

# Energieketten

von Ulrich Bünger,  
Bernd Höhlelein,  
Andreas Patyk  
und Martin Pehnt

Dr.-Ing. Ulrich Bünger, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBSt), Ottobrunn.

Prof. Dr. Bernd Höhlelein ist Leiter des Instituts für Energieverfahrenstechnik im Forschungszentrum Jülich (FZJ), Jülich.

Dr. rer.nat. Andreas Patyk ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU), Heidelberg.

Dipl.-Phys. Martin Pehnt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart.

## Überblick

Energiewandlungssysteme mit Brennstoffzellen können konkurrenzfähig werden, wenn technische Barrieren überwunden sind und die Frage nach dem optimalen Energieträger beantwortet ist. Die Wahl des optimalen Energieträgers und die für seine Bereitstellung erforderliche Infrastruktur bestimmen jedoch weitgehend, wann Brennstoffzellen im Verkehr und in der stationären Energiewandlung eingeführt werden können.

Mit der Energiekettenanalyse werden die Fahrzeugantriebe bzw. die Energiewandler zur stationären Erzeugung von Strom und Wärme mit der Brennstoffzelle verglichen. Elemente von Ökobilanzen werden als Instrument zur Bewertung von Energieketten und der mit ihnen möglichen Aussagen zu Ressourcenverbrauch und Umweltauswirkungen eingesetzt. Anhand von Beispielen für den mobilen und stationären Brennstoffzelleneinsatz wird ein Einblick in die aktuelle Diskussion um die Wirkungen und Bedingungen der Brennstoffzellentechnik in Deutschland und Europa gegeben.

Energy conversion systems using fuel cells can become competitive if technical barriers are overcome and the issue is resolved what fuel option will be the most optimal one. The choice of the most optimal fuel and the required infrastructure determine to a large extent at what point in time fuel cells can become an option in the transport and decentralized power generation sector.

Mobile propulsion systems and stationary systems for the generation of power and heat are compared with fuel cells using data from the analysis of the entire energy chain. Accounting of ecological effects is used as instrument for the assessment of the energy chain, the resource utilization and the environmental impact. Using mobile and stationary fuel cell applications as examples, an insight is provided into the actual German and European debate concerning effects of and conditions for applying fuel cells.

## 1. Energieketten und Brennstoffzellen

Für die elektrochemische Reaktion benötigten Brennstoffzellen einen wasserstoffreichen Energieträger. Wasserstoff ist jedoch meist nur Bestandteil fossiler oder regenerativer Brennstoffe, kann aber auch mit elektrischer Energie – die auch aus regenerativer Primärenergie gewonnen werden kann – aus

Wasser abgespalten werden. Die Flexibilität hinsichtlich des Brennstoffeinsatzes erlaubt also den Einsatz von Erdgas, Methanol, Kohle oder Benzin, aber auch die Verwendung holzartiger Biomasse, organischer Reststoffe oder regenerativen Stroms (Abbildung 1). Brennstoffzellen nehmen somit – wie andere Wasserstoff nutzende Umwandlungstechnologien auch – eine *Hybridstellung* zwischen fossilen und regenerativen Energiesystemen ein.

Die Stoff- und Energieströme eines Energieumwandlungssystems lassen sich als Energieketten grob in drei Phasen aufteilen. Die Bereitstellung des Energieträgers umfasst die Förderung, Aufbereitung und gegebenenfalls Umwandlung des Primärenergieträgers in einen für die beabsichtigte Nutzung geeigneten Sekundärenergieträger. Aus Transport- oder Verfahrensgründen können auch mehrere Umwandlungen stattfinden (siehe Abbildung 1). Die „Nutzung“ des Brennstoffes oder Kraftstoffes ist bei allen Systemen von herausragender Bedeutung. Die dritte Phase besteht aus den der Nutzung nachgelagerten Prozessen, beispielsweise der Entsorgung des Energiesystems am Ende seiner Lebensdauer bzw. der Entsorgung möglichen Prozessabfalls.

Bei der ökologischen und ökonomischen Bewertung innovativer Energiesysteme – wie hier der Brennstoffzellen-Systeme – sind aus zwei Gründen vollständige Energieketten im Vergleich mit zukünftigen konventionellen Systemen zu diskutieren:

### 1.1 Höhe der lokalen Schadstoffemissionen

Die direkten Schadstoffemissionen von Brennstoffzellensystemen sind extrem gering (Wasserstoff durch Reformierung von Methanol oder Kohlenwasserstoffen) bzw. nicht vorhanden (Wasserstoff im Tank). Im ersten Fall sind die Temperaturen zu niedrig für die  $\text{NO}_x$ -Bildung, die  $\text{CO}$ - und  $\text{NMVOC}$ -Emissionen sehr gering wegen des Katalytkonverters, da störende Gasbegleitstoffe, wie z.B. Schwefel, aus verfahrenstechnischen Gründen schon vor dem Brennstoffzellen-System entfernt werden müssen. Dies führt dazu, dass bei vielen Umwelteinwirkungen,

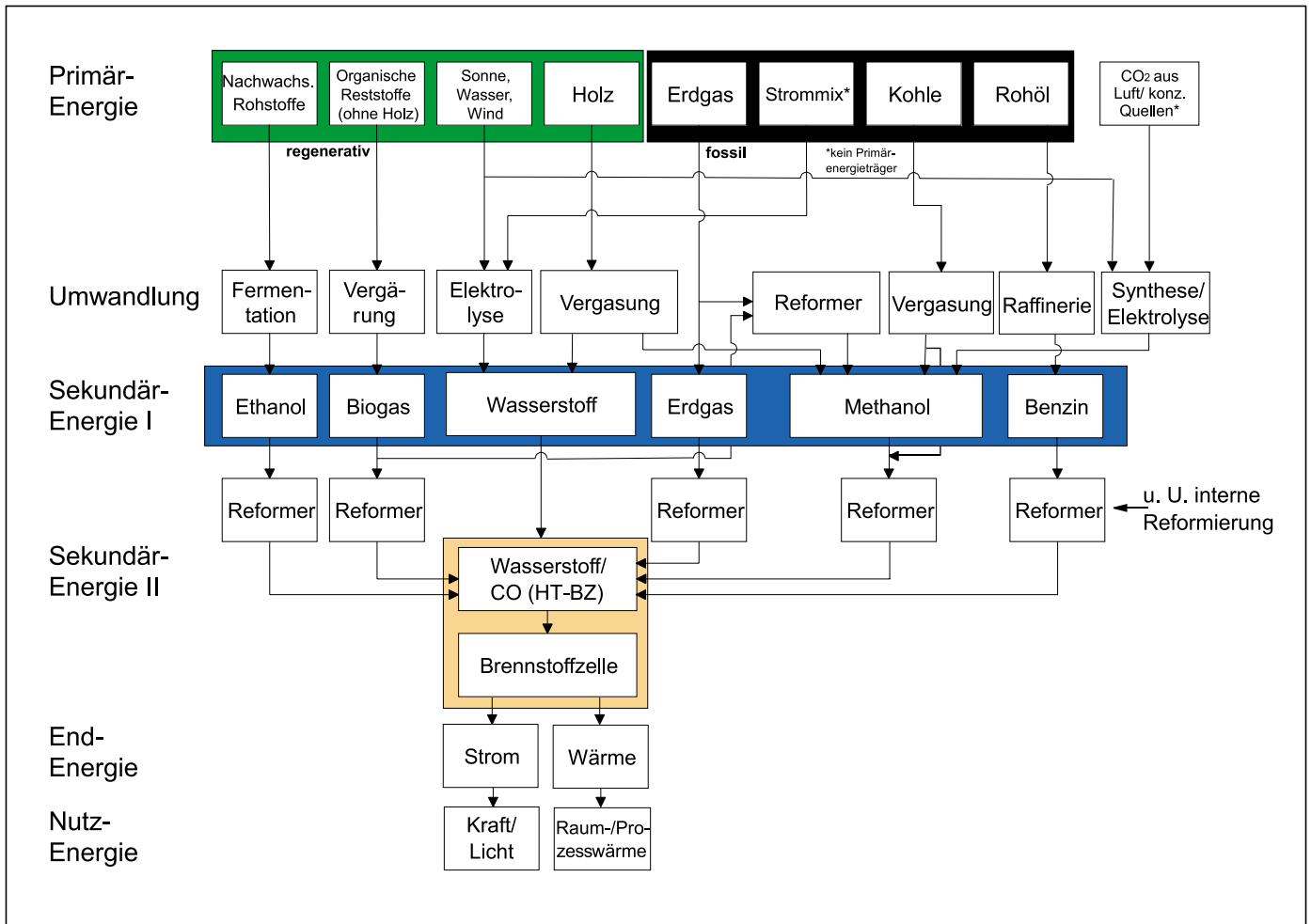
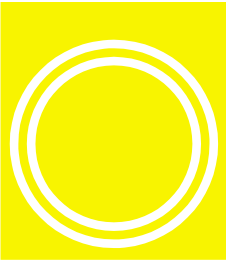


Abbildung 1: Fossile und regenerative Energiepfade für Brennstoffzellen

beispielsweise der Emission von versauernden Substanzen, die Energiekette über den Lebenszyklus betrachtet die einzigen Beiträge beisteuert. Bei der Bilanzierung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen, die mit Methanol (aus Erdgas hergestellt) betrieben werden, stammt das  $SO_2$  z.B. überwiegend aus den Emissionen durch den Transport des Methanols bzw. bei saurem Erdgas auch aus der Aufbereitung des Erdgas [1].

Die Umwelteinwirkungen der Energiekette, also insbesondere der Kraftstoffbereitstellung bis zur Entnahmestelle, sind von Bedeutung, weil durch sie im Vergleich zu konventionellen Energieumwandlungssystemen vorgegeben wird, welches Minimum an Umwelteinwirkungen durch Energiekonversion mit Brennstoffzellen erreicht werden kann. Die Energieerzeugung mit einer Gasturbine in industrieller Kraft-Wärme-Kopplung führt beispielsweise auf ca. 0,8 Gramm  $NO_x$  pro  $kWh_{el}$  [2]. Davon stammen 40% aus der vorgelagerten

Energiekette. Eine mit Erdgas betriebene Brennstoffzelle könnte also die verbleibenden 60% der direkten  $NO_x$ -Emissionen einsparen. Hinzu kommt eine Brennstoffeinsparung durch den höheren Wirkungsgrad.

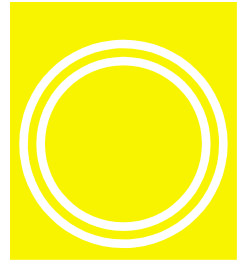
### 1.2 Infrastrukturelle Erfordernisse

Gerade für Fahrzeugantriebe erfordern Brennstoffzellen-Systeme einen – vom Kraftstoff abhängigen – infrastrukturellen Aufwand, da, wie im Fall von Methanol, die Markteinführung eines völlig neuen Kraftstoffes notwendig wäre. Grundsätzlich ist die Beibehaltung heutiger Sekundärenergieträger möglich: Der Einsatz von Erdgas in stationären Brennstoffzellen ist z.B. unproblematisch, die Umwandlung von Benzin – bei vorhandener Infrastruktur – in Wasserstoff an Bord von Kfz erfordert hingegen verfahrenstechnischen Aufwand.

Die Vorteile der Emissionsfreiheit und des hohen Wirkungsgrades von Brenn-

stoffzellen kommen vor allem mit Brennstoffen zum Tragen, die auf das Brennstoffzellen-System abgestimmt sind. Die Einführung von Wasserstoff als Kraftstoff wäre aus ökologischer Sicht optimal, besonders, wenn regenerative Primärenergieträger zum Einsatz kämen [3]. Allerdings ist der Aufbau einer Wasserstofflogistik mit hohen Investitionen verbunden. Auch der Aggregatzustand beim Transport des Wasserstoffes – beispielsweise Flüssigwasserstoff-Tanker hat starke Auswirkungen auf die ökologische Bewertung. Hinzu kommen Potenzialüberlegungen: Wie groß ist beispielsweise das Biomasse-Potenzial in verschiedenen Regionen und wie wird es optimal genutzt? Hier ergibt sich oft eine Konkurrenz zwischen der energetischen Nutzung der Biomasse im Fahrzeugbereich und im Kraftwerkssektor bzw. der Nutzung im Ernährungsbereich bzw. als Bau- und Werkstoff.

Die Umwelteinwirkungen lassen sich hinsichtlich des Anteils der Energie-



kette an den Gesamteinwirkungen in zwei Kategorien einteilen. Bei der ersten Kategorie ist der *Primärenergieträger* und nicht die Umwandlungstechnologie ausschlaggebend für den Anteil an den Umwelteinwirkungen. Hierzu zählen der Verbrauch erschöpflicher Ressourcen sowie das Treibhauspotenzial. Beispielsweise liegt der Anteil der Energiekette an den Gesamteinwirkungen hinsichtlich Ressourcenverbrauch und Treibhauspotenzial im Fall der stationären Stromerzeugungsanlagen zwischen 4% bei Braunkohle, 11-14% bei Erdgas und nahezu 100% bei biogenen Brennstoffen. Für Letztere werden bei der Umwandlung kein Verbrauch erschöpflicher Ressourcen und keine treibhauswirksamen CO<sub>2</sub>-Emissionen verbucht. Daher sind die einzigen – gegebenenfalls nur sehr geringen – Einwirkungen die der Energiekette (z. B. die Herstellung von Holzhackschnitzeln).

Die zweite Kategorie von Umwelteinwirkungen ist *technologiebestimmt*. Hier kann zwischen Brennstoffzellensystemen und konventionellen Systemen als Energieumwandlungseinheiten unterschieden werden. Für Brennstoffzellen liegt bei allen diesen Umweltkategorien der Anteil der Energiekette aufgrund der „sauberen Umwandlung“ bei über 90% [3].

## 2. Ökobilanzen als Instrument zur Bewertung von Energieketten

Beispiele und zahlreiche Studien zu verwandten Themen zeigen, dass die Bewertung der ökologischen Wirkungen von Energiesystemen nicht auf einen Prozessschritt und eine oder wenige Umwelteffekte begrenzt werden kann. Das Instrument der Wahl zur methodisch und hinsichtlich der Datenbasis und -verknüpfung konsistenten Erfassung und Bewertung der Umweltwirkungen komplexer Systeme stellt die Produkt-Ökobilanz dar. Wesentliche Charakteristika der Ökobilanz sind die Erfassung der gesamten Lebenswege der untersuchten Produkte von der Förderung der Rohstoffe bis zur Entsorgung bzw. dem Recycling der Produkte nach Ende der Nutzungsphase und soweit möglich der gesamten Umweltwirkungen. Die Vorgehensweise ist inzwischen in internationalen Normen der sogenannten ISO 14000-Familie weit-

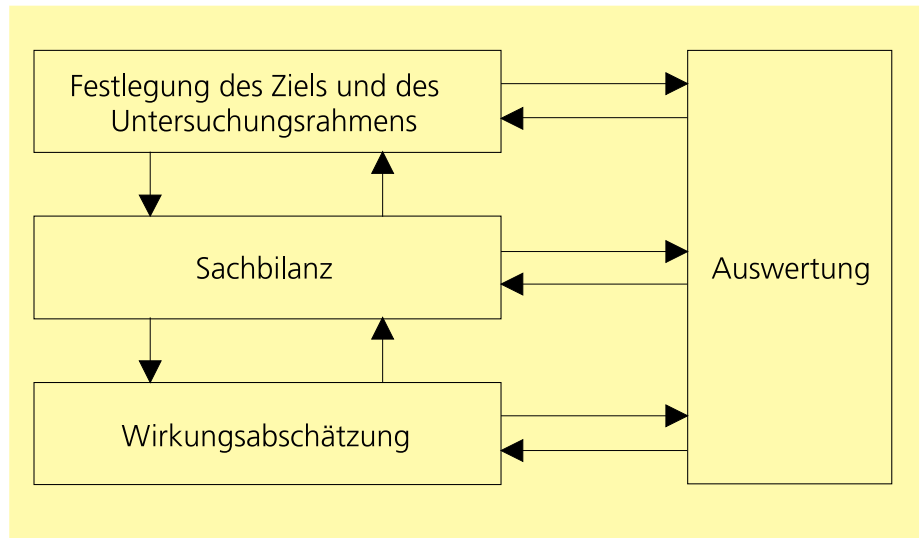


Abbildung 2: Bestandteile einer Produkt-Ökobilanz nach [4]

gehend verbindlich geregelt und soll kurz beschrieben werden.

Gemäß der erwähnten ISO-Normen umfasst eine Produkt-Ökobilanz vier Arbeitsschritte (siehe [Abbildung 2](#)), so genannte Phasen, die zum Teil iterativ durchgeführt werden und jeweils mehrere Teilschritte enthalten.

### 2.1 Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

In diesem Arbeitsschritt werden u.a. sowohl Hintergrund, Zweck und Zielgruppe der Studie festgelegt als auch die funktionale Einheit, die gesamten Lebenswege, geographische und zeitliche Systemgrenzen, betrachtete Umweltwirkungskategorien und Parameter definiert. Die Regeln dazu sind in der ISO-Norm 14041 [5] festgelegt.

### 2.2 Sachbilanz

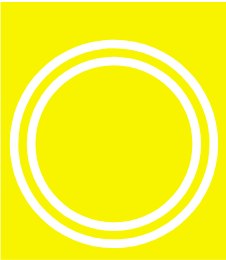
Die Erstellung der Sachbilanz umfasst im Wesentlichen das Sammeln und Aufbereiten der spezifischen Lebenswegdaten des Untersuchungsobjektes entsprechend den Vorgaben der Zieldefinition und Rahmenannahmen. Wesentliche Teilschritte sind die detaillierte qualitative Beschreibung der gesamten Lebenswege der betrachteten Produkte bzw. Systeme, die Entwicklung eines meist rechnergestützten Modells zur konsistenten quantitativen Beschreibung, die Erhebung spezifischer Daten (Energieverbrauch, Emissionen usw.) für die Einzelprozesse der Lebenswege und die Verknüpfung der Daten zu Sach-

bilanzen der Lebenswege mit dem Lebensweg-Modell. Regeln dazu sind ebenfalls in der ISO-Norm 14041 [5] festgelegt.

### 2.3 Wirkungsabschätzung

In der Wirkungsabschätzung werden die in der Sachbilanz erfassten Parameter in Umweltwirkungen übertragen und gegebenenfalls verschiedene Wirkungen zueinander in Relation gesetzt. Gemäß ISO 14042 [6] umfasst die Wirkungsabschätzung verbindlich drei Teilschritte. Die *Auswahl von Wirkungskategorien* (Beispiel: Treibhauseffekt) erfolgt in der Praxis bereits in der ersten Phase der Produkt-Ökobilanz. In der *Klassifizierung* werden Sachbilanzergebnisse Wirkungskategorien zugeordnet (Beispiel: Festlegung der in der Sachbilanz zu erfassenden klimarelevanten Stoffe). In der *Charakterisierung* erfolgt die Zusammenführung der Sachbilanzergebnisse der in der Klassifizierung festgelegten Stoffe z.B. über geeignete Äquivalenzfaktoren zu Wirkungsindikatoren (Beispiel: CO<sub>2</sub>-Äquivalente).

Als weitere, optionale Teilschritte sieht die ISO 14042 Bestandteile mit zum Teil *subjektiv wertendem* Charakter vor. In der *Normierung* werden die Wirkungsindikatoren als Relevanzprüfung auf die Gesamtwirkung, die z.B. von einem Land ausgeht, bezogen. Im Teilschritt *Ordnung* werden Wirkungskategorien nach verschiedenen Kriterien wie z.B. räumlicher Maßstab (global, regional, lokal), nominal (Einordnung) oder nach



ihre „Bedeutung“ auf einer ordinalen Skala (Rangbildung) geordnet. In der Gewichtung werden Indikatorergebnisse oder normierte Ergebnisse mit Faktoren gewichtet und gegebenenfalls die gewichteten Indikatorergebnisse der einzelnen Wirkungskategorien zusammengefasst.

In der Praxis erfolgt die Wirkungsabschätzung auf sehr unterschiedliche Art: Für einzelne Wirkungskategorien wie den Treibhauseffekt oder Versauerung stehen allgemein anerkannte Äquivalenzfaktoren zur Verknüpfung verschiedener Parameter mit gleicher Wirkung zur Verfügung. Für andere Kategorien ist dies nicht unbedingt der Fall; gegebenenfalls muss dann auf eine Zusammenführung verzichtet werden.

### 2.4 Auswertung

In der Auswertung werden die in der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung erhaltenen Ergebnisse zu einem Gesamturteil zusammengeführt, sowohl hinsichtlich der Belastbarkeit und Aussagekraft der Ergebnisse als auch – dem Zweck der Studie entsprechend – in Form von umweltbezogenen Bewertungen und Handlungsempfehlungen. Rahmenrichtlinien zur Auswertung sind in ISO 14043 [7] festgelegt. Bewertungen sind grundsätzlich nicht objektiv, sondern nur mehr oder weniger plausibel und akzeptiert durchführbar. Dementsprechend ist eine Reihe verschiedener Bewertungsverfahren gebräuchlich.

### 3. Brennstoffzellen und mögliche Energieträger für den Verkehr

Insgesamt ist die Brennstoffzellenentwicklung für die mobile Anwendung geprägt durch die Diskussion über den richtigen Kraftstoff, den Nachweis der Funktionstüchtigkeit der Brennstoffzellentechnik in der Anwendung, insbesondere im Langzeitbetrieb, die aus heutiger Sicht erforderliche Kostensenkung und die Machbarkeit der Markteinführung. Dabei stellt der Wasserstoff als direkter Kraftstoff für Brennstoffzellenantriebe die härtesten Anforderungen an den Aufbau einer Infrastruktur. Als mittelfristige Lösungsansätze sind Alkohole und Benzin in einer heute noch nicht beurteilbaren Konkurrenzsituation. Sollte sich langfristig von

Kraftstoffversorgern und Automobilherstellern der überwiegende Einsatz nicht-fossiler Energieträger (z.B. regenerativer Kraftstoffe) für den Massentransport unabhängig vom Antriebskonzept realisieren lassen, so würde die CO<sub>2</sub>-Frage weder für konventionelle noch für Brennstoffzellen-Fahrzeuge eine Rolle spielen.

Betrachtet man in Verbindung mit Brennstoffzellen unterschiedliche Kraftstoffe, so erfordern diese wesentliche Unterschiede in der Verfahrenstechnik der Nettostromerzeugung im Fahrzeug, nicht aber im Strommanagement und im Elektroantrieb nach dem Brennstoffzellen-System. Die anderen wesentlichen Unterschiede bezüglich der zu nutzenden Kraftstoffe liegen in der Kraftstoffbereitstellung bis zur Tankstelle begründet.

Die Analyse (Tabelle) der für den stationären Betrieb ermittelten Wirkungsgrade der Nettostromerzeugung ( $\eta_{NSE}$ ) – unabhängig vom E-Antrieb eines Fahrzeugs oder einem Fahrzyklus – zeigt für die drei in Konkurrenz zu diskutierenden Kraftstoffe Wasserstoff, Methanol und Benzin für Kohlenwasserstoffverbindungen unterschiedliche Wirkungsgradniveaus. Diese hängen entsprechend den verschiedenen Quellen ab vom Verfahren der Wasserstoffbereitstellung in der Brennstoffzelle (BDR, ATR, Shift/PROX, Membran), dem ausgewählten

Spannungswirkungsgrad ( $\eta_{Zelle}$ ) und der Wasserstoffnutzung in der Brennstoffzelle in Abhängigkeit vom Energiemanagement für das gesamte System.

Sowohl für hocheffiziente Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenantriebe als auch für einfache und effektive Methanolbetriebene Brennstoffzellenantriebe existiert heute keine Versorgungsinfrastruktur. Benzinbetriebene Brennstoffzellenantriebe haben den Vorteil eines bereits eingeführten, aus heutiger Sicht aber aufwändigen Systems der Kraftstoffbereitstellung. Ferner ist die Methanolgewinnung aus Erdgas und die Bereitstellung an Tankstellen in Deutschland energetisch um relativ etwa 30 % aufwändiger als die Benzinbereitstellung aus Erdöl. Das heißt zunächst, dass einem weniger effektiven (Energie, CO<sub>2</sub>-Bilanz) Benzinbetriebenen Brennstoffzellenantrieb im Vergleich zur Variante mit Methanol aus Erdgas [9] eine effektive Benzinbereitstellung gegenübersteht.

Nach [10] wird sich allerdings die Spezifikation der Kraftstoffbereitstellung für Benzin u.a. in Richtung „Null-Schwefel“ ändern müssen und damit auch die Effizienz der Benzin- oder Kohlenwasserstoffbereitstellung. Eine solche neue Spezifikation gilt als notwendige, aber möglicherweise nicht als hinreichende Voraussetzung für Brennstoffzellenantriebe und auch (aus

Quelle	System	Fuel	ATR	BDR	Shift PROX	Mem	H <sub>2</sub> -Nutz %	$\eta_{Zelle}$ %	$\eta_{NSE}$ %
MENZER [8]	FZJ	H <sub>2</sub>					100	55	47
MENZER [8]	FZJ	MeOH		✓		✓	100	55	40
MENZER [8]	FZJ	MeOH	✓		✓		91	55	38
LAMM [13]		MeOH		✓		✓		57	43
ETSU [12]	CJB	MeOH		✓	✓		80/90	50	31
ETSU [12]	CJB	MeOH		✓		✓	100	50	35
ETSU [12]	JM	MeOH	✓		✓		80	50	29
ETSU [12]	JM	MeOH	✓		✓		90	50	32
MENZER [8]	FZJ	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	✓		✓		91	55	37
FVV [10]	ANL	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	✓		✓			55	33
LAMM [13]		C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	✓		✓			52	32
ETSU [12]	JM	NG	✓		✓		80	50	27
ETSU [12]	BG	NG		✓	✓		80	50	28
ETSU [12]	BG	NG		✓	✓		90	50	31
ETSU [12]	BG	NG		✓		✓	100	50	24

ATR:	Autothermer Reformer	BDR:	Beheizter Dampfreaktor
Shift:	CO Konvertierung	PROX:	CO-Oxidation
Mem:	Gastrennmembran	H <sub>2</sub> -Nutz:	H <sub>2</sub> -Nutzung in Zellen
NG:	Erdgas	MeOH:	Methanol
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> :	als C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> oder Benzin	Fuel:	Kraftstoff
FZJ:	Forschungszentrum Jülich (D)	ANL:	Argonne National Lab.(USA)
ETSU:	Energy Technology Support Unit (GB)	CJB:	Wellman CJB (GB)
JM:	Johnson Matthey (GB)	BG:	British Gas Technology (GB)

Tabelle: Wirkungsgrade der Netto-Strom-Erzeugung mit PEFC (NSE)

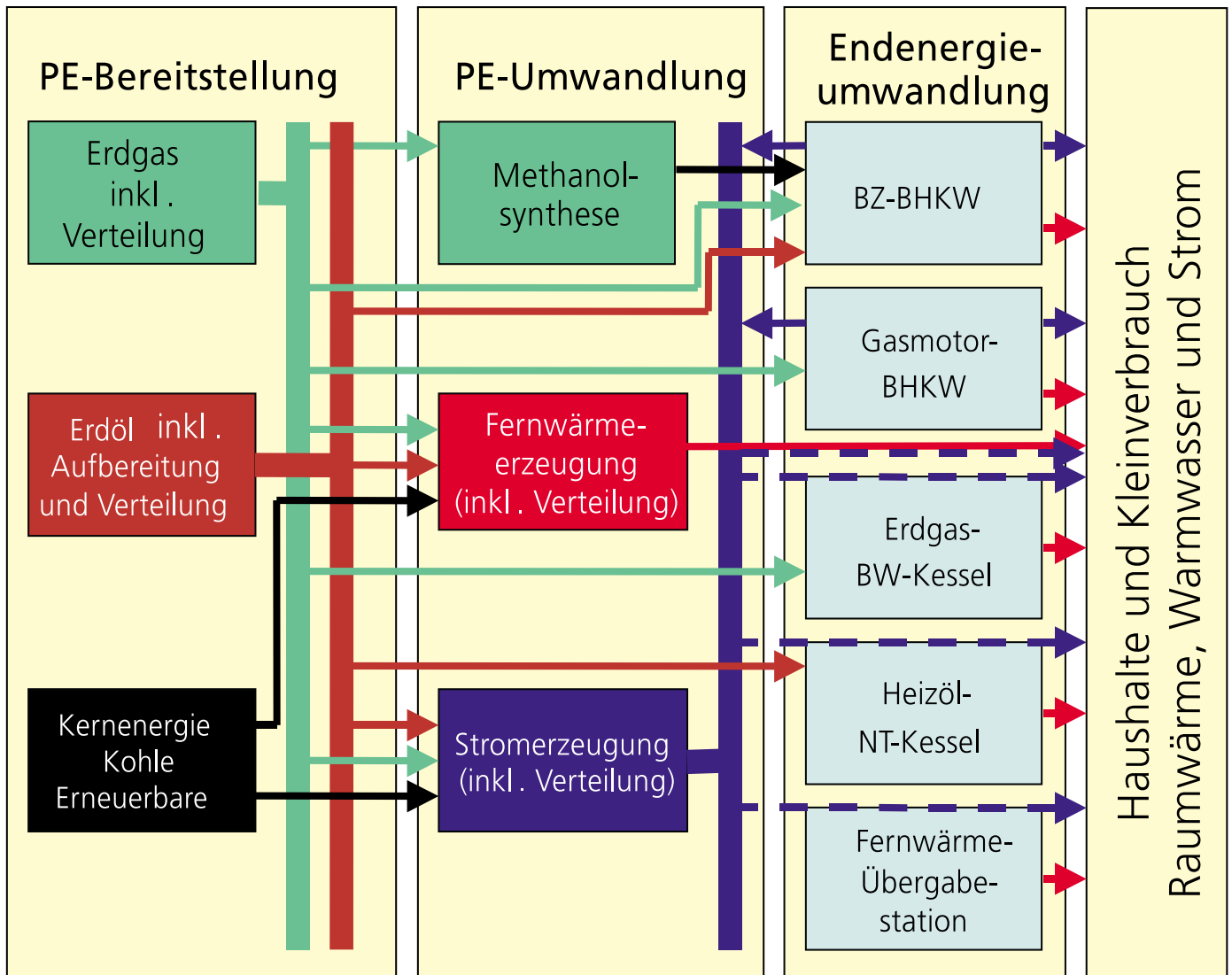
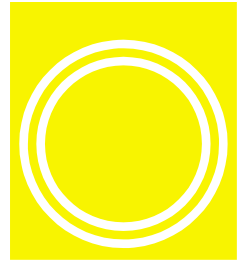


Abbildung 3: Strukturierung der Energiepfade in der dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung

anderen Gründen) für fortschrittliche verbrennungsmotorische Antriebe [11]. Dies bedeutet auch, dass sich durch die neue Art der Kohlenwasserstoffbereitstellung für Kfz-Antriebe (modifizierte Raffinerie, synthetische Kraftstoffe) für die Kraftstoffherzeugung neue Ökobilanzen ergeben würden. Daraus muss auch ein neuer Vergleich von Energieketten mit Brennstoffzellenantrieben für Methanol oder Benzin untereinander und auch mit fortschrittlichen Verbrennungsmotorantrieben der Zukunft für Kohlenwasserstoffgemische abgeleitet werden.

Einen nach der Methode der Produkt-Ökobilanz erstellten Vergleich der ökologischen Wirkungen konventioneller und Brennstoffzellen-Antriebe für PKW findet sich in [14]. Betrachtet werden die vollständigen Umwandlungsketten beim Einsatz verschiedener fossiler und regenerativer Energieträger.

#### 4. Stationärer Einsatz von Brennstoffzellen

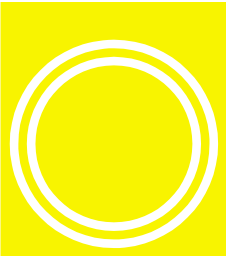
Anhand des Teilprojekts „Einsatzbedingungen stationärer Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung“ des Brennstoffzellenprojektes des Büros für Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages (TAB) gemeinsam mit den Berliner Energieversorgungsunternehmen BEWAG und GASAG [15] soll die Bedeutung der Energiekettenanalyse für den stationären Brennstoffzelleneinsatz erläutert werden. Die Einsatzmöglichkeiten kleiner Brennstoffzellen (1-250 kW<sub>e</sub> - Klasse) in der Hausenergieversorgung und im Kleinverbrauch werden zur Zeit untersucht.

Aufgabenstellung des Projekts ist unter anderem der Kosten- und Ökologievergleich unter Berücksichtigung verschiedener betrieblicher Parameter

(Betriebsmodell wie z.B. dezentrale Stromsubstitution oder dezentrale Stromerzeugung, und Betreibermodell wie z.B. privater Nutzer oder Energiedienstleister) für verschiedene Gebäudetypen und Baualtersklassen in Deutschland. Die Arbeit soll die wirtschaftlich-ökologischen Auswirkungen des Brennstoffzelleneinsatzes für das Versorgungsgebiet der BEWAG/GASAG und für Gesamtdeutschland abschätzen. Zu diesem Zweck wurden nach erfolgter Strukturierung der Energiepfade von der Primärenergiebereitstellung über die Energieumwandlung bis zu den Nutzungstechnologien (siehe Abbildung 3) die Energieketten und Emissionen mit dem Werkzeug E<sup>2</sup>-Database bilanziert.

Aus Sicht der ökologischen Bilanzierung erbrachte der Vergleich dieser Pfade bisher folgende wesentliche Erkenntnisse:





- Die Schadstoffemissionen entlang der Energiebereitstellungskette sind im Vergleich von mobilem und stationärem Einsatz (mit Ausnahme der Tankstelle im mobilen Fall) für Diesel und Heizöl etwa gleich, für Erdgas jedoch unterschiedlich, da anders als für den Fahrzeugeinsatz dieses nicht durch Verdichtung oder Verflüssigung aufzubereiten ist. Dasselbe gilt für den Einsatz von Wasserstoff.
- Die Schadstoffemissionen aus konventionellen Erdgas- oder Heizöl-Heizkesseln mit neuen Brennertechnologien sind bereits so niedrig, dass Brennstoffzellenaggregate mit Null-Schadstoffemissionen keinen herausragenden Vorteil mehr bringen, insbesondere unter Berücksichtigung der Weiterentwicklungen konventioneller Brenner (katalytische Verbrennung).
- Der wesentliche Vorteil kleiner Blockheizkraftwerke ist im Vergleich zu gewöhnlichen Raumheizungs- und Warmwasserkesseln der Effizienzvorteil bzw. die Vermeidung klimawirksamer Emissionen (CO<sub>2</sub> und dessen Äquivalente) durch zeitgleiche Verdrängung des vom öffentlichen Stromnetz bezogenen Stroms durch Kraft-Wärme-Kopplung.
- Der Einsatz von Brennstoffzellen (insbesondere Niedertemperatursysteme) zeichnet sich wegen der Flexibilität des Einsatzes gegenüber gasmotorbetriebenen BHKW durch eine noch effizientere Primärenergieausnutzung und CO<sub>2</sub>-Einsparung aus.
- Wenn die Brennstoffzellenentwicklung Systeme mit spezifischen Investitionskosten von ≤4.000 DM/kW<sub>el</sub> hervorbringen kann, kann eine Treibhausentlastung sowohl ohne zusätzliche Fördermaßnahmen erzielt als auch neue Geschäftsfelder bei der Energiebereitstellung für Haushaltskunden erschlossen werden.

## Literatur

- [1] Pehnt, M.  
„Ökobilanz von Methanol aus Holz und Erdgas“, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 4 (1999), 516-522
- [2] Dienhart, H., Pehnt, M., Nitsch, J.  
„Analyse von Einsatzmöglichkeiten und Rahmenbedingungen verschiedener Brennstoffzellensysteme in Industrie und zentraler öffentlicher Stromversorgung“, Gutachten im Auftrag des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Stuttgart (1999)
- [3] Pehnt, M.  
„Ganzheitliche Bilanzierung zukünftiger Energiesysteme: Brennstoffzellen und vorgelagerte Energieketten“, Dissertation an der Universität Stuttgart, Veröffentlichung Frühjahr 2000.
- [4] Deutsches Institut für Normung (DIN, Hrsg.): DIN EN ISO 14040. Umweltmanagement – Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen. Beuth Verlag, Berlin (1997)
- [5] Deutsches Institut für Normung (DIN, Hrsg.): DIN EN ISO 14041. Umweltmanagement – Ökobilanz – Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz. Beuth Verlag, Berlin (1998)
- [6] Deutsches Institut für Normung (DIN, Hrsg.): DIN EN ISO 14042. Umweltmanagement – Ökobilanz – Wirkungsabschätzung (Entwurf, Februar 1999). Beuth Verlag, Berlin (1999)
- [7] Deutsches Institut für Normung (DIN, Hrsg.): DIN EN ISO 14043. Umweltmanagement – Ökobilanz – Auswertung (Entwurf, Januar 1999). Beuth Verlag, Berlin (1999)
- [8] Menzer, R., Höhlein, B.  
„Verfahrensanalyse von Brennstoffzellensystemen zur Stromerzeugung für Elektroantriebe in Fahrzeugen bei Nutzung unterschiedlicher Kraftstoffe“, Berichte des Forschungszentrums Jülich, JÜL-3666, (Juni 1999)
- [9] Höhlein, B., Nitsch, J., Wagner, U. et al.  
„Ganzheitliche Systemuntersuchung zur Energiewandlung durch Brennstoffzellen, Brennstoffzellen-Studie“, Vorhaben 686, Heft 657, Abschlussbericht, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt am Main
- [10] Hart, D.  
„Hydrogen and Gasoline – Contenders for the Fuel Cell“, FT Automotive Environment Analyst, Issue 54, July 1999; Financial Times Business Ltd., London
- [11] Wedel, H. v.  
„Autobauer fordern besseren Kraftstoff“, VDI Nachrichten, 19.2.1999, Düsseldorf
- [12] ETSU  
„SPFC Bus Design Studies“, ETSU for the Department of Trade and Industry, Contractor: Johnson Matthey, prepared by Potter, I./ Reinkingh, J, ETSU F/02/00134/REP, London (1999)
- [13] Lamm, A.  
„PEM-BZ-Systeme für den mobilen Einsatz“, Konferenz im Haus der Technik, Essen (März 1999)
- [14] Patyk, A., Höpfner, U.  
„Ökologischer Vergleich von Kraftfahrzeugen mit verschiedenen Antriebsenergien unter besonderer Berücksichtigung der Brennstoffzelle“, Gutachten im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Heidelberg (1999)
- [15] Bünger, U., Berthold, O., Niebauer, P., Schindler, J., Schurig, V., Weindorf, W.  
„Analyse von Einsatzmöglichkeiten und Rahmenbedingungen von Brennstoffzellensystemen in Haushalten und im Kleinverbrauch in Deutschland und Berlin“, im Auftrag der BEWAG, GASAG und des Büros für Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages (1999)