

Zukunft der Energien – Energie der Zukunft

**Vortrag im Rahmen des „Physiksommer 2002 Ilmenau“
am 18.09.2002**

Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Universität Stuttgart

1. Einleitung

In der Zeitschrift „Politische Ökologie“ war vor einiger Zeit, als Fazit über die bisherige Nachhaltigkeitsdebatte zu lesen: „Man könnte bilanzieren: Seit Rio (1992) ist nichts so nachhaltig wie das Reden und Schreiben über „nachhaltige Entwicklung“ oder „Sustainable Development“ und gleichzeitig nichts so aussichtslos wie der Versuch, den Begriff konsensfähig und allgemein verbindlich zu definieren“. Damit ist die derzeitige Diskussion über das Leitbild einer „Nachhaltigen Entwicklung“, das mit dem Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung - nach ihrer Vorsitzenden auch Brundtland-Kommission genannt – „Unsere gemeinsame Zukunft“ im Jahr 1987 Eingang in die entwicklungspolitische, aber auch in die energiepolitische Diskussion gefunden hat wohl treffend charakterisiert.

2. Nachhaltigkeit und Energieversorgung

Obwohl festzustellen ist, dass das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung auch über die verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen hinweg eine breite prinzipielle Zustimmung findet, so spannen doch die Vorstellungen und Interpretationen des Leitbildes, sowohl hinsichtlich ihrer normativen bzw. theoretisch-naturwissenschaftlichen Fundierungen als auch hinsichtlich ihrer abgeleiteten Handlungsziele bzw. Handlungsanweisungen - dies gilt gerade für den Energiebereich - eine große Bandbreite auf.

So betont die Bundesregierung, oder genauer gesagt der Bundesminister für Wirtschaft und Technologie im gerade erschienenen Energiebereich mit dem Titel „Nachhaltige Energiepolitik für eine zukunftsfähige Energieversorgung“, dass die „ökologische Steuerreform“ und der Ausstieg aus der Kernenergie wesentliche Elemente einer am Leitbild der Nachhaltigkeit ausgerichteten Energiepolitik sind, obwohl an anderer Stelle festgestellt wird, dass eine Energiepolitik dann nachhaltig ist, wenn sie die energiepolitischen Ziele Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit gleichrangig verwirklicht.

Soll das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung nicht zur bloßen Worthülse werden, mit der Gefahr für unterschiedliche Interessen instrumentalisiert zu werden, dann ist eine inhaltliche Konkretisierung dringend geboten. Diese ist auch unumgänglich, will man die verschiedenen Energieoptionen im Hinblick auf ihre Bedeutung für eine nachhaltige Entwicklung bewerten und einordnen, und sie ist notwendig um Schritte in die richtige Richtung von irreführenden Wegen unterscheiden zu können.

Im Verständnis der Brundtland-Kommission wie der Rio-Deklarationen von 1992 beinhaltet das Leitbild "Nachhaltige Entwicklung" die beiden sich intuitiv scheinbar widersprechenden Forderungen nach schonender Umweltnutzung, die die Tragkapazität und den immateriellen Wert von Umwelt und Natur auf Dauer erhält, und nach weiterer wirtschaftlicher und sozialer Entwicklung. Die Brundtland-Kommission charakterisiert als nachhaltige Entwicklung eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können.

Nachhaltige Entwicklung meint also eine Entwicklung, welche die Verbesserung der ökonomischen und sozialen Lebensbedingungen aller Menschen, der heute und zukünftig lebenden, mit der langfristigen Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen in Einklang bringt. Nachhaltige Entwicklung als Leitbild geht also über die ökologischen Fragen weit hinaus und betrifft insbesondere auch den Erhalt bzw. die Verbesserung ökonomischer und sozialer Leistungsfähigkeiten. Es sind diese drei Dimensionen von Nachhaltigkeit, die gleichrangig zu beachten sind.

Diese allgemeinen inhaltlichen Beschreibungen von Nachhaltigkeit, die für viele zustimmungsfähig sind, sagen aber noch wenig darüber aus, worauf es bei einer nachhaltigen Entwicklung konkret, z.B. in bezug auf die Energieversorgung, ankommt.

Jede praktische Konkretisierung des Leitbildes Nachhaltigkeit kann aber nur dann tragfähig sein, wenn sie, was die materiell – energetischen Aspekte betrifft, den Naturgesetzen Rechnung trägt. In diesem Kontext kommt dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, den der Chemiker und Philosoph Wilhelm Ostwald "das Gesetz des Geschehens nannte" eine besondere Bedeutung zu.

Die wesentliche Aussage des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik ist, dass Leben und die dazu notwendige Befriedigung von Bedürfnissen, aber auch die Erbringung kultureller Leistungen unumgänglich mit dem Verbrauch von arbeitsfähiger Energie und verfügbarer Materie verbunden ist.

Darüber hinaus ist der besonderen Rolle der Ressource Wissen Rechnung zu tragen. Unser Wissen ist zwar zu jedem Zeitpunkt begrenzt, es wird aber nicht verbraucht, sondern ist sogar vermehrbar. Die durch Wissenszuwachs steigende Gestaltungsfähigkeit und die damit mögliche Weiterentwicklung von Technik sind die Basis um die Entfaltungsspielräume für die kommenden Generationen zu erhalten und zu erweitern.

Im Kontext einer Konkretisierung des Leitbildes der Nachhaltigkeit lässt sich die Notwendigkeit der Begrenzung von ökologischen Belastungen und von Klimaänderungen wohl begründen. Schwieriger wird es schon bei der Frage, ob denn die Nutzung erschöpfbarer Energieressourcen mit dem Leitbild einer "Nachhaltigen Entwicklung" vereinbar ist, denn Erdöl und Erdgas oder auch Kernbrennstoffe, die wir heute verbrauchen, stehen zukünftigen Generationen ja nicht mehr zur Verfügung. Hieraus wird dann abgeleitet, dass nur die Nutzung "erneuerbarer Energien" oder „erneuerbarer Ressourcen“ mit dem Leitbild Nachhaltigkeit vereinbar sei.

Dies ist aus zwei Gründen nicht tragfähig. Zum einen ist auch die Nutzung erneuerbarer Energie, z.B. von solarer Energie, immer mit einer Inanspruchnahme von nicht-erneuerbaren Ressourcen, z.B. nichtenergetischen Rohstoffen und Materialien verbunden, deren Vorräte auch begrenzt sind.

Und zum zweiten würde dies bedeuten, dass nicht-erneuerbare Ressourcen überhaupt nicht, auch nicht von den zukünftigen Generationen genutzt werden dürften.

Wenn also eine unveränderte Weitergabe der nicht-erneuerbaren Ressourcenbasis offensichtlich unmöglich ist, dann kommt es im Sinne des Leitbildes einer Nachhaltigen Entwicklung darauf an, den nachkommenden Generationen eine technisch-wirtschaftlich nutzbare Ressourcenbasis zu hinterlassen, die ihnen die Befriedigung ihrer Bedürfnisse mindestens entsprechend unserem heutigen Niveau erlaubt.

Die jeweils verfügbare Energie- und Rohstoffbasis wird aber wesentlich durch die verfügbare Technik bestimmt. Energie- und Rohstofflagerstätten, die zwar in der Erdkruste vorhanden sind, aber mangels entsprechender Explorations- und Fördertechniken nicht gefunden und gefördert bzw. nicht wirtschaftlich genutzt werden können, können keinen Beitrag zur Sicherung der Lebensqualität leisten. Es ist also der Stand des Wissens und der Technik, der aus wertlosen Ressourcen verfügbare Ressourcen macht und ihre Quantität mitbestimmt.

Für die Nutzung begrenzter Energievorräte bedeutet dies, dass ihre Nutzung mit dem Leitbild Nachhaltigkeit so lange vereinbar ist, wie es gelingt, den nachfolgenden Generationen eine mindestens gleich große technisch-wirtschaftlich nutzbare Energiebasis verfügbar zu machen. Anzumerken ist hier, dass in der Vergangenheit – trotz steigenden Verbrauchs fossiler Energieträger – die nachgewiesenen Reserven, d.h. die technisch und ökonomisch verfügbaren Energiemengen, zugenommen haben. Darüber hinaus konnten durch technisch-wissenschaftlichen Fortschritt neue Energiebasen, wie die Kernenergie oder ein Teil der erneuerbaren Energieströme, technisch-wirtschaftlich nutzbar gemacht werden.

Was nun die Inanspruchnahme der Senkenfunktion der Ressource Umwelt betrifft, so müsste in der Diskussion stärker beachtet werden, dass Umweltbelastungen, auch die im Zusammenhang mit unserer heutigen Energieversorgung, vorrangig durch anthropogen hervorgerufene Stoffströme, durch Stoffzerstreuung, d.h. Stofffreisetzung in die Umwelt, verursacht werden. Es ist also nicht die Nutzung der Arbeitsfähigkeit der Energie, die die Umwelt schädigt, sondern es sind vielmehr die mit dem jeweiligen Energiesystem verbundenen stofflichen Freisetzungen, wie z.B. das Schwefeldioxid oder das Kohlendioxid bei der Verbrennung von Kohle, Öl und Gas, die zu Umweltbelastungen führen. Dies wird deutlich an der Sonnenenergie, die mit ihrer zur Verfügung gestellten Arbeitsfähigkeit - der solaren Strahlung - einerseits Hauptquelle allen Lebens auf der Erde ist, andererseits aber auch der bei weitem größte Entropiegenerator ist, weil nahezu die gesamte Energie der Sonne nach ihrer Entwertung als Wärme bei Umgebungstemperatur in den Weltraum wieder abgestrahlt wird. Da ihre Energie, die Strahlung, nicht an einen stofflichen Energieträger gebunden ist, resultieren aus der Entropieerzeugung aber keine Umweltbelastungen im heutigen Sinn. Dies schließt natürlich Stofffreisetzungen und damit verbundene Umweltbelastungen im Zusammenhang mit der Herstellung einer Solaranlage nicht aus.

Der hier angesprochene Sachverhalt ist deshalb von besonderer Bedeutung, weil er die Möglichkeit einer Entkopplung von Energieverbrauch (Verbrauch an Arbeitsfähigkeit) und Umweltbelastung beinhaltet. Ein wachsender Verbrauch an arbeitsfähiger Energie und sinkende Umwelt- und Klimabelastungen sind somit kein Widerspruch. Die Stofffreisetzungen nicht die Energieströme müssen begrenzt werden, will man die Umwelt und das Klima schützen.

Neben der Erweiterung der verfügbaren Ressourcenbasis kommt unter dem Leitbild der "Nachhaltigen Entwicklung" natürlich auch dem haushälterischen Umgang mit Energie, oder besser gesagt mit allen knappen Ressourcen eine besondere Bedeutung zu. Effiziente Ressourcennutzung im Zusammenhang mit der Energieversorgung betrifft dabei nicht nur die Ressource Energie, da die

Bereitstellung von Energiedienstleistungen immer auch den Einsatz anderer knapper Ressourcen, wie nicht energetische Rohstoffe, Kapital, Arbeit und Umwelt erfordert.

Die effiziente Nutzung aller Ressourcen, die sich aus dem Leitbild Nachhaltigkeit ableitet, entspricht aber auch dem allgemeinen ökonomischen Prinzip. Aus beiden folgt, dass ein Energiesystem oder eine Energiewandlungskette zur Bereitstellung von Energiedienstleistungen dann effizienter als eine andere ist, wenn sie für die Energiedienstleistung weniger Ressourcen einschließlich der Ressource Umwelt in Anspruch nimmt.

In der Ökonomie dienen Kosten und Preise als Maß für die Inanspruchnahme knapper Ressourcen. Geringere Kosten bei gleichem Nutzen bedeuten eine ökonomisch effizientere, eine ressourcenschonendere d.h. nachhaltigere Lösung. Dieses Verständnis von Kosten, so scheint es, ist in der Energiediskussion weitgehend verlorengegangen.

Gegen Kosten als Maß für Nachhaltigkeit von Energiesystemen mag man einwenden, dass gegenwärtig die externen Effekte, z.B. von Umweltschäden, in den Kostenkalkülen noch nicht erfasst werden. Diesem Umstand kann durch die Internalisierung externer Kosten, d.h. eine Inwertsetzung von Umwelt und Natur, abgeholfen werden.

Wenn wir uns bewusst machen, dass Kosten, die externe Effekte soweit wie möglich mit berücksichtigen, das derzeit beste Maß für die Inanspruchnahme knapper Ressourcen sind, dann kommt ihnen auch eine besondere Bedeutung bei der Beurteilung von Energietechniken im Hinblick auf das Leitbild Nachhaltigkeit zu. Nachhaltige Energiesysteme sind also solche deren Vollkosten oder gesamtwirtschaftliche Kosten möglichst gering sind.

Ökonomische Effizienz ist deshalb auch ein zentrales Prinzip für die Verwirklichung einer Nachhaltigen Energieversorgung. Hierauf wird später im Zusammenhang mit dem Ordnungsrahmen für die Energiewirtschaft noch einmal zurückgekommen.

Kosteneffizienz ist darüber hinaus auch die Basis einer wettbewerbsfähigen Energieversorgung zur energieseitigen Sicherung der wirtschaftlichen Entwicklung und ausreichender Beschäftigung in unserem Land und sie ist der Schlüssel zur Vermeidung nicht tolerierbarer Klimaveränderungen. Beides sind ja zentrale Aspekte des Leitbildes einer "nachhaltigen Entwicklung".

Aus dem bisher Gesagten lassen sich für eine Operationalisierung des Leitbildes Nachhaltigkeit im Hinblick auf die Energieversorgung die folgenden Orientierungs- und Handlungsregeln ableiten:

1. Die Nutzung erneuerbarer Ressourcen darf auf Dauer nicht größer sein als ihre Regenerationsrate.
2. Nicht-erneuerbare Energieträger und Rohstoffe sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger wirtschaftlich nutzbarer Ersatz verfügbar gemacht wird, in Form neu erschlossener Vorräte, erneuerbarer Ressourcen oder einer höheren Produktivität der Ressourcen.
3. Stoffeinträge in die Umwelt dürfen auf Dauer die Aufnahmekapazität bzw. Assimilationsfähigkeit der natürlichen Umwelt nicht überschreiten.
4. Die Gefahren und Risiken für die menschliche Gesundheit müssen kleiner sein als die durch die Energienutzung vermiedenen natürlichen Gefahren und Risiken.
5. Die Bereitstellung von Energiedienstleistungen soll zu möglichst geringen gesamtwirtschaftlichen Kosten (private plus externe Kosten) erfolgen.

Abgesehen von der besonderen Betonung unserer Verantwortung für die kommenden Generationen, ist das Leitbild „Nachhaltigkeit“ durchaus kompatibel mit den allgemein verfolgten energiepolitischen Zielen, Energie

- bedarfsgerecht und sicher
- mit möglichst geringen volkswirtschaftlichen Kosten
- und umweltverträglich

bereitzustellen.

3. Nachhaltigkeit verschiedener Stromerzeugungssysteme

Ausgehend von der inhaltlichen Konkretisierung des Leitbildes „Nachhaltige Entwicklung“ sollen nun verschiedene Stromerzeugungssysteme bezüglich ihrer relativen Nachhaltigkeit, d.h. in bezug auf ihre Ressourcen- und Umweltinanspruchnahme sowie ihre Kosten verglichen werden. Dazu werden Ergebnisse von Material-, Energie- und Stoffbilanzen erläutert, die alle Stufen und Prozesse erfassen, die für die Energiebereitstellung notwendig sind. Die Bilanzierung erfolgt also über den gesamten Lebensweg und erfasst alle vor - bzw. nachgelagerten Prozessschritte der Bereitstellung des Energieträgers sowie der Materialien für die involvierten technischen Anlagen, insbesondere die Energiewandler. Dies entspricht einer Betrachtung von der Wiege bis zur Bahre. Die exemplarischen Betrachtungen beschränken sich auf Stromerzeugungssysteme, die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen und mit heutigen Produktionsstrukturen hergestellt werden.

Energieaufwand

Die Bereitstellung von Energie ist immer mit einem investiven Energieaufwand für die Errichtung der Anlagen und im Falle der fossilen und nuklearen Energieträger auch für die Bereitstellung des Brennstoffs sowie für die Entsorgung verbunden.

Tabelle 1: Kumulierter Energieaufwand und energetische Amortisationszeit

	KEA (ohne Brennstoff) [kWh _{Prim} / kWh _{el}]	EAZ [Monate]
Steinkohle D	0,28 - 0,30	3,2 - 3,6
Braunkohle	0,16 - 0,17	2,7 - 3,3
Erdgas GuD	0,17	0,8
Nuklear	0,07 - 0,08	2,9 - 3,4
Photovoltaik	0,62 - 1,24	71 - 141
Wind	0,05 - 0,15	4,6 - 13,7
Wasser	0,03 - 0,05	8,2 - 13,7

Der kumulierte Energieaufwand, der in Tabelle 1 für verschiedene Stromerzeugungssysteme dargestellt ist, erfasst den Aufwand an Primärenergie für die Herstellung und Entsorgung des Kraftwerks und die Gewinnung und Bereitstellung des Brennstoffes, um eine kWh Elektrizität bereitzustellen. Für die Windenergie liegt er im Bereich von 5 bis 15 %. Bei der Steinkohle, Braunkohle und beim Erdgas wird er wesentlich durch den Energieaufwand für die Gewinnung, Aufbereitung und den Transport des Brennstoffs bestimmt. Für die Wasserkraft und die Kernenergie ist er im Bereich von 3 - 8 % und für die Photovoltaik liegt er derzeit noch um einen Faktor 10 höher. Dies schlägt sich dann auch in der energetischen Amortisationszeit nieder, die bei der Photovoltaik etwa 6 bis 12 Jahre beträgt, und damit deutlich größer als bei allen anderen Systemen ist.

Materialaufwand

Tabelle 2 zeigt für ausgewählte Materialien die Ressourcenintensität der hier betrachteten Stromerzeugungssysteme. Erfasst ist der jeweilige Materialaufwand für den Bau des Kraftwerks sowie für alle Prozessschritte zur Bereitstellung des Brennstoffs.

Tabelle 2: Rohstoff- und Materialaufwand

	Eisen [kg / GWh _{el}]	Kupfer [kg / GWh _{el}]	Bauxit [kg / GWh _{el}]
Steinkohle D	1.750 - 2310	2	16 - 20
Braunkohle	2.100 - 2.170	7 - 8	18 - 19
Erdgas GuD	1.207	3	28
Nuklear	420 - 490	6 - 7	27 - 30
Photovoltaik	3.690 - 24.250	210 - 510	240 - 4.620
Wind	3.700 - 11.140	47 - 140	32 - 95
Wasser	1.560 - 2.680	5 - 14	4 - 11

Die Tabelle erfasst nur einen kleinen Teil der Rohstoffressourcen, sie stellt also keine vollständige Materialbilanz dar. Sie lässt aber erkennen, dass die geringere Energiedichte der solaren Strahlung und des Windes über die notwendigen großen Energiesammlungsflächen zu einem vergleichsweise hohen Materialbedarf führt.

Dem hohen Materialaufwand bei Wind und Photovoltaik steht andererseits gegenüber, dass die Stromerzeugung nicht an die Umsetzung eines stofflichen Energieträgers gebunden ist. Diesbezügliche Stofffreisetzungen, die zu Umweltbelastungen führen, treten somit nicht auf. Umweltbelastungen, die aus Stoffemissionen resultieren, können demnach nur im Zusammenhang mit der Herstellung und Entsorgung des Kraftwerks entstehen.

Kumulierte Emissionen

In Abbildung 1 sind die kumulierten über den gesamten Lebensweg aufsummierten Emissionen ausgewählter Schadstoffe der hier betrachteten Stromerzeugungssysteme gegenübergestellt.

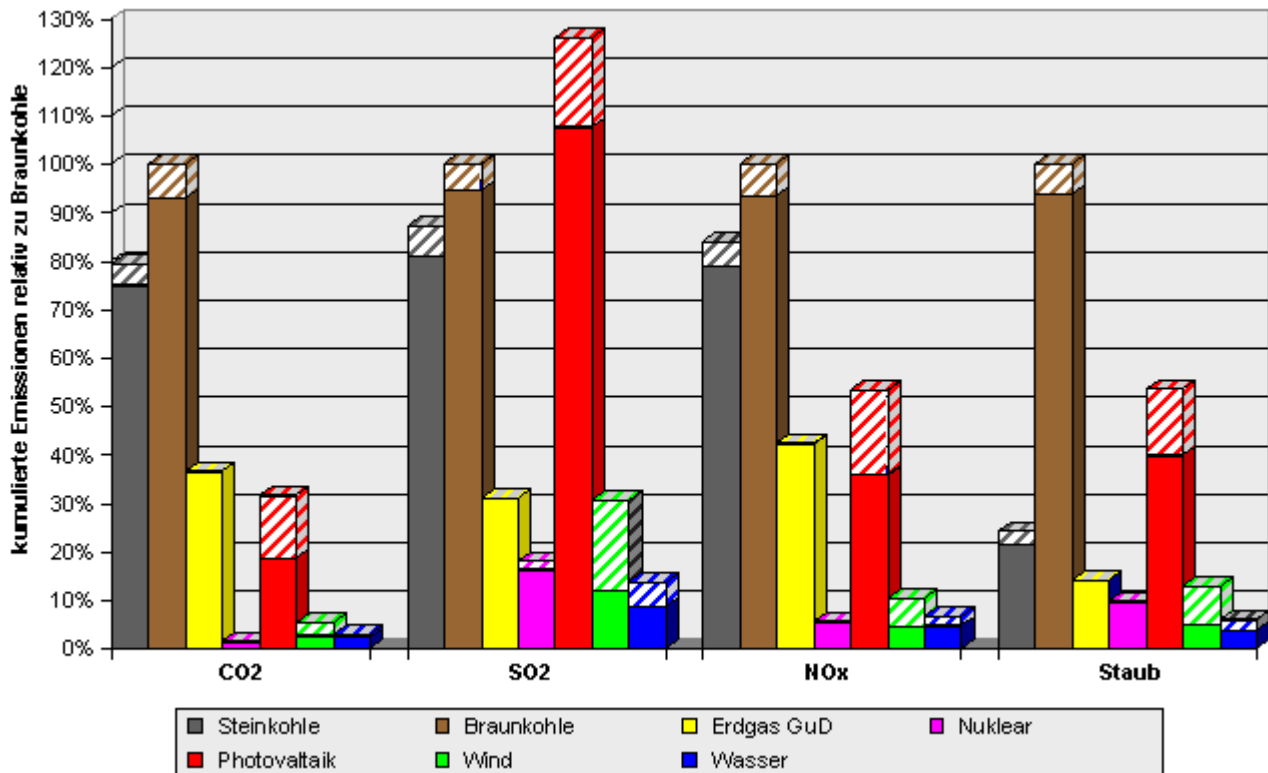


Abbildung 1: Kumulierte Emissionen

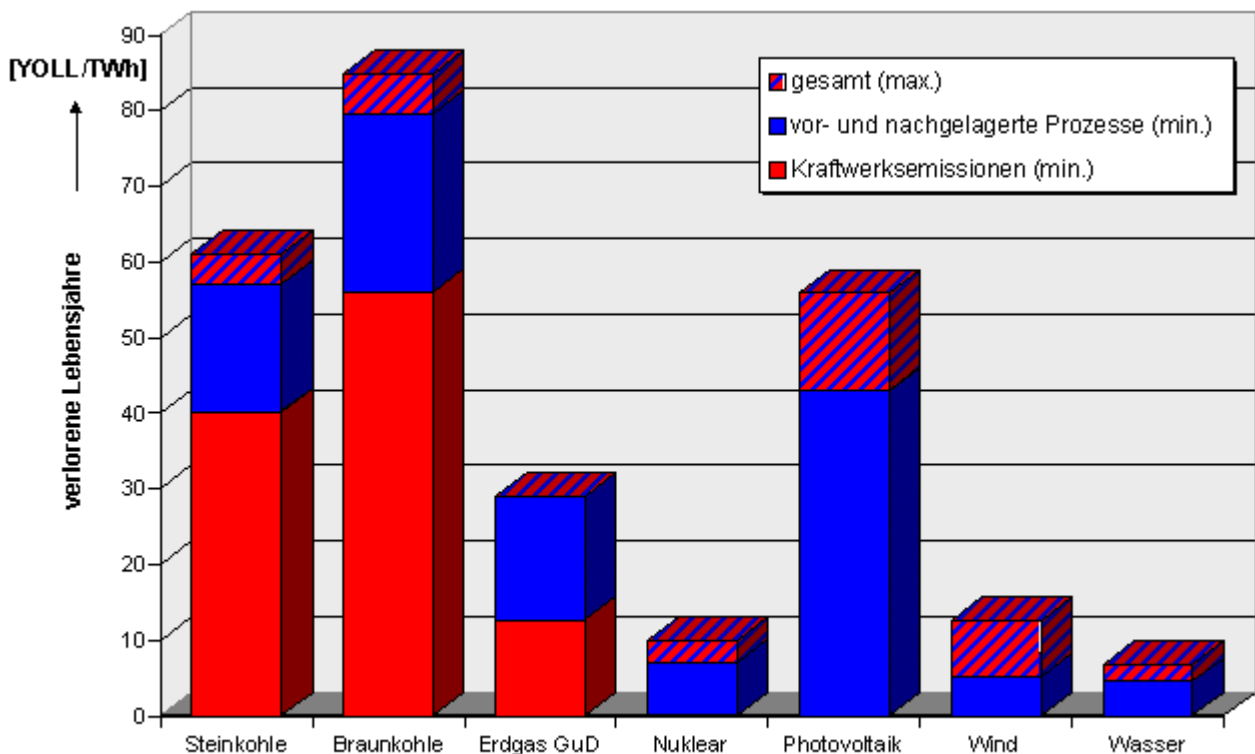
Bei den hier erfassten Schadgasen sind die auf die erzeugte kWh bezogenen Emissionen der Kernenergie, der Wasserkraft und der Windstromerzeugung vergleichsweise niedrig. Verglichen mit der Steinkohle und dem Erdgas sind die kumulierten Emissionen der Photovoltaik durchaus beachtlich. Beim CO₂ machen sie rund 50 – 90 % der Emissionen einer Stromerzeugung mit Erdgas aus.

Hier drückt sich der Umstand aus, dass ein hoher kumulierter Energieaufwand und eine hohe Materialintensität auch bei energierohstofflosen Energiebereitstellungssystemen mit hohen indirekten Schadstoffemissionen verbunden sein kann.

Gesundheitsrisiken

Die Stromerzeugung mittels fossiler oder nuklearer sowie aus erneuerbaren Energien ist mit direkten oder indirekten Emissionen von Luftschadstoffen bzw. Belastungen durch ionisierende Strahlung verbunden, die zu Gesundheitseffekten führen können. Ausgehend von den mittels einer Lebensweg-Analyse ermittelten kumulierten Emissionen lassen sich die resultierenden Gesundheitsrisiken abschätzen.

In Abbildung 2 ist das durch die hier betrachteten Stromerzeugungstechniken verursachte zusätzliche Sterblichkeitsrisiko, ausgedrückt als verlorene Lebensjahre je TWh, dargestellt.



↗ durchschnittliche spezifische Gesundheitsrisiken für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland

Abbildung 2: Gesundheitsrisiken

Die gesundheitlichen Risiken der Verstromung von Braun- und Steinkohle in Dampfkraftwerken sind vergleichsweise hoch. Obwohl der Prozess der Stromerzeugung in photovoltaischen Anlagen emissionsfrei ist, liegen die Risiken wegen der hohen Aufwendungen für die Materialherstellung und die Komponentenfertigung über denen eines modernen Erdgas GuD-Kraftwerkes. Die Stromerzeugung mittels Kernenergie, Windenergie und Wasserkraft weisen die geringsten Risiken auf.

Die Risiken der Kernenergie schließen auch die Erwartungswerte der Risiken von auslegungsüberschreitenden Unfällen mit ein. Offen bleibt, ob Risiken mit unterschiedlichem Schadenspotential unterschiedlich zu werten sind.

Externe Kosten

Zuvor wurde erwähnt, dass wenn Kosten als Maß für die Nachhaltigkeit von Energiesystemen verwendet werden sollen, auch die Kosten der Umweltinanspruchnahme in die Kostenermittlung mit einbezogen werden müssen.

Bezüglich der Ermittlung dieser sogenannten externen Kosten sind zwar in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht worden, dennoch sind die Unsicherheiten für Teilbereiche wie z.B. die Klimaveränderung, vergleichsweise groß.

Die entsprechend dem derzeitigen Stand quantifizierbaren externen Kosten sind in Abbildung 3 dargestellt. Sie umfassen die Gesundheitsschäden, Schäden der Agrarproduktion, Materialschäden und Schäden an Ökosystemen durch Versauerung. Für die externen Kosten des Treibhauseffektes, deren monetäre Bewertung noch mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist, ist hier eine Bandbreite angegeben, die aus alternative Bewertungsansätzen resultiert.

[€-Cent/kWh]	Steinkohle	Braun- kohle	Erdgas GuD	Nuklear	Photo- voltaik	Wind	Wasser
Schadenskosten¹⁾							
Gesundheit	0,81 - 0,87	1,13 - 1,20	0,41	0,10 - 0,11	0,61 - 0,79	0,07 - 0,18	0,06 - 0,10
Getreide	0,01 - 0,02	-0,002	0,031	0,000	-0,003	-0,001	0,000
Material	0,01	0,01 - 0,02	0,006	0,002	0,01	0,002	0,001
Treibhauseffekt	0,19 - 0,20	0,24 - 0,25	0,09	0,004	0,05 - 0,08	0,01	0,007
Vermeidungskosten²⁾							
Vers., Eutroph.	0,44 - 0,47	0,52 - 0,55	0,20	0,06	0,39 - 0,48	0,04 - 0,11	0,04 - 0,06
Treibhauseffekt	1,50 - 1,59	1,86 - 2,00	0,73	0,03	0,37 - 0,63	0,06 - 0,11	0,05 - 0,06
Gesamt	1,45 - 2,96	1,89 - 3,77	0,74 - 1,38	0,16 - 0,29	1,05 - 1,92	0,13 - 0,40	0,11 - 0,21
¹⁾ durchschnittliche spezifische Schadenskosten für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland ²⁾ nach Standard-Preis-Ansatz							

¹⁾ durchschnittliche spezifische Externe Kosten für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland

Abbildung 3: Externe Kosten

Die externen Kosten sind für die Kohlekraftwerke am höchsten und für die Kernenergie, der Wind- und Wasserkraftnutzung am geringsten. Die externen Kosten der derzeitigen photovoltaischen Stromerzeugung sind von derselben Größenordnung, wie die der Stromerzeugung aus Erdgas.

Stromgestehungskosten (Produktions- und externe Kosten)

Kosten sind ein Maß für die Inanspruchnahme knapper Ressourcen. Vor diesem Hintergrund ist dann auch verständlich, dass ein hoher Rohstoff- und Energieaufwand sowie hohe Umweltbelastungen sich in den Kosten niederschlagen.

Die in Abbildung 4 dargestellten Stromgestehungskosten weisen aus, dass die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien mit höheren, im Fall der Photovoltaik sogar deutliche höheren Kosten verbunden ist, als die aus fossilen und nuklearen Kraftwerken.

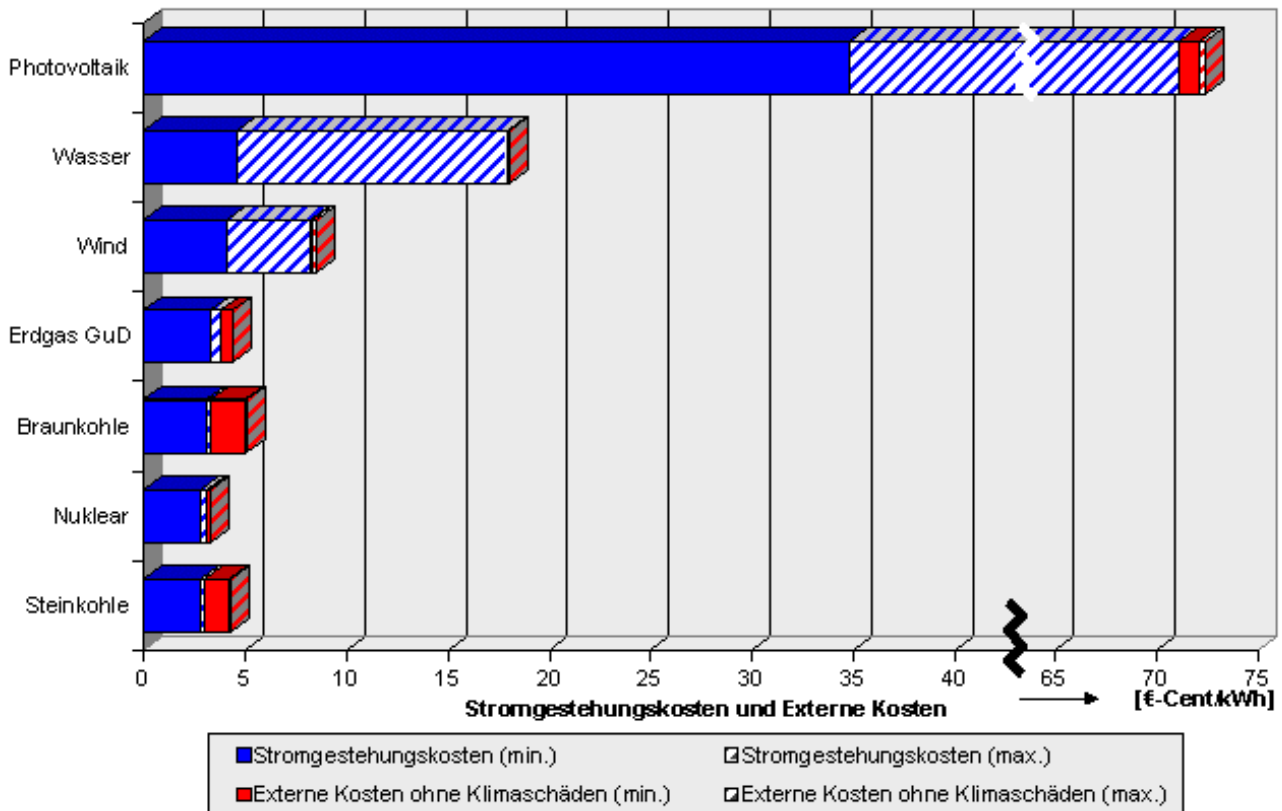


Abbildung 4: Gesteuerungskosten und externe Kosten der Stromerzeugung

Die Internalisierung externer Kosten verbessert die Kostenrelationen von Wind- und Wasserkraftwerken im Vergleich zu fossilen Kraftwerken. Gleichzeitig wird aber auch deutlich, dass die Einbeziehung von Umweltexternalitäten, die Wirtschaftlichkeitsposition der Kernenergie verbessert.

4. Nachhaltige Energieversorgung in Bayern

Wenn also eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung den Zielen der ökologischen Verträglichkeit sowie der Verbesserung der ökonomischen und sozialen Leistungsfähigkeiten gleichrangig Rechnung tragen muss, dann deuten die zuvor angestellten Nachhaltigkeitsvergleiche von Energietechnologen schon darauf hin, dass von der zukünftigen Ausgestaltung der Energieversorgung beträchtliche Zielkonflikte ausgehen können.

Im Rahmen des von der bayerischen Staatsregierung durchgeführten „Energiedialogs Bayern“ sind verschiedene Wege der Entwicklung der Energieversorgung Bayerns im Hinblick auf ihre Kongruenz mit den Zielen der Nachhaltigkeit untersucht worden.

Dazu wurden verschiedene Szenarien entwickelt, die unterschiedliche Wege der Energieversorgung Bayerns mittels verschiedener Szenarien quantitativ beschreiben (siehe Abbildung 5). Der Zeithorizont der Betrachtungen reicht bis zum Jahr 2020

- **Referenzszenario**
 - Fortschreibung der energiewirtschaftlichen Entwicklungen
 - Auslaufen der Kernenergienutzung
 - keine Vorgabe von Klimaschutzzielen
- **Klimaschutzszenario 1a**
 - Klimaschutzziele (80 Mio. t CO₂ in 2010, 70 Mio. t CO₂ in 2020)
 - keine vorzeitige Außerbetriebnahme der KKW, Ausbau möglich
- **Klimaschutzszenario 1b**
 - Klimaschutzziele (80 Mio. t CO₂ in 2010, 70 Mio. t CO₂ in 2020)
 - Auslaufen der Kernenergienutzung

Abbildung 5: Szenarien

Das Referenzszenario ist dabei keine Prognose der wahrscheinlichen Entwicklung, sondern eine Bezugsentwicklung, um die Auswirkungen unterschiedlicher energiepolitischer Vorstellungen aufzeigen zu können.

Zwei Klimaschutzszenarien (1a und 1b) sollten die Erreichbarkeit ökologischer Nachhaltigkeitsziele und die damit verbundenen Konsequenzen hinsichtlich der Entwicklung der Energiestrukturen sowie der Kosten analysieren. Sie sind gekennzeichnet durch eine angestrebte Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen von 92,5 Mio. t im Jahr 1998 auf 80 Mio. t. in 2010 bzw. 70 Mio. t in 2020. Im Klimaschutzszenario 1 a werden die bestehenden Kernkraftwerke nicht vorzeitig außer Betrieb genommen und ein Zubau neuer Kernkraftwerke ist möglich. Im Klimaschutzszenario 1 b

läuft die Kernenergienutzung entsprechend der Vereinbarung der Energieversorgungsunternehmen mit der Bundesregierung aus.

Tabelle 3: Primärenergieverbrauch und CO₂-Emissionen in Bayern im Referenzszenario in PJ bzw. Mio. t

	1995	1998		2005	2010	2015	2020
Substitutionsprinzip							
Braunkohle	34,4	41,6		3,8	3,6	3,4	3,3
Steinkohle	99,3	102,7		63,4	66,5	93,8	276,9
Mineralöle	903,1	959,0		912,1	885,3	872,1	866,8
Gase	296,9	307,7		331,7	349,9	391,5	425,7
Erneuerbare	193,9	188,8		191,9	201,7	209,2	216,9
Kernenergie	441,6	437,9		454,0	443,6	341,3	72,2
Stromsaldo	-21,3	-15,3		16,6	22,8	29,3	18,9
SUMME	1 947,7	2 022,4		1 973,5	1 973,3	1 940,7	1 880,8
CO₂ Emission	88,0	92,5		83,4	81,8	84,9	102,3

Die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und der CO₂-Emissionen in Bayern im Referenzszenario ist in Tabelle 3 dargestellt. Trotz einer Zunahme des Bruttoinlandsproduktes um 60 % bis zum Jahr 2020 sinkt der Primärenergieverbrauch von 2022 PJ auf 1880 PJ ab. Dies resultiert aus Energieeffizienzverbesserungen in allen Energieanwendungsbereichen sowie bei der Stromerzeugung. Mineralöl bleibt trotz eines rückläufigen Verbrauchs der mengenmäßig wichtigste Energieträger (Anteil im Jahr 2020 ~46 %). Der Erdgasverbrauch steigt langfristig um 40 %, was im wesentlichen auf eine wachsende Stromerzeugung auf Basis Erdgas zurückzuführen ist. Die Steinkohle ersetzt die Stromerzeugung der auslaufenden Kernenergie im Grundlastbereich. Daraus resultiert fast eine Verdreifachung des Steinkohleverbrauchs im Jahr 2020 gegenüber heute.

Die Nutzung erneuerbarer Energien, im wesentlichen von Biomasse, steigt moderat auf einen Anteil von 11,5 % im Jahr 2020 an und die Stromimporte nehmen zu. Aus dieser Entwicklung des Primärenergieverbrauchs resultiert eine Entwicklung der CO₂-Emissionen, die zunächst bis 2010 rückläufig ist. Dann steigen die CO₂-Emissionen wieder an und sie betragen im Jahr 2020 rund 102 Mio. t.

In den Klimaschutzszenarien dürfen vorgegebene Grenzen der CO₂-Emissionen (80 Mio. t in 2010 und 70 Mio. t in 2020) nicht überschritten werden. Die sich ergebende Primärenergieverbrauchsstrukturen sind in Abbildung 6 der im Referenzszenario gegenübergestellt.

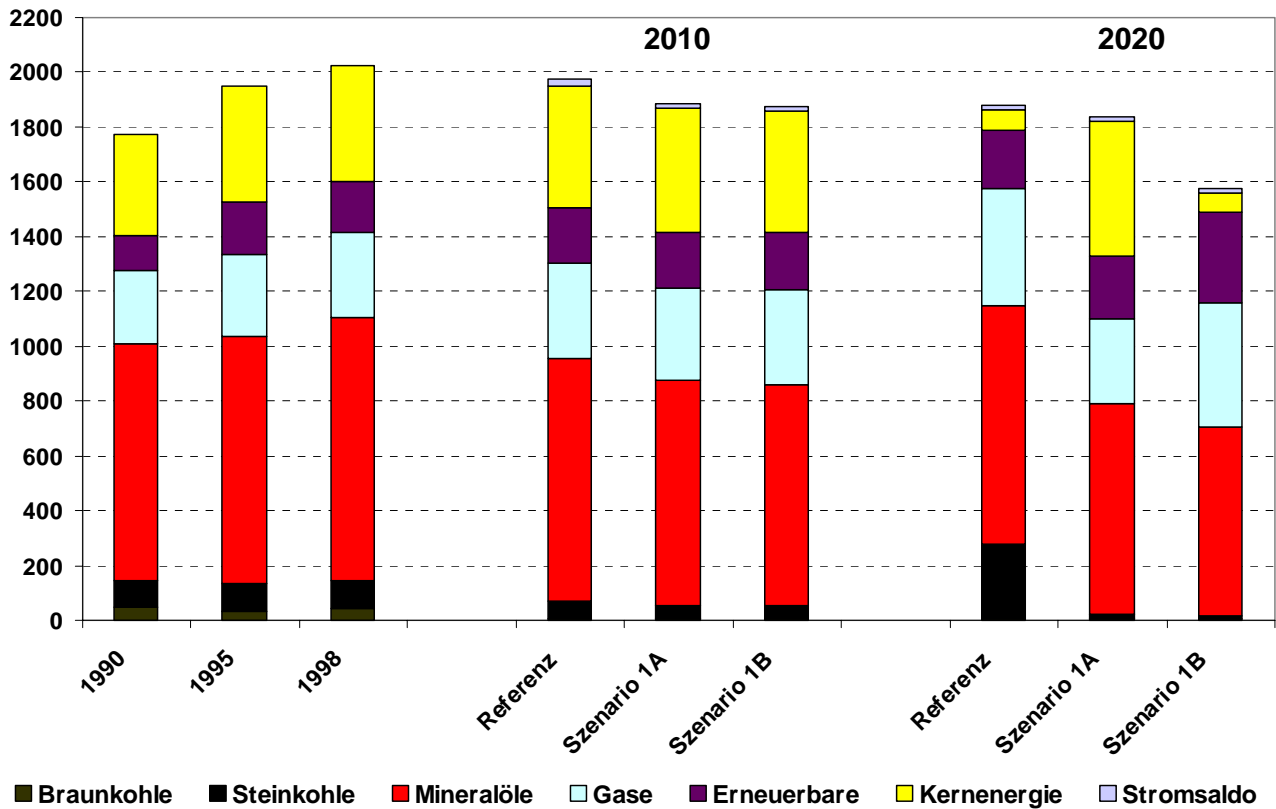


Abbildung 6: Primärenergieverbrauchsstruktur in Bayern im Szenarienvergleich

Im Klimaschutzszenario 1 a (weitere Nutzung der Kernenergie) werden die Klimaschutzziele erreicht durch weitere Effizienzverbesserungen, das Zurückdrängen des Mineralölverbrauchs und die weitere Nutzung bzw. den Ausbau der Kernenergie, anstelle einer Stromerzeugung auf Basis von Steinkohle und Erdgas in der Referenzentwicklung. Im Klimaschutzszenario 1 b sind verstärkte Maßnahmen zur Energieeinsparung insbesondere im Gebäudebereich, eine Ausweitung der Nutzung erneuerbarer Energien sowie des Erdgases erforderlich, um bei Verzicht auf die Kernenergie die angestrebten Klimaschutzziele zu erreichen.

Deutlich ausgeprägter sind die Strukturunterschiede in den Klimaschutzszenarien im Bereich der Stromerzeugung (siehe Abbildung 7).

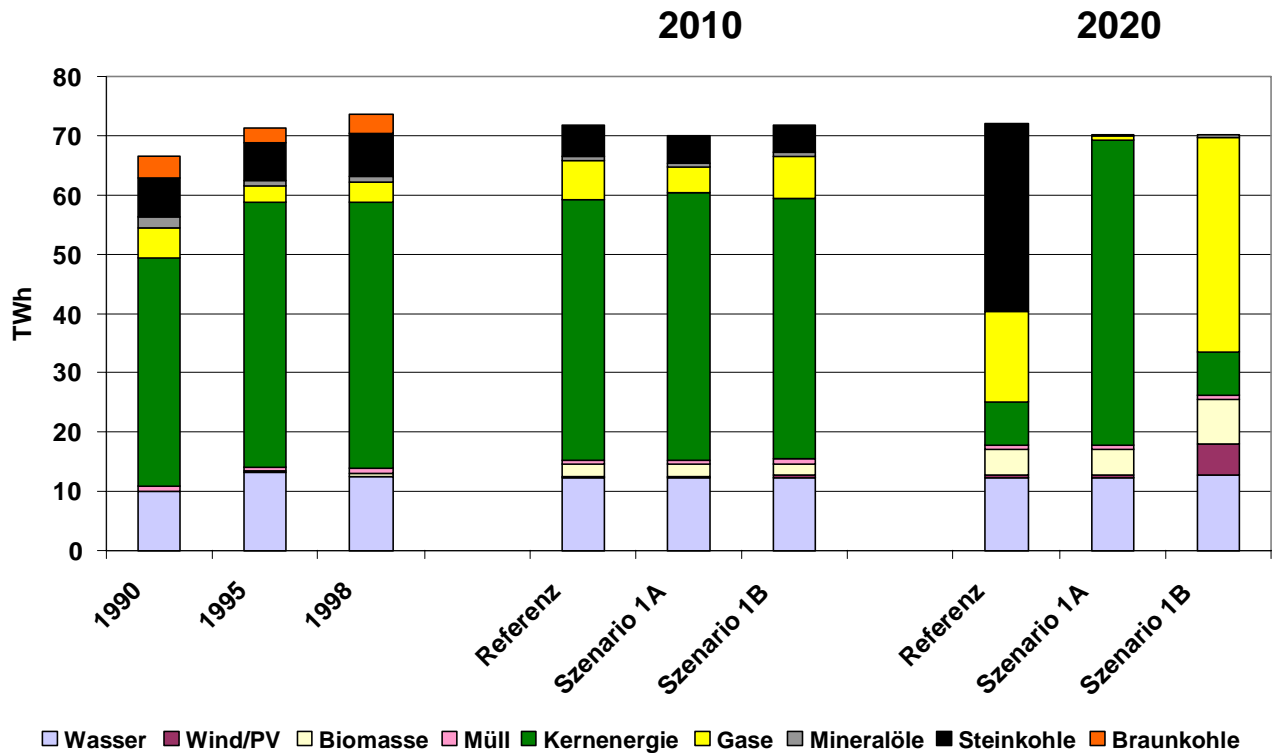


Abbildung 7: Szenarienvergleich hinsichtlich der Stromerzeugungsstruktur

Im Klimaschutzszenario 1 a entfällt auf die Kernenergie im Jahr 2020 ein Anteil von 73 % an der Stromerzeugung. 18 % entfallen auf die Wasserkraft und der Rest auf die Biomasse. Im Klimaschutzszenario 1 b ist das Erdgas mit 52 % der wichtigste Energieträger für die Stromerzeugung, gefolgt von der Wasserkraft (18 %) und der Stromerzeugung aus Windenergie, Biomasse und solarer Strahlung, die zusammen rd. 20 % der Stromerzeugung ausmachen.

Gemäß den Vorgaben sind die beiden Klimaschutzszenarien hinsichtlich der ökologischen Komponenten von Nachhaltigkeit gemessen am Niveau der CO₂-Emissionen gleichwertig. Bezüglich der ökonomischen Dimension von nachhaltiger Entwicklung unterscheiden sie sich aber erheblich.

Tabelle 4: Szenarienvergleich hinsichtlich Nachhaltigkeitsindikatoren

	Klimaschutzszenario 1a	Klimaschutzszenario 1b
Ökonomie – Differenzkosten gegenüber dem Referenzszenario in Mrd. DM₉₈		
Kumuliert	-100,80	+60,97
Umwelt – Differenz der Externen Kosten gegenüber dem Referenzszenario in Mrd.		
Kumuliert	-0,40	-1,77
Differenz der Gesamtkosten gegenüber dem Referenzszenario in Mrd. DM₉₈		
Kumuliert	-101,20	59,20

Wie aus Tabelle 4 ersichtlich, sind die kumulierten Kosten der Energieversorgung bis zum Jahr 2020 im Klimaschutzszenario 1 a um rd. 100 Mrd. DM₉₈ geringer als in der Referenzentwicklung, während sie im Klimaschutzszenario 1 b um rd. 60 Mrd. DM₉₈ höher sind. Der Verzicht auf eine weitere Nutzung der Kernenergie im Klimaschutzszenario 1 b wäre also mit Mehrkosten des Klimaschutzes für die Bürger und die Wirtschaft in Bayern von rd. 160 Mrd. DM₉₈ verbunden.

Auch die Einbeziehung der externen Kosten von anderen Luftschadstoffemissionen ändert an dieser Kostenbelastung wenig.

Die in Tabelle 4 ausgewiesenen Mehrkosten beziehen sich nur auf den Energiebereich. Die durch die höheren Energiekosten induzierten gesamtwirtschaftlichen Wohlfahrtsverluste dürften noch deutlich höher ausfallen.

5. Ordnungsrahmen und Energiepolitik für eine nachhaltige Entwicklung

Wenn wir unter nachhaltiger Entwicklung der Energieversorgung eine Entwicklung verstehen, die die nicht substituierbaren Funktionen von Umwelt und Natur auf Dauer erhält, die Stoffeinträge in die Umwelt entsprechend ihrer Assimilationsfähigkeit begrenzt, die technisch-wirtschaftlich nutzbare Energie- und Rohstoffbasis erweitert und mit den nicht-erneuerbaren Rohstoffen effizient und haushälterisch umgeht, um den heutigen und kommenden Generationen keine Lebens- und Entwicklungschancen vorzuenthalten, dann stellt sich natürlich die Frage, welcher Ordnungsrahmen und welche Energiepolitik zur Realisierung einer nachhaltigen Energieversorgung geeignet sind.

Im Hinblick auf die effiziente Nutzung knapper Ressourcen als konstitutives Element von Nachhaltigkeit kommt dabei dem ökonomischen Ordnungsrahmen eine zentrale Bedeutung zu.

Nicht nur wirtschaftstheoretische Überlegungen sondern insbesondere die praktischen Erfahrungen, dass effizientes Wirtschaften nicht durch staatliche Planung und Regulierung sondern durch die Nutzung der preisgesteuerten Allokationsmechanismen von Märkten erreicht wird, sprechen dafür, einen marktwirtschaftlichen Ordnungsrahmen zur effizienten Nutzung knapper Ressourcen im Kontext der Realisierung einer nachhaltigen Energieversorgung zu nutzen.

Gelegentlich wird mit Hinweis auf die Umweltbelastungen, die ja auch in Marktwirtschaften zu beobachten sind, von einem Marktversagen gesprochen. Diese Diagnose verkennt, dass

Umweltbeeinträchtigungen in einer Marktwirtschaft sich aus den Besonderheiten von Umweltgütern ergeben. Diese werden zum großen Teil immer noch als freie Güter betrachtet, von deren Nutzung Einzelne nicht auszuschließen sind. Sie sind also in das Marktgeschehen gar nicht integriert und können daher durch die unsichtbare Hand des Marktes auch nicht vor einer Übernutzung geschützt werden. Die Überbeanspruchung der Umwelt ist also keine spezifische Folge der Marktwirtschaft, sondern im Gegenteil, sie ist Folge fehlender Märkte für Umweltgüter.

Die freie Nutzung von Umweltgütern führt zu Umweltschäden, zu externen Umweltkosten, die nicht dem Verursacher sondern Dritten, z. B. der Allgemeinheit oder auch zukünftigen Generationen angelastet werden. Die Internalisierung der externen Umweltkosten, d.h. die Inwertsetzung von Umwelt und Natur ist der Weg, die Nutzung knapper Umweltressourcen in das Marktgeschehen zu integrieren und sie den gleichen Bewirtschaftungsregeln zu unterwerfen wie die Nutzung anderer knapper Ressourcen. Die Integration der Nutzung knapper Umweltressourcen in das Marktgeschehen ist Aufgabe der ordnungspolitischen Rahmensetzung des Staates.

Angebracht ist an dieser Stelle aber ein kleiner Exkurs zu den „externen Kosten“. Externe Kosten werden heute nahezu ausschließlich mit Umweltschäden in Verbindung gebracht. Durch diese einseitige umweltpolitische Akzentuierung wird aber verdrängt, dass die Energiemärkte darüber hinaus durch eine Fülle von „Externalisierungstatbeständen“ geprägt sind. Mit externalisieren bezeichnet man den Vorgang des „Auslagerns“ von Kosten aus der Rechnung des Verursachers in die Rechnungen anderer. Wer Kosten externalisiert, verdrängt Kosten, anstatt sie - wie es sich gehört - im eigenen Budget zu verbuchen. Kosten die aber aus der Rechnung eines Verursachers herausbefördert werden, verschwinden ja nicht. Sie tauchen irgendwann in der Rechnung eines anderen unbeteiligten Dritten wieder auf. Die externalisierten Kosten werden Dritten „angelastet“.

Die Externalisierung bzw. die Anlastung von Kosten, beide sind untrennbar miteinander verknüpft, verfälschen das Kosten- und Preissystem, das im Marktprozess die zentrale Orientierung für alle wirtschaftlichen Entscheidungen darstellt. Falsche Preissignale aber führen eine Volkswirtschaft zwangsläufig weg vom Weg der gesamtwirtschaftlichen Effizienz, und das wiederum kann - zumindest auf Dauer - nicht ohne negative Auswirkungen bleiben.

Beispiele für Externalisierungstatbestände aus dem Energiebereich sind

- das Erneuerbare Energiengesetz
- die Förderung von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen
- die Kohlefinanzierung und auch
- die neue ökologische Steuer- und Abgabenreform.

Die Liste ist keineswegs vollständig. Für jede dieser Externalitäten gibt es sicher eine Begründung, sie dienen alle sicher einem guten Zweck. Aber man darf sich dadurch nicht blenden lassen, auf Dauer bleiben sie nicht ohne negative Konsequenzen für den Wirtschaftsstandort. Wenn wir über „Externe Kosten“ gerade im Zusammenhang mit der Energieversorgung sprechen, dann müssen wir sie aus dem ökologischen Käfig befreien, in den man sie in den letzten Jahren eingesperrt hat.

Diese mehr grundsätzlichen Darlegungen sollten deutlich machen, dass die Nutzung der Allokationsmechanismen von Wettbewerbsmärkten ein adäquater und zugleich effizienter Ansatz zur Verwirklichung einer nachhaltigen Entwicklung bzw. nachhaltigen Energieversorgung ist, wenn die Knappheit von Umweltgütern durch entsprechende marktkonforme Instrumente auf den Märkten wirksam wird. Zuvor wurde schon erläutert, dass Vollkosten als Maß für die Inanspruchnahme von knappen Ressourcen einschließlich der Umwelt das geeignete Kriterium für die Nachhaltigkeit von Energiesystemen ist. Auch dies spricht dafür funktionierenden Märkten die Steuerungsaufgaben auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung zu übertragen.

Zu der Integration der Umweltnutzung in das Marktgeschehen sei noch angemerkt, dass entsprechende Schritte der internationalen Verflechtung der Volkswirtschaften Rechnung tragen müssen. Der Wettbewerb auf offenen Märkten begrenzt diesbezügliche nationale Alleingänge, soll nicht der Verlust industrieller Produktion und von Arbeitsplätzen in Kauf genommen werden. Ein nationaler Alleingang birgt bei globalen Umweltproblemen, und um ein solches handelt es sich beim Treibhausproblem, darüber hinaus der Gefahr von ökologisch kontraproduktiven Wirkungen, wenn nationale Maßnahmen Umweltdumping zur Folge haben und die inländischen Reduktion von Schadstoffemissionen als Folge von Produktionsverlagerungen in Ausland mehr als wett gemacht werden. Damit wäre weder der Umwelt noch dem Wirtschaftsstandort gedient sondern nur Arbeitsplätze exportiert worden.

Eine Energie- und Umweltpolitik, die funktionierende Märkte in den Dienst von effizienter Ressourcennutzung und nachhaltigem Wirtschaften stellt, bedarf einer klaren und verbindlichen Gesamtkonzeption. Dabei sind auch die Rolle und Handlungsfelder der verschiedenen Akteure neu zu definieren. Ein marktwirtschaftlicher Ordnungsrahmen verträgt sich nicht mit staatlichen Interventionen und dirigistischen Eingriffen in das Marktgeschehen, sondern erfordert ein hohes Maß an unternehmerischer und konsumentenseitiger Freiheit. Liberalisierung und Wettbewerb bedeuten dabei keineswegs einen Verzicht auf Energie- und Umweltpolitik, sondern die Ausrichtung des Staates auf andere Handlungsfelder.

Zu diesen ordnungspolitischen Handlungsfeldern des Staates gehören insbesondere:

- die Schaffung und Sicherung funktionierender Märkte inklusive des Abbaus von Marktverzerrungen,
- die Integration der Nutzung knapper Umweltressourcen in das Marktgeschehen durch marktgemäße Instrumente,
- die Sicherstellung ausreichender, breit angelegter Forschung und Entwicklung im Energie- und Umweltbereich als einzig systematischem Weg, die notwendigen technischen Fortschritte und Innovationen für eine nachhaltige Energieversorgung zu erreichen und
- die Unterstützung der Markteinführung neuer marktnaher Energietechniken. Wobei diese Markteinführungshilfen marktkompatible Kriterien erfüllen müssen, die z.B. das derzeitige Erneuerbare Energiengesetz nicht erfüllt

6. Schlussbetrachtungen

Stellt man die Kernelemente der Energie- und Umweltpolitik der Bundesregierung auf den Prüfstand der Nachhaltigkeit, so werden sie diesem Leitbild nicht gerecht.

Die ökologische Steuerreform ist, anders als Bundeskanzler Schröder dies behauptet, eben keine längst überfällige Kehrtwende, die die Nutzung ökologischer Ressourcen endlich marktwirtschaftlicher Vernunft unterwirft. Sie genügt zentralen Anforderungen an ein ökologisches Steuerkonzept nicht, das Umweltbelastungen effizient zurückführen soll. Sie ist ökologisch nicht effizient und hat mit marktwirtschaftlicher Vernunft nichts gemein.

Mit Blick auf die Nachhaltigkeit ist der politisch gewollte Verzicht auf eine weitere Nutzung der Kernenergie eine kontraproduktive Maßnahme, die die Kosten der Erreichung von Klimaschutz- und Umweltqualitätszielen erheblich erhöht und dem Effizienzgebot des Leitbildes „Nachhaltiger Entwicklung“ nicht entspricht. Dies gilt wohl auch für das KWK-Fördergesetz.

Misst man die Energiepolitik der Bundesregierung an ihren eigenen Zielen und Ansprüchen, so lässt sich mit dem Alt-Oberbürgermeister von Stuttgart Manfred Rommel wohl zutreffend feststellen: „Hier wurde viel nachgedacht, quergedacht und umgedacht, aber wenig zu Ende gedacht.“

Die Bewältigung der vor uns liegenden Herausforderungen ist dabei gerade im Energiebereich weniger eine Frage fehlender technischer Problemlösungen, sondern sie ist, gerade in unserem Land, primär eine Frage der Entideologisierung ökonomischer, ökologischer und technischer Sachverhalte und einer in sich stimmigen Energiepolitik, also eine politische Aufgabe. Das energiepolitische Dilemma in unserem Land besteht zu einem Gutteil darin, dass wesentliche naturwissenschaftlich-technische und ökonomische Sachverhalte zur Fundierung einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Energiepolitik nicht zur Kenntnis genommen werden. Mit einer Energiepolitik gegen „Adam Riese“ bleibt eine nachhaltige Energieversorgung wohl nicht mehr als eine Vision.