitere Erkenntnisse hinzugefügt werden. So kann der bislang auf die Ermittlung der betrieblichen CO₂-Emissionen beschränkte Untersuchungsbereich der ökologischen Fragestellungen zu einer Life Cycle Analysis (LCA) ausgebaut werden. Hierzu sind neben den betrieblichen Emissionen auch die Umweltwirkungen aus dem Bau, der Instandhaltung und dem Abbau der Anlagen zu berücksichtigen. Zusätzlich könnten auch die Brennstoffvorketten Gegenstand entsprechender Untersuchungen sein. Hier bieten sich, speziell im Bereich der Erdgasbereitstellung interessante Fragestellungen an, die bspw. Veränderungen bei den künftigen Fördergebieten, den Transportwegen oder den Transportmitteln (bspw. LNG) sowie die Auswirkungen des technischen Fortschritts bei Förderung und Transport umfassen. Weitere Punkte betreffen die mögliche Einspeisung regenerativer Gase oder von regeneriertem CO₂ (Power-to-Gas) in das Erdgasnetz.

Hierbei handelt es sich überwiegend ebenfalls um mit Unsicherheiten in technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Hinsicht behaftete Aspekte, so dass sich auch hier der Einsatz Monte Carlo-basierter Analysewerkzeuge anbieten kann.

Eine zusätzliche Möglichkeit der Weiterentwicklung der gewonnenen Erkenntnisse bietet die Erstellung von Life Cycle Costing-Modellen (LCC) für Anwendungen der industriellen Wärmeversorgung. Die LCC erlaubt Abschätzungen über sämtliche im Lebenszyklus einer

Technikanwendung anfallenden Kosten und stellt somit ein wichtiges Instrument zur Bewertung von Technikalternativen für industrielle Wärmeversorgungssysteme dar. In Kombination mit den Ergebnissen einer erweiterten ökologischen Bilanzierung wird zudem die Ermittlung von CO₂-Vermeidungskosten für konkrete Anwendungsfälle ermöglicht.

Im Bereich der Wärmebedarfsanalyse ergeben sich mögliche Ergänzungen des Forschungsrahmens aus der weiteren Integration zusätzlicher Technikmodule der Wärmeversorgung, wie etwa die Rücklaufkühlung von Prozessdampf oder der Kopplung mit Systemen zur Wärmespeicherung bzw. zur Abwärmenutzung. Entsprechende Ziele können u. a. die weitere Präzisierung des zukünftigen Wärmebedarfs für industrielle Anwendungen oder die bessere Abschätzbarkeit der daraus resultierenden wirtschaftlichen und ökologischen Konsequenzen darstellen.

8 Literatur

/AGEB 2011/

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (AGEB): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland im Jahr 2008. Studie im Auftrag des BMWi. Frankfurt am Main 2011

/ASUE 2006/

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch ASUE: BHKW Kenndaten 2005. ASUE. Kaiserslautern 2006

/ASUE 2004/

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch ASUE: BHKW Kenndaten 2003. ASUE. Kaiserslautern 2004

/ASUE 2000/

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch ASUE: BHKW Kenndaten 1999. ASUE. Kaiserslautern 2000

/ASUE 1998/

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch ASUE: BHKW Kenndaten 1997. ASUE. Kaiserslautern 1998

/ASUE 1996/

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch ASUE: BHKW Kenndaten 1995. ASUE. Kaiserslautern 1996

/ASUE 1994/

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch ASUE: BHKW Kenndaten 1993. ASUE. Kaiserslautern 1994

/Berger 1999/

Berger, P: Direkt-Brennstoffzelle auf der Basis der MCFC-Technologie. In: VIK-Berichte Nr. 214, pp 43-48. VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwerkswirtschaft e. V. Essen 1999

/Beyeler 2004/

Beyeler, F.: Vortrag beim VSE-Kommunikationsforum am 20. August 2004. Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS. Luzern 2004

/Blesl et al. 2004/

Blesl, M.; Ohl, M.; Fahl, U.: Hochtemperaturbrennstoffzellen und ihre Kostenentwicklung. BWK (2004), 5, S. 67-76

/Blesl et al. 2006/

Blesl, M.; Ohl, M.; Leipnitz, T.: Entwicklungsstand und Entwicklungsbedarf stationärer Brennstoffzellen. Zentrum für Energieforschung Stuttgart. Stuttgart 2006

/Blesl et al. 2011/

Blesl, M.; Bruchof, D.; Fahl, U.; Kober, T.; Kuder, R.; Götz, B.; Voß, A.: Auswirkungen veränderter Laufzeiten für die Kernkraftwerke in Deutschland – Szenarioanalysen bis 2035. IER-Arbeitsbericht Nr. 10. Stuttgart 2011

/Blum 2003/

Blum, L.: Brennstoffzellen – die Zukunft der dezentralen Energieversorgung!?. Skriptum zur Wahlpflichtfachvorlesung Wintersemester 2003/2004. FH Aachen, Abt. Jülich. Jülich 2003

/Borggrefe, Lochner 2009/

Borggrefe, F.; Lochner, S.: Langfristprognosen für Strom- und Erdgaspreise. BWK 61 (2009), Nr. 9, S. 50- 59

/Buderus 2005/

Buderus Ersatzteilkatalog, CD-ROM. Buderus. Wetzlar 2005

/Buderus 2006/

Buderus Ersatzteilkatalog, CD-ROM. Buderus. Wetzlar 2006

/BWPLUS 2008/

Blesl, M.; Kempe, S.; Ohl, M.; Fahl, U.; König, A.; Jenssen, T.; Eltrop, L.: Wärmeatlas Baden-Württemberg - Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen. Forschungsbericht zum BWPLUS-Projekt BWK 25007. IER, Universität Stuttgart. Stuttgart 2008

/Claeson 2000/

Claeson, U.: Using the Experience Curve to Analyze the Cost Development of the Combined Cycle Gas Turbine. In: Wene, C.-O.; Voß, A.; Fried, T.: Experience Curves for Policy Making – The Case of Energy Technologies. Tagungsband IEA International Workshop, Stuttgart, 10.-11.Mai 1999. IER Forschungsbericht Band 67, S. 101-112. IER, Universität Stuttgart. Stuttgart 2000

/Crystal Ball 2008/

Crystal Ball: Oracle Crystal Ball

<http://www.oracle.com/us/products/middleware/bus-int/crystalball/acquisition-066567.html>

/Engler et al. 2005/

Engler, A.; Bard, J.; Viotto, M.: Wechselrichter für die Netzkopplung von Brennstoffzellen. In: VDI-Berichte Nr. 1874, Brennstoffzelle, S.189-197. VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf 2005

/Ehrlenspiel et al. 2000/

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Dritte, bearbeitete Auflage. Springer-Verlag. Heidelberg Berlin New York 2000

/Eikmeier et al. 2006/

Eikmeier, B.; Gabriel, J.; Krewitt, W.; Nast, M.; Schulz, W.: Analyse des nationalen Potenzials für den Einsatz hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplung. 1. Auflage. Energie&Management. Herrsching 2006

/Energytech 2002/

Energytech: Technologie Portrait Kraft-Wärme-Kopplung

[http://energytech.at/\(de\)/kwk/portrait_kapitel-2_7.html](http://energytech.at/(de)/kwk/portrait_kapitel-2_7.html)

/EUROSTAT 2010/

EUROSTAT: Gaspreise nach Art des Benutzers

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/refreshTableAction.do;jsessionid=9ea7974b30e7a2aab14d07f74cdd85a6a6ed994c8c03.e34SbxiOchiKc40LbNmLahiKb3eMe0?tab=table&plugin=1&pcode=tsier050&language=de>

EUROSTAT. Luxemburg 2010

/EWU 1992/

EWU Engineering GmbH: Kennziffernkatalog Investitionskosten Bereich Wärmeversorgung. EWU. Berlin 1992

/EWU 1994/

EWU Engineering GmbH: Kennziffernkatalog Investitionskosten Bereich Wärmeversorgung. EWU. Berlin 1994

/EWU 1999/

EWU Engineering GmbH: Kennziffernkatalog Investitionskosten Bereich Wärmeversorgung. EWU. Berlin 1999

/Gerboni et al. 2005/

Gerboni, R.; Pehnt, M.; Viebahn, P.: Technology Specification: Fuel Cells. In: NEEDS – New Energy Externalities Developments for Sustainability, RS1a Life Cycle Approaches to Assess Emerging Energy Technologies, WP 9 Fuel Cells. Draft Working Paper. Politecnico di Torino (POLITO). Turin 2005

/Grob, Mrzyk 1997/.

Grob, H. L.; Mrzyk, A. P.: Risiko-Chancen-Analyse in der Investitionsrechnung – Integration von VOFI und Crystal Ball. Institut für Wirtschaftsinformatik der Westfälische Wilhelms-Universität Münster. Münster 1997

/Haug et al. 1998/

Haug, J.; Gebhardt, B.; Weber, C.; van Wees, M.; Fahl, U.; Adnot, J.; Cauret, L.; Pierru, A.; Lantz, F.; Bode, J.-W.; Vis, J.; van Wijk, A.; Staniaszek, D.; Zavody, Z. : Evaluation and Comparison of Utility's and Governmental DSM-Programmes for the Promotion of Condensing Boilers. EU-SAVE. IER Forschungsbericht, Band 52, IER, Universität Stuttgart. Stuttgart 1998

/Helfrich, Schubert 1973/

Helfrich, F.; Schubert, W.: Ermittlung von Investitionskosten, Einfluss auf die Wirtschaftlichkeitsrechnung. Chemie-Ingenieur-Technik 45 (1973), Nr. 13, S. 891-897.

/Huppmann 1985/

Huppmann, G.: Abwärmenutzung in der Industrie unter Verwendung des organischen Rankine Kreisprozesses (ORC). Forschungsbericht. Bundesministerium für Forschung und Technologie, Unterreihe Technologische Forschung und Entwicklung. Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik. Eggenstein-Leopoldshafen 1985

/IGW 2009/

IGW: Wasserkraftpotenziale im Märkischen Kreis, Schriftenreihe Energieland NRW.
/www.igw-nrw.de/media/archive1/pdf_datein/documente/reglungen_nrw/wasserkraft-
potenziale_mk.pdf 2009-02-25

/IUTA 2006/

IUTA e. V.: Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung, Teil II: Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung. IUTA. Frankfurt am Main 2006

/Jablonski 1999/

Jablonski, R.: Wirtschaftlichkeit. In: VIK-Berichte Nr. 214, S. 83-86. VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwerkswirtschaft e. V. Essen 1999

/Lambauer et al. 2008/

Lambauer, J.; Fahl, U.; Ohl, M.; Blesl, M.; Voß, A.: Industrielle Großwärmepumpen – Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice-Beispiele. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart. Stuttgart 2008

/Ochsner 2006/

www.ochsner.de

/Maier 2002/

Maier, Jens: Biomassebefeuerte Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen – energiewirtschaftliche Analyse und Optimierungsansätze am Beispiel einer Projektierung im Raum Stuttgart. Diplomarbeit, angefertigt am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (IER), Band 371. Stuttgart 2002

/Martinus et al. 2005/

Martinus, G.; Blesl, M.; Smekens K.; Lako, P.; Ohl, M.: Technical and economic characterization of selected energy technologies – Contributions to the EU SAPIENTIA project, ECN-C-05-056, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart und ECN Energy Research Centre of the Netherlands. Petten 2005

/Mueller 2010/

Mueller, C.: Branchenbericht 2009 der Zuckerindustrie. NGG. Hamburg 2010

/Obernberger, Gaia 2008/

Obernberger, I.; Gaia, M.: Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis des ORC-Prozesses – Stand der Technik und Prozessoptimierung. Working Paper. Graz 2008

/Ohl 2002/

Ohl, M.: Technische und ökonomische Analyse von Schmelzkarbonatbrennstoffzellen. Diplomarbeit, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (IER), Universität Stuttgart. Stuttgart 2002

/Ohl et al. 2007/

Ohl, M.; Blesl, M.; Fahl, U.: Mobile Wärme. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart. Stuttgart 2007

/Ohl et al. 2008/

Ohl, M.; Blesl, M.; Fahl, U.: Mobile Wärme auf Basis PCM. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart. Stuttgart 2008

/Pröger, Blank 1996/

Pröger, R.; Blank, D.: Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen: Planungsgrundlagen im industriellen und im öffentlichen Bereich. Gas Wasser Abwasser, 76 (1996), Nr. 3, S. 181-189.

/Recknagel 2005/

Recknagel., H.: Taschenbuch für Heizung und Lüftung. Oldenbourg. München 1995

/Remus et al. 2003/

Remus, C.; Ziolk, A.; Tippkötter, R.; Mohr, M.; Unger, H.: Erarbeitung von Konzepten zur Energieeinsparung sowie zur Optimierung der Energieversorgung in kleinen Unternehmen. Fachbericht LUA NRW 1/2003. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen. Essen 2003

/Richter 2003/

Richter, L.: Mehrstufige Absorptionskälteanlagen in Energieverbundanlagen. KI Luft- und Kältetechnik 2003, Nr. 3, S. 131-135. Hüthig Fachverlag. Heidelberg 2003

/Rolf 2001/

Rolf, S.: Betriebserfahrungen mit dem Hot Module. In: VDI-GET: Stationäre Brennstoffzellenanlagen, Tagung Heilbronn 3./4. April 2001, S. 49-52. VDI-Berichte 1596. VDI-Verlag. Düsseldorf 2001

/Ruhrgas 2003/

Ruhrgas AG: Erdgaswirtschaft 2003. Ruhrgas. Essen 2003

/Rumpel 1996/

Rumpel, M.: Stand der Blockheizkraftwerkstechnik 1994 in Deutschland – Ergebnisse der VDEW-Erhebung. Elektrizitätswirtschaft 1996, Nr. 3, S. 99-107

/Rumpel 1997/

Rumpel, M.: Stand der Blockheizkraftwerkstechnik 1996 in Deutschland – Ergebnisse der VDEW-Marktuntersuchung. Elektrizitätswirtschaft 1997, Nr. 12, S. 1502-1508

/Sander 2001/

Sander, K.: Kostenentwicklung stationärer Brennstoffzellensysteme. BWK, 53 (2001), Nr. 11, S. 42-49

/Schmitt Enertec 2009a/

Schmitt Enertec: BHKW Komponenten
www.schmitt-enertec.de/deutsch/bhkw/bhkw_technik.htm 2009

/Schmitt Enertec 2009b/

Schmitt Enertec: BHKW Umweltaspekte
www.schmitt-enertec.de/deutsch/bhkw/bhkw_umweltaspekte.htm 2009

/Stat. Bundesamt 2008/

Statistisches Bundesamt: Finanzen und Steuern – Brauwirtschaft 2007. Fachserie 14 Reihe 9.2.2. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden 2008

/Stauber 2003/

Stauber, R.: Werkstoffe im Automobilbau. Vorlesung an der TU Braunschweig, Wintersemester 2003/2004. Universität Braunschweig. Braunschweig 2003

/Tzscheutschler et al. 2007/

Tzscheutschler, P.; Nickel, M.; Wernicke, I.: Energieverbrauch in Deutschland. BWK 59 (2007), Nr. 5, S. 6-13

/UBA 2011/

Umweltbundesamt (UBA): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2009 und erste Schätzung 2010 im Vergleich zum Stromverbrauch. UBA. Berlin 2011

www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf

/Unverzagt 1995/

Unverzagt, G.: Energetische und wirtschaftliche Optimierung von Festoxid-Brennstoffzellen-Kraftwerken. Berichte des Forschungszentrums Jülich 3159. Institut für Energieverfahrenstechnik. Jülich 1995

/Vattenfall 2009/

Vattenfall Deutschland: Klimaschutz mit effektiverer Brennwertechnik. Vattenfall 2009

/VDEW 2005/

VDEW-Projektgruppe „Nutzenergiebilanzen“: Endenergieverbrauch in Deutschland 2003. VDEW Materialien M-16/2004. VDEW. Berlin 2005

/VDI 2067-6 2000/

VDI: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. VDI-Richtlinie 2067, Blatt 6. VDI. Düsseldorf 2000

/VdP 2007/

Verband der deutschen Papierfabriken VdP: Kennzahlen deutscher Zellstoff- und Papierfabriken. Bonn 2007

/Viessmann 2002/

Viessmann: Fachreihe Brennwertechnik. Viessmann. Allendorf 2002

/VIK 1999/

VIK: Brennstoffzellen. VIK-Berichte Nr. 214. VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwerkswirtschaft e. V. Essen 1999

/Weißmann, Reinhardt 2004/

Weißmann, T.; Reinhardt, D.: Zukunftstechnologie – Brennstoffzelle versorgt Krankenhaus mit Energie. Pfalzwerke 2004

[www.pfalzwerke.de/dokumente/Brennstoffzellentext\(1\).doc](http://www.pfalzwerke.de/dokumente/Brennstoffzellentext(1).doc)

9 Anhang I

Nachfolgend sind die ca. 1.000 Betriebe der Papierindustrie in Deutschland nach der Größenklassifizierung des Verbands der deutschen Papierfabriken (VdP) aufgeführt (vgl. Tabelle 9-1). Für die Einteilung der einzelnen Betriebe ist in dieser Aufstellung die Personalstärke entscheidend.

Tabelle 9-1: Betriebsgrößenverteilung der deutschen Papierindustrie 2006 /VdP 2007/, /Eikmeier et al. 2006/

Größenklasse nach Beschäftigtenzahl	Zahl der Betriebe
unter 50	363
50-99	238
100-249	264
250-499	105
500-999	34
über 1.000	10
Summe	1.014

Die Angaben zu den ca. 1.300 Betrieben der Brauindustrie in Deutschland werden gemäß der amtlichen Statistik in acht verschiedenen Größenklassen aufgeführt (vgl. Tabelle 9-2). Für die Einteilung ist dabei der jeweilige Jahresausstoß maßgebend.

Tabelle 9-2: Größenverteilung der deutschen Brauindustrie 2007 /Stat. Bundesamt 2008/

Größenklasse	Anzahl Betriebe
[hl/a]	[-]
> 1.000.000	29
500.000- 1.000.000	16
200.000-500.000	33
100.000-200.000	40
50.000-100.000	63
10.000-50.000	185
5.000-10.000	92
< 5.000	844
Summe	1.302

10 Anhang II

Tabelle 10-1: Prozessdaten des Wärmeverbrauchs ausgewählter Branchen /BWPLUS 2008/

Branche	Prozess	T _o	ΔT _w	c _{p,w}	x _w
[-]	[-]	[°C]	[K]	[kJ/kgK]	[-]
Mälzerei	Trocknen (Darren)	85	65	4,19	5,45
Molkerei	CIP	85	75	4,19	0,013
Molkerei	Pasteurisieren (mit Wärmerückgewinnung)	78	5	4,19	0,86
Molkerei	Behälter sterilisieren	120	40	4,19	0,044
Molkerei	Erwärmen	75	70	4,19	0,18
Molkerei	Kondensmilchherstellung	100	95	4,19	1,8
Molkerei	Sauermilchherstellung	70	65	4,19	4,1
Molkerei	Frischkäseherstellung	23	18	4,19	0,81
Molkerei	Weichkäseherstellung	39	34	4,19	0,28
Molkerei	Butterherstellung	13	8	4,19	1,76
Molkerei	Schlagrahmherstellung	40	35	4,19	0,38
Molkerei	Streichrahmherstellung	40	35	4,19	0,32
Molkerei	Joghurtherstellung	40	35	4,19	0,53
Molkerei	Milchpulverherstellung	200	195	4,19	5,7
Zuckerfabrik	Dünnsafterzeugung: Erwärmen	70	50	4,19	6,25
Zuckerfabrik	Dicksafterzeugung Erwärmen	100	30	4,19	6,25
Zuckerfabrik	Eindicken: Erwärmen (mit Rückgewinnung)	120	20	4,19	55,3
Bäckerei	Gären	40	20	4,19	1,01
Bäckerei	Bleche reinigen	110	90	4,19	0,11
Bäckerei	Luftfeuchtigkeit koordinieren	110	100	4,19	0,58
Bäckerei	Behälterreinigung	144	124	4,19	0,06
Bäckerei	Backen (inkl. Teilverdampfung)	300	280	4,19	1,0
Fleischerei	Erwärmen (kochen)	100	90	4,19	7,6
Fleischerei	Räuchern	110	10	4,19	1,72
Brauerei	Würzbereitung (kochen)	100	27	4,19	2,66
Brauerei	CIP Sudhaus	100	89	4,19	0,05
Brauerei	Reinigung Filtration	90	79	4,19	0,007
Brauerei	Spülung Filtration	60	49	4,19	0,004
Brauerei	Reinigung Flaschen	80	68	4,19	0,19
Brauerei	Sterilisieren Abfüllanlage	120	109	4,19	0,35
Brauerei	Aufheizen Flaschenreinigung	80	68	4,19	0,16
Brauerei	Abfüllung Fass	120	109	4,19	0,02
Brauerei	Reinigung Fass	80	69	4,19	0,09
Brauerei	Sterilisieren Fass	120	109	4,19	0,12

Branche	Prozess	T ₀	ΔT _w	c _{p,w}	x _w
[-]	[-]	[°C]	[K]	[kJ/kgK]	[-]
Glasindustrie	Vorwärmen (Flachglas)	450	430	0,84	0,9
Glasindustrie	Schmelzen (Flachglas)	1.650	1.200	0,84	5,0
Glasindustrie	Spannungsfreiglühen (Flachglas)	500	100	0,84	2,57
Glasindustrie	Glaserzeugung (Flachglas)	1.650	1.630	0,84	3,94
Glasindustrie	Vorwärmen (Hohlglas)	450	430	0,84	1,2
Glasindustrie	Schmelzen (Hohlglas)	1.650	1.200	0,84	2,86
Glasindustrie	Spannungsfreiglühen (Hohlglas)	500	100	0,84	4,29
Glasindustrie	Glaserzeugung (Hohlglas)	1.650	1.630	0,84	2,37
Keramikindustrie	Granulieren	500	480	0,8	7,27
Keramikindustrie	Trocknen (Keramik)	120	20	0,8	4,07
Keramikindustrie	Brennen (mehrgängig)	1.400	1.380	0,8	33,7
Keramikindustrie	Keramikherstellung	1.400	1.380	0,8	30,3
Ziegelindustrie	Homogenisieren (Ziegelindustrie)	60	40	0,84	0,45
Ziegelindustrie	Trocknen (Ziegelindustrie)	120	60	0,84	17,9
Feuerfestindustrie	Brennen	1.500	1.480	0,8	4,66
Futtertrocknung	Trocknung Grünfutter	370	350	1,05	16,33
Futtertrocknung	Trocknung Grünmais	420	400	1,05	25
Futtertrocknung	Trocknung Hackfrüchte	520	500	1,05	24,76
Futtertrocknung	Trocknung Körner	120	100	1,05	7,61
Futtertrocknung	Trocknung Brot/Backwaren	150	130	1,05	16,11
Futtertrocknung	Trocknung Kartoffelpülpe	570	550	1,05	1,32
Aluminiumverarbeitung	Warmwalzen	500	480	0,9	6,875
Aluminiumverarbeitung	Strangpressen	450	430	0,9	9,77
Aluminiumverarbeitung	Schmieden	500	480	0,9	6,88
Maschinenbau	Lacktrocknung (incl. TNV)	120	100	0,5	93,38
Maschinenbau	Tauchbad	90	70	0,5	101
Maschinenbau	Metalltrocknung	105	85	0,5	23,9
Maschinenbau	Schmieden	1.000	980	0,5	8,08
Papierindustrie	Zellstoffherstellung: Kochen	100	80	2,4	36,98
Papierindustrie	Zellstoffherstellung: Ablageeindickung	130	40	4,19	19,09
Papierindustrie	Zellstoffherstellung: Verbrennung Ablauge	130	-110	4,19	-3,06
Papierindustrie	Zellstoffherstellung: Trocknung	100	50	4,19	20,52
Papierindustrie	Holzstoffherstellung: Steinschliff	100	80	4,19	0,60
Papierindustrie	Altpapierrecycling: Sekundärfaserproduktion	45	25	4,19	2,41
Papierindustrie	Herstellung von Karton und Pappe: Trocknen	100	80	4,19	12,89
Papierindustrie	Herstellung von Druckpapier: Trocknen	100	80	4,19	10,74
Papierindustrie	Herstellung technischer Papiere: Trocknen	100	80	4,19	20,40

Branche	Prozess	T_o	ΔT_w	$c_{p,w}$	x_w
[-]	[-]	[°C]	[K]	[kJ/kgK]	[-]
Papierindustrie	Herstellung von Hygienepapier: Trocknen	100	80	4,19	11,81
Papierindustrie	Streichen	60	40	4,19	0,17
Papierindustrie	Herstellung von Karton und Pappe Gesamtprozess	100	80	4,19	16,79
Papierindustrie	Herstellung von Druckpapier: Gesamtprozess	100	80	4,19	13,33
Papierindustrie	Herstellung technischer Papiere: Gesamtprozess	100	80	4,19	10,39
Papierindustrie	Herstellung von Hygienepapier: Gesamtprozess	100	80	4,19	13,56
Fahrzeugbau	Lackieren (mehrschichtig)	40	20	0,5	18,65
Fahrzeugbau	Lacktrocknen	200	180	0,5	6,59
Fahrzeugbau	Unterbodenschutz	110	90	0,5	6,16
Fahrzeugbau	Hohlraumkonservierung	150	130	0,5	2,09
Fahrzeugbau	Peripheriebehandlung	110	90	0,5	2,80
Molkerei	Raumwärme	60	20	4,19	0,06
Mälzerei	Raumwärme	60	20	4,19	2,11
Zuckerfabrik	Raumwärme	60	20	4,19	7,47
Bäckerei	Raumwärme	60	20	4,19	2,11
Fleischerei	Raumwärme	60	20	4,19	5,69
Brauerei	Raumwärme	60	20	4,19	0,9
Kalkindustrie	Raumwärme	60	20	4,19	0,08
Feuerfestindustrie	Raumwärme	60	20	4,19	0,08
Maschinenbau	Raumwärme	60	20	4,19	183
Keramikindustrie	Raumwärme	60	20	4,19	5,3
Ziegelindustrie	Raumwärme	60	20	4,19	3,94
Ziegelindustrie	Brennen (Ziegelindustrie)	1.100	980	0,84	1,75
Kalksandsteinproduktion	Dampfhärten	200	180	1	1,2
Zementindustrie	Zementherstellung	1.700	1.680	0,88	1,77
Gießereien	Gusseisen schmelzen	1.250	1.230	0,53	2,92
Gießereien	Stahl schmelzen	1.600	1.580	0,5	2,51
Gießereien	Zink schmelzen	1.000	980	0,39	1,13
Gießereien	Aluminium schmelzen (Erdgas)	950	930	0,90	6,32
Gießereien	Aluminium schmelzen (Strom)	950	930	0,90	2,15
Gießereien	Kupfer schmelzen (Erdgas)	1.150	1.130	0,39	22,9
Gießereien	Kupfer schmelzen (Strom)	1.150	1.130	0,39	2,45
Gießereien	Messing schmelzen	1.000	980	0,39	2,35
Stahlindustrie	Kokserzeugung	1.200	1.180	0,71	4,3
Stahlindustrie	Sintern	3.100	3.080	0,84	0,58
Stahlindustrie	Roheisenerzeugung	1.500	1.480	0,46	19,7

Branche	Prozess	T ₀	ΔT _w	c _{p,w}	x _w
[-]	[-]	[°C]	[K]	[kJ/kgK]	[-]
Stahlindustrie	Konvertierung	3.000	1.600	0,5	0,21
Stahlindustrie	Einschmelzen (Elektrostahlerzeugung)	3.000	2980	0,5	1,31
Kupferhütten	Primärkupfererzeugung	1.150	1.130	0,39	14,5
Kupferhütten	Sekundärkupfererzeugung	1.150	1.130	0,39	36,9
Holzverarbeitung	Trocknen	105	85	1,7	6,23
Holzverarbeitung	Pressen	200	180	1,7	1,18
Holzverarbeitung	Dämpfen	120	100	1,7	8,47
Holzverarbeitung	Beschichten	120	100	1,7	7,41
Kunststoffherstellung	LDPE	100	80	1	0,22
Kunststoffherstellung	HDPE	100	80	2,3	0,2
Kunststoffherstellung	Polypropylen	50	30	1,93	0,72
Kunststoffherstellung	PVC	100	80	1	0,22
Kunststoffherstellung	Polystyrol	220	200	1,34	0,15
Kunststoffverarbeitung	Verarbeitung ABS	225	205	1,47	3,58
Kunststoffverarbeitung	Verarbeitung Acetal Copolymere	225	205	1,47	5,56
Kunststoffverarbeitung	Verarbeitung PMMA	225	205	1,47	3,58
Kunststoffverarbeitung	Verarbeitung Nylon 6.6	280	260	1,67	4,73
Kunststoffverarbeitung	Verarbeitung Polycarbonat	300	280	1,26	3,57
Kunststoffverarbeitung	Verarbeitung LDPE	140	120	2	4,8
Kunststoffverarbeitung	Verarbeitung HDPE	240	220	2,3	5,12
Kunststoffverarbeitung	Verarbeitung Polypropylen	250	230	1,93	4,46
Kunststoffverarbeitung	Verarbeitung Polystyren	200	180	1,34	3,58
Kunststoffverarbeitung	Verarbeitung PVC	180	160	1	3,6
Kunststoffverarbeitung	Verarbeitung Celluloseacetat	195	175	1,51	3,54
Kunststoffverarbeitung	Verarbeitung PPO	310	290	1,34	3,61
Textilverarbeitung	Entschlichten (Viskose)	60	40	4,19	47,2
Textilverarbeitung	Trocknen (Viskose)	100	80	1,05	92
Textilverarbeitung	Verweilen (Viskose, Pad roll Verfahren)	100	80	1,05	5,14
Textilverarbeitung	Waschen (Viskose, Powertexverfahren)	60	40	4,19	22,3
Textilverarbeitung	Fixieren (Viskose)	150	130	1,05	17,72
Textilverarbeitung	Kondensieren (Viskose)	120	100	1,05	0,09
Textilverarbeitung	Entschlichten (Polyester)	60	40	4,19	165
Textilverarbeitung	Trocknen (Polyester)	100	80	1,05	92
Textilverarbeitung	Waschen (Polyester, Powertexverfahren)	60	40	4,19	26,0
Textilverarbeitung	Färben (Polyester, Pad Roll Verfahren)	60	40	4,19	7,10
Textilverarbeitung	Verweilen (Polyester)	100	80	1,05	10,29
Textilverarbeitung	Färben (Polyester, HT-Verfahren)	120	100	4,19	271
Textilverarbeitung	Appretieren (Polyester)	80	60	1,05	23,66

Branche	Prozess	T_o	ΔT_w	$c_{p,w}$	x_w
[-]	[-]	[°C]	[K]	[kJ/kgK]	[-]
Kalksandsteinproduktion	Raumwärme	60	20	4,19	0,07
Zementindustrie	Raumwärme	60	20	4,19	0,08
Gießereien	Raumwärme	60	20	4,19	0,05
Stahlindustrie	Raumwärme	60	20	4,19	1,14
Kupferhütten	Raumwärme	60	20	4,19	1,1
Holzverarbeitung	Raumwärme	60	20	4,19	68,74
Molkerei	Warmwasser	60	50	4,19	0,02
Mälzerei	Warmwasser	60	50	4,19	0,41
Zuckerfabrik	Warmwasser	60	50	4,19	0,46
Bäckerei	Warmwasser	60	50	4,19	0,41
Fleischerei	Warmwasser	60	50	4,19	2,46
Brauerei	Warmwasser	60	50	4,19	0,018
Keramikindustrie	Warmwasser	60	50	4,19	0,06
Ziegelindustrie	Warmwasser	60	50	4,19	0,002
Kalksandsteinproduktion	Warmwasser	60	50	4,19	0,001
Zementindustrie	Warmwasser	60	50	4,19	1E-04
Gießereien	Warmwasser	60	50	4,19	0,0011
Stahlindustrie	Warmwasser	60	50	4,19	0,06
Kupferhütten	Warmwasser	60	50	4,19	0,06
Holzverarbeitung	Warmwasser	60	50	4,19	1,72
Kalkindustrie	Warmwasser	60	50	4,19	8,7E-05
Feuerfestindustrie	Warmwasser	60	50	4,19	8,7E-05
Stahlverarbeitung	Warmwasser	60	50	4,19	20,86
Papierindustrie	Warmwasser	60	50	4,19	0,86
Kalkindustrie	Brennen (Entsäuern)	1.500	1.480	0,91	5,17
Metallindustrie	Warmwalzen Stahl	1.100	300	0,5	1,51

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 127 M. Ohl
Analyse der Einsatzpotenziale von Wärmeerzeugungstechniken in industriellen Anwendungen
August 2016, 202 Seiten, 35 €
- Band 126 W. Genius
Grüne Bilanzierung - Internalisierung von Umwelt- und Gesundheitsschäden im Rahmen der Input-Output-Rechnung
2016, 283 Seiten, 15 €
- Band 125 E. Heyden
Kostenoptimale Abwärmerückgewinnung durch integriert-iteratives Systemdesign (KOARiiS) - Ein Verfahren zur energetisch-ökonomischen Bewertung industrieller Abwärmepotenziale
2016, 121 Seiten, 15 €
- Band 124 K. Ohlau
Strategien zur wirksamen Minderung von Fluglärm in Deutschland - Minderungsmaßnahmen und langfristige Perspektiven
2015, 192 Seiten, 15 €
- Band 123 T. Telsnig
Standortabhängige Analyse und Bewertung solarthermischer Kraftwerke am Beispiel Südafrikas
September 2015, 285 Seiten, 15 €

- Band 122 M. Henßler
Ganzheitliche Analyse thermochemischer Verfahren bei der Nutzung fester Biomasse zur Kraftstoffproduktion in Deutschland
April 2015, 243 Seiten, 15 €
- Band 121 B. Fais
Modelling policy instruments in energy system models - the example of renewable electricity generation in Germany
Januar 2015, 194 Seiten, 15 €
- Band 120 M. Blesl
Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas – eine Energiesystem- und Technikanalyse
August 2014, 204 Seiten, 15 €
- Band 119 S. Kempe
Räumlich detaillierte Potenzialanalyse der Fernwärmeversorgung in Deutschland mit einem hoch aufgelösten Energiesystemmodell
Juli 2014, 204 Seiten, 15 €
- Band 118 B. Thiruchittampalam
Entwicklung und Anwendung von Methoden und Modellen zur Berechnung von räumlich und zeitlich hochaufgelösten Emissionen in Europa
April 2014, 238 Seiten, 15 €
- Band 117 T. Kober
Energiewirtschaftliche Anforderungen an neue fossil befeuerte Kraftwerke mit CO₂-Abscheidung im liberalisierten europäischen Elektrizitätsmarkt
März 2014, 158 Seiten, 15 €
- Band 116 S. Wissel
Ganzheitlich-integrierte Betrachtung der Kernenergie im Hinblick auf eine nachhaltige Energieversorgung
Februar 2014, 230 Seiten, 15 €
- Band 115 R. Kuder
Energieeffizienz in der Industrie – Modellgestützte Analyse des effizienten Energieeinsatzes in der EU-27 mit Fokus auf den Industriesektor
Februar 2014, 286 Seiten, 15 €
- Band 114 J. Tomaschek
Long-term optimization of the transport sector to address greenhouse gas reduction targets under rapid growth – Application of an energy system model for Gauteng province, South Africa
Dezember 2013, 263 Seiten, 15 €
- Band 113 B. Rühle
Kosten regionaler Energie- und Klimapolitik - Szenarioanalysen mit einem Energiesystemmodell auf Bundesländerebene
November 2013, 196 Seiten, 15 €

- Band 112 N. Sun
Modellgestützte Untersuchung des Elektrizitätsmarktes - Kraftwerkeinsatzplanung und -investitionen
August 2013, 173 Seiten, 15 €
- 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. Rehr, 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 Windstrom-
erzeugung**
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. Nie-
uwlaar, 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 CO₂-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 hydrothermalen 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 Emissionsszenarien am Beispiel Baden-Württembergs
Juni 1999, 214 Seiten, 15 €
- Band 57 T. Stelzer
Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen - Lebensweganalysen 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 Netzwerkeditor
 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 'E³Net' und Integration neuer methodi-
 scher 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. Despretz, 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 Bestimmungs-
 faktoren**
 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 CO₂-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
MOSAİK - 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. Röffler, 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 SO₂- und NO_x-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 CO₂-Emissionen durch einen verstärkten Erdgaseinsatz in der Elektrizitätsversorgung Baden-Württembergs unter besonderer Berücksichtigung konkurrierender Nutzungsmöglichkeiten
 August 1992, 471 Seiten, 26 €
- 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 SO₂- und NO_x-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 Hoahrhein-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. Wyrstcil
**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 €