

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fachbereich Ökötrophologie

Brennstoffzellentechnologie und ihr Einsatz im Privathaushalt

Erstellung eines 'Handbuch Brennstoffzellen'

Diplomarbeit

vorgelegt am: 31.08.2006

von:

Friederike Schmekal



Ref.:

Prof. Dr. Wolfhart Lichtenberg
Dipl. oec. troph. (FH) Karin Maring

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG	5
2 WASSERSTOFF ALS ENERGIETRÄGER FÜR BRENNSTOFFZELLEN	7
2.1 Globale Energieversorgung	7
2.2 Charakterisierung von Wasserstoff	8
2.2.1 Physikalische und chemische Eigenschaften	9
2.2.2 Energetische Eigenschaften	10
2.2.3 Richtlinien und Normen zum Umgang mit Wasserstoff	10
2.3 Erzeugung von Wasserstoff	11
2.3.1 Chemische Verfahren	11
2.3.2 Elektrolyse von Wasser	14
2.3.3 Biochemische Herstellung	17
2.4 Speicherung und Transport	19
2.4.1 Speichieranforderungen	19
2.4.2 Druckwasserstoffspeicherung	20
2.4.3 Flüssigwasserstoffspeicherung	21
2.4.4 Metallhydridspeicher	22
2.5 Substitution von erschöpfbaren Energiequellen und Kostenfaktoren	24
2.5.1 Nicht energetische Nutzung	24
2.5.2 Indirekt energetische Nutzung	25
2.5.3 Energetische Nutzung	26
2.5.4 Kosten	28
3 ANFORDERUNGEN AN DAS HANDBUCH/PFLICHTENHEFT	30
3.1 Zielgruppen	30
3.2 Vorkenntnisse	30
3.3 Lernziele	31
3.4 Hilfsmittel zum Erreichen der Lernziele	31
4 HANDBUCH	32
4.1 Deckblatt und Impressum	32
4.2 Historische Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie	34

4.3 Prinzipieller Aufbau einer Brennstoffzelle	35
4.3.1 Elektronenfluss	35
4.3.2 Bauarten	37
4.3.3 Brennstoffversorgung der PEM -Zelle	39
4.4 Anwendungsbereiche	40
4.4.1 Stationäre Anwendungen	41
4.4.2 Mobile Anwendungen	42
4.4.3 Portable Anwendung	43
4.5 Einsatz von Brennstoffzellen im Privathaushalt	43
4.5.1 Wandel der Energieversorgungsstruktur	43
4.5.2 Alternativen zur konventionellen Energieversorgung	46
4.6 Stand der Technik	53
4.6.1 Optimierung wichtiger Eigenschaften	53
4.6.2 Feldtest	54
4.7 Spezielle Chancen und Perspektiven der Brennstoffzelle	56
4.7.1 Umweltaspekte	56
4.7.2 Chancen und Risiken	59
4.7.3 Markteinführung	62
4.8 Rechtlicher Rahmen/Förderbedingungen	64
4.8.1 Gesetze/Novellierungen	64
4.8.2 Richtlinien für BSZ-Anlagen	66
4.8.3 Weitere Rahmenbedingungen	68
4.9 Glossar	70
5 EINBINDUNG DER TECHNOLOGIE IN HANDWERK UND GEWERBE	75
5.1 Berufliche Weiterbildung	75
5.1.1 Inhalte des Lehrangebots	76
5.1.2 Entwicklung von multimedialen Bildungskonzepten	78
5.2 Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt	79
5.2.1 Verlagerung von Beschäftigungsschwerpunkten	80
5.2.2 Neue Berufsfelder im Handwerk	83
6 ZUSAMMENFASSUNG/ABSTRACT	86
LITERATURVERZEICHNIS	89
BILDVERZEICHNIS	94
ANHANG	97

1 EINLEITUNG

Die Umstrukturierung des globalen Energiemarkts ist in den letzten Jahren zunehmend in das öffentliche Interesse gerückt. Nationale politische Entscheidungen, wie der Ausstieg der Bundesrepublik Deutschland aus der Atomenergie verstärken diese Tendenz. Auf internationaler Ebene wird durch die Entmonopolisierung der europäischen Strom- und Gasmärkte und auch die Absichtserklärungen von Regierungsvertretern auf weltweiten Klimagipfeln eine Umgestaltung der bisherigen Energieversorgungsstrukturen politisch unterstützt.

Aber auch hier muss erst eine Basis geschaffen werden, damit die Wirtschaft die Einführung erneuerbarer Energiequellen befürworten. Zudem ist es eine Aufgabe von Forschung und Entwicklung, die benötigten Systeme bereitzustellen und Aufgabe des Handwerks für einen einwandfreien Betrieb zu sorgen.

In diese Entwicklung muss auch die Bevölkerung mit einbezogen werden. Ökologische Aspekte treten immer mehr in den Vordergrund. Sie bilden den idealen Nährboden für die Entwicklung und Marktdurchdringung neuer Verfahren von Energieeinsatz und -umwandlung. Schon heute finden vermehrt alternative Energien ihren Weg in den Privathaushalt. Mit Photovoltaik, mit solarthermischen Anlagen oder auch mit Biomasse betriebenen Heizkesseln unterstützen Endverbraucher die ökologische Entlastung der Umwelt, auch unter ökonomischen Vorzeichen (Energiepreisentwicklung). Ebenso stehen BHKW-Heizanlagen immer mehr im öffentlichen Interesse. Sie stellen wie auch die Brennstoffzelle eine umweltfreundlichere Lösung als die Kernenergie dar und können auf erneuerbare Energieträger zurückgreifen.

In Zukunft wird die Brennstoffzelle verstärkt zur alternativen und dezentralen Versorgung beitragen. Durch ihre umweltschonende und zukunftsweisende Art der gekoppelten Erzeugung von Elektrizität und Wärme kann sie einen Meilenstein in der Hausenergieversorgung darstellen: Weg von den Kernkraftwerken und der fossilen Energiewirtschaft, hin zum Wasserstoff.

Das Zeitalter der Wasserstoffenergiewirtschaft wird nach dem Ende der fossilen Energienutzung erwartet und verfolgt das Ziel einer umweltverträglichen Energieversorgung. Hier werden regenerative Energiequellen, z. B. Wasserkraft, Wind- oder Sonnenenergie genutzt.¹ Ein Ausbau der regenerativen Energiegewinnungsstrategien ist ein wichtiger Ansatzpunkt für den Erhalt des Technologiestandorts Deutschland.

Die Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie ist so weit fortgeschritten, dass erste Anlagen bereits in Betrieb genommen wurden. Die Zahl der Hersteller ist überraschend hoch, insbesondere in Japan ist eine ganze Angebotspalette von Brennstoffzellen verfügbar. Erste Module sind dort bereits käuflich zu erwerben.² In Deutschland hat die Entwicklung bisher erst das Feldteststadium erreicht.

Bei dem heute vorherrschenden Entwicklungsstand der Brennstoffzellen-Technologie muss ein entsprechendes Marktfundament im Form von Fachkenntnissen und Informationsangeboten geschaffen werden. Die Einbindung von betroffenen Gewerken, hier größtenteils Handwerksbetrieben, bildet die Basis für die Einführung beim privaten Verbraucher. Hierzu soll in den kommenden Jahren ein Spektrum an Informations- und Schulungsangeboten entstehen.

¹ www.diebrennstoffzelle.de

² www.elektroauto-tipp.de

Das in dieser Arbeit erstellte Handbuch soll dazu beitragen, dem Handwerk einen Einstieg in die neue Technik zu ermöglichen. Das Handbuch ist vor allem der Vermittlung von Basiswissen an das Sanitär-, Heizungs-, Klima (SHK-) und Elektrohandwerk gewidmet und wurde als Lehrmittelunterstützung am Zentrum für Energie-, Wasser- und Umwelttechnik erstellt.

Das Handbuch soll keine vertiefte Reaktionskinetik erläutern, sondern dem Handwerk die Möglichkeit eröffnen, seinen Kunden möglichst breit gegliederte Basisinformationen zukommen zu lassen. Insbesondere die Erläuterung der ökologischen Merkmale der Brennstoffzellen-Technik ist wichtig für die Bewertung von Energieversorgungssystemen.

Die Wissensvermittlung im innovativen Bereich stellt besondere Ansprüche. Informationen können nicht einfach beliebig zusammengestellt werden. Es gilt, das Fachhandwerk vorsichtig an die Technik heran zu führen und nicht mit unnötig kompliziertem Detailwissen zu verunsichern.

Die Einbindung der Brennstoffzellen-Technik in Handwerk und Gewerbe stellt eine Herausforderung dar, die durch die zuständigen Institutionen und die Politik bald in Angriff genommen werden sollte. Das letzte Kapitel der Arbeit gibt einen Einblick von verschiedenen Seiten auf die benötigten Maßnahmen, erläutert Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt und zeigt die Dringlichkeit der Weiterbildung auf.

Zudem muss in dieser Arbeit die Wasserstofftechnik als Hintergrundwissen dargelegt werden. Wasserstoff gilt als der Energieträger der Zukunft. Mit neuartigen Elektrolyse- oder chemischen Erzeugungsverfahren ist Wasserstoff heutzutage mit geringem Aufwand zu gewinnen. Auch die Speichermöglichkeiten sind bei Wasserstoff perspektivisch sehr viel günstiger zu bewerten als bei anderen alternativen Energieträgern. Für den portablen, mobilen oder stationären Einsatz stellt Wasserstoff eine sinnvolle Alternative zu den Energieträgern Benzin, Heizöl oder auch Kohle dar.

2 WASSERSTOFF ALS ENERGIETRÄGER FÜR BRENNSTOFFZELLEN

2.1 Globale Energieversorgung

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe schätzt, dass die sicheren Reserven von Kohle noch rund 170 Jahre, von Erdgas noch rund 65 Jahre und von Erdöl noch ganze 42 Jahre reichen – eine weitere Förderung auf derzeitigen Niveau vorausgesetzt (siehe Tab. 1).^{3/4} Das bedeutet zwar nicht, dass diese fossilen Vorräte nach Ablauf dieser Zeiträume vollkommen erschöpft sind; allerdings werden sie aus heutiger Sicht wirtschaftlich nicht mehr abbaubar sein.⁵ So ist festzustellen, dass die heute verfügbaren und nutzbaren Energiereserven nur noch begrenzte Zeit einsatzfähig sind – ein schonender Umgang mit den Energierohstoffen ist unumgänglich.⁶

Tabelle 1: Vorräte an Primärenergieträgern (Quelle: BMWI, 2001, S. 7)

	Sicher gewinnbare Reserven (in Mrd. t SKE)	Reichweite der sicheren Reserven (in Jahren)	Geschätzte zusätzliche Reserven (in Mrd. t SKE)
Kohle	558	169	6110
Erdöl	227	43	113
Erdgas	180	66	267

In der Diskussion um die Nutzung fossiler Energien sollte aber nicht nur die Endlichkeit der Rohstoffe betrachtet werden, sondern auch der Treibhauseffekt. Die in diesem Jahrhundert betrachtete globale Klimaerwärmung lässt nach Ansicht vieler Wissenschaftler kaum noch Zweifel daran, dass eine Verstärkung dieser natürlichen Prozesse auf die zunehmende Freisetzung klimawirksamer Gase in Folge menschlichen Handelns zurückzuführen ist. Bei diesen Gasen handelt es sich im Wesentlichen um Kohlendioxid (CO₂), das als Abfallprodukt in großen Mengen bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen in die Atmosphäre gelangt. Die Industrieländer sind an der CO₂-Produktion in unterschiedlichem Ausmaß beteiligt (siehe Bild 1).

Nach einer Studie des Weltwirtschaftsrates für nachhaltige Entwicklung (2004) wird eingeschätzt, dass sich der Kohlendioxidausstoß bis zum Jahr 2050 (Basis 2000) auf rund 16 Mrd. Tonnen verdoppeln wird. Beim ersten Weltgipfel in Rio (1992) wurde in der Konvention über den Klimawandel dagegen das Ziel formuliert, den CO₂-Ausstoß bis zum Jahre 2050 um 80% zu senken. Auch produzierende Gewerbe sind nun darauf angewiesen, möglichst fortschrittliche Energieversorgungssysteme in ihre Systemabläufe zu integrieren.

³ BMWI, 2001, S. 7

⁴ www.diebrennstoffzelle.de/wasserstoff/index.shtml

⁵ Rechnet man jedoch das so genannte „unkonventionelle“ Erdöl, wie Schweröl oder Teersande mit ein, ergibt sich eine Reichweite von über 100 Jahren.

⁶ Die Internationale Energieagentur (IAE) prognostiziert für die kommenden Jahre einen Anstieg der globalen Stromnachfrage um durchschnittlich 2,7 % pro Jahr. Das entspricht etwa der 30-fachen Kapazität der derzeitigen deutschen Kraftwerksparks.

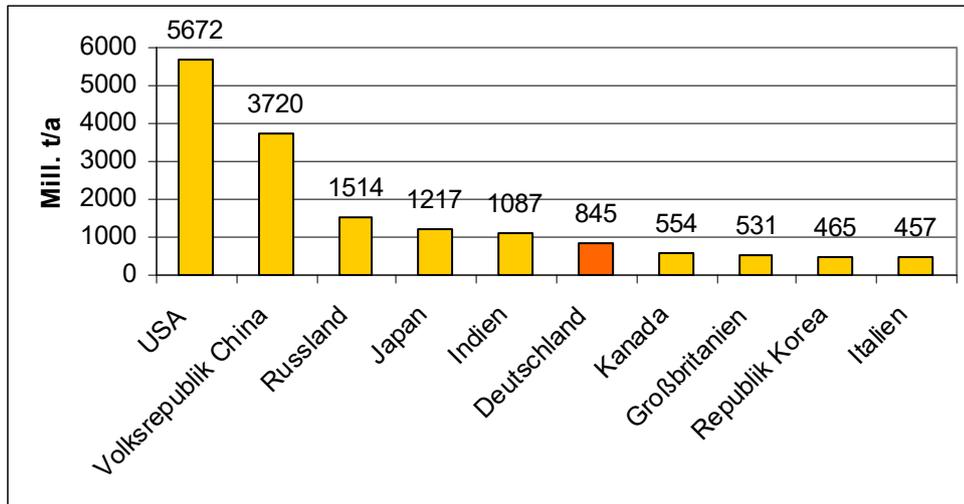


Bild 1: Hauptverursacher energiebedingter CO₂-Emissionen (Quelle: Stat. Bundesamt, 2005, S. 56)

Einen ersten Ansatzpunkt zur Senkung des Energieverbrauchs bietet der private Wohn- und Gebäudebereich (der Anteil der privaten Haushalte am direkten Energieverbrauch liegt bei rund 27 % für 2003⁷). Der Heizenergieverbrauch, sowie der Energieaufwand zur Warmwasserbereitung sind in einem wesentlichen Maße reduzierbar, z.B. durch die Niedrigenergie- Bauweise. So konnte im Jahr 2003 gegenüber dem Jahr 1991 ebenfalls der Schadstoffausstoß erheblich reduziert werden (9,4 % der CO₂, sowie 57,6 % der NO_x Emissionen).⁸ Allerdings ist zu beachten, dass in diesem Zeitraum die Industrieanlagen in den neuen Bundesländern weitestgehend stillgelegt wurden. Die erhöhte Effizienz bei Energieeinsatz, d. h. eine Steigerung der Prozentualen Ausbeute je eingesetzter Einheit kann ebenfalls eine deutliche Entlastung der Umwelt bewirken (siehe Tab. 2).

Tabelle 2: CO₂-Emissionen und Steinkohleeinsatz bei 1 kWh_{el} (Quelle: BMWI, 2001, S. 36)

Jahr	Kohleinsatz in g/kWh	CO ₂ -Ausstoß in g/kWh
1985	330	870
2001	260	705
2010 (Prognose)	220	600

Neben der rationellen Nutzung von Energieressourcen und der Senkung des Energieverbrauchs ist es auch wichtig, frühzeitig nach neuen Verfahren zu suchen und weitere Technologiepotenziale zu erschließen. Die BSZ-Technologie ist ein Paradebeispiel für den effizienten Einsatz von Erdgas. Sie steht gleichermaßen für Ressourcen- und Klimaschutz.

2.2 Charakterisierung von Wasserstoff

Wasserstoff wird bereits heute als Rohstoff und Energieträger im Wirtschaftskreislauf eingesetzt. Zur objektiven Beurteilung der Eigenschaften, der Risiken und der Anwendung von Wasserstoff wird im Folgenden ein Vergleich mit den Brenngasen Methan (CH₄) und Propan (C₃H₈), sowie gegebenenfalls weiteren Energieträgern angestrebt. Die konventionellen, weit verbreiteten Energieträger stehen in unmittelbarer Konkurrenz zur Wasserstoffenergiewirtschaft.

⁷ Statistisches Bundesamt, 2005, S. 23

⁸ Statistisches Bundesamt, 2005, S. 23

2.2.1 Physikalische und chemische Eigenschaften

Wasserstoff ist das häufigste Element im Universum; über 90 Prozent aller Atome und $\frac{3}{4}$ der gesamten Erdmasse besteht aus Wasserstoff. Wasserstoff ist das einfachste und leichteste Element. Das Atom besteht aus einem Proton und einem Elektron.

Das chemische Symbol H steht für Hydrogenium, d.h. 'Wasserbildner'; Wasserstoff tritt als zweiatomiges Molekül auf. In der Natur kommt Wasserstoff wegen seiner hohen chemischen Aktivität nur in seltenen Fällen, z.B. in höheren Schichten der Atmosphäre, ungebunden vor. Der überwiegende Teil des Wasserstoffs auf der Erde ist in Wasser (an Sauerstoff gebunden) vorhanden. Andere natürliche Vorkommen sind Kohle, Fossilien und natürliche Gase wie Methan (CH_4). Aus den Verbindungen kann der Wasserstoff molekular herausgelöst werden.⁹

Molekularer Wasserstoff ist bei normaler Temperatur ein farb-, geruchs- und geschmackloses Gas. Das Gas hat eine geringe Dichte (ca. 14-mal leichter als Luft) und steigt schnell in höhere Luftschichten auf. Diese Eigenschaft, Sauerstoff zu verdrängen ist die Ursache für das Explosionsrisiko. In Tabelle 3 sind einige wichtige physikalische und chemische Kennzahlen von Wasserstoff und anderen Brenngasen dargestellt.¹⁰

Tabelle 3: Physikal. und chem. Kennzahlen (Quelle Nr.: 39, 53, www.hyweb.de)

Eigenschaft	Einheit	Wasserstoff	Methan (Erdgas)	Propan
Chemisches Zeichen		H_2	CH_4	C_3H_8
Molare Masse	g/mol	2,016	16,043	44,097
Normdichte	kg/m ³	0,090	0,718	2,011
Gaskonstante	J/kgK	4124,000	518,800	188,500
Eigenschaften am Siedepunkt bei 1,013 bar				
Siedetemperatur	K	20,300	111,600	231,100
Flüssigkeitsdichte	g/l	70,800	422,500	580,700
Gasdichte	g/l	13,380	1,820	2,420
Heizwert (Energiegehalt ohne Kondensationsenergie des bei Verbrennung erzeugten Wasserdampfes)				
	kJ/kg	119.972	50.020	46.350
	kWh/kg	33,330	13,900	12,880
	MJ/m ³ _N	10,783	35,882	93,215
	kWh/m ³ _N	2,995	9,968	25,893
Brennwert (Energiegehalt ohne Kondensationsenergie)				
	kJ/kg	141.890	55.350	50.410
	kWh/kg	39,410	15,420	14,000
	MJ/m ³ _N	12,745	39,819	101,242
	kWh/m ³ _N	3,509	11,061	28,123

⁹ <http://wasserstoff.know.libary.net>

¹⁰ Römpp, CD-Rom Chemie Lexikon, 1995

2.2.2 Energetische Eigenschaften

Wasserstoff als Energieträger tritt in Konkurrenz zu den bereits schon lange Zeit eingesetzten Energieträgern wie Erdgas, Propan oder konventionellen Treibstoffen. Bei der Anwendung der jeweiligen Energieträger sind die gewichts- und volumenspezifischen Energiedichten von Bedeutung. In Tabelle 4 sind die massen- und volumenbezogenen Energiedichten verschiedener Brenngase und Treibstoffe in unterschiedlichen Speicherformen bezogen auf den Heizwert aufgeführt.

Tabelle 4: Energiedichten von Energieträgern u. Speicherformen (Quelle: www.hyweb.de, www.udomi.de)

Energieträger	Speicherform	Massenbezogene Energiedichte (in kWh/kg)	Volumenbezogene Energiedichte (in kWh/l)
Methanol	Flüssig	5,6	4,42
Diesel	Flüssig	11,6	9,7
Benzin	Flüssig	12,7	8,76
Propan	Flüssig	12,9	7,5
Erdgas	Gas 200 bar	13,9	2,58
	Flüssig mit -162 °C	13,9	5,8
Wasserstoff	Gas 200 bar	33,3	0,53
	Flüssig mit -253 °C	33,3	2,36
	Metallhydrid	0,58	3,18

Ein Vorteil von Wasserstoff gegenüber konventionellen Brennstoffen liegt in der hohen spezifischen Energiedichte pro Masseneinheit. 1 kg Wasserstoff enthält mehr als doppelt so viel Energie wie 1 kg Erdgas oder fast dreimal so viel Energie wie 1 kg Diesel. Der Energiegehalt von Wasserstoff pro Volumeneinheit hingegen kann mit dem anderer Brennstoffe nicht mithalten.

Die bisherige Anwendung von Wasserstoff als Energieträger spezialisiert sich aus diesem Grund auf die Bereiche, in denen das zu transportierende Gewicht von Bedeutung ist, z. B. in der Raumfahrt oder im militärischen Bereich. Das Vorstoßen in neue Einsatzgebiete (Speicherformen), in denen die volumenbezogene Energiedichte entscheidend ist für Wasserstoff erforderlich. Die massenbezogene Energiedichte von flüssigem Wasserstoff (LH₂) liegt schon im Bereich von Erdgas. Um einen aussagekräftigen Vergleich der Brennstoffe in der Anwendung anstellen zu können, sollten aber die gesamten Speichergewichte und nicht nur die reinen Brennstoffgewichte berücksichtigt werden.

2.2.3 Richtlinien und Normen zum Umgang mit Wasserstoff

Als komprimiertes oder tiefkalt verflüssigtes Gas fällt Wasserstoff unter die entsprechenden einschlägigen Regelwerke für brennbare Gase. In Deutschland existiert kein nationales, wasserstoffspezifisches Regelwerk, da keine besonderen Gefahren von ihm ausgehen.

Normungsbedarf besteht in absehbarer Zeit durch die Einführung als Treibstoff in den Verkehr (Zulassungsvorschriften). Auch die Entwicklung neuer Materialien für Speicherbehälter und neuen Speicherformen bedarf einer sicherheitstechnischen Betrachtung in entsprechenden Normen, wie dies bisher auch für die schon verbreitete Speicherung in Stahlflaschen der Fall ist. In 'Wasserstoff in der Energiewirtschaft' (Zittel, W., 1996) ist eine umfangreiche Zusammenstellung der anwendbaren nationalen Regelwerke für alle Bereiche der Wasserstoffwirtschaft aufgeführt.

2.3 Erzeugung von Wasserstoff

Die jährliche Wasserstoffproduktion liegt derzeit bei über 500 Mrd. Normkubikmetern. Der größte Teil davon stammt aus fossilen Energiequellen (Erdöl, Erdgas), aus der chemischen Industrie (entsteht als Nebenprodukt bei der Chlorherstellung) und aus Rohölraffinerien.¹¹

Wasserstoff gilt als Sekundärenergieträger; in der Natur kommt er nur in gebundener Form vor. Erst durch den Einsatz einer weiteren Energiequelle kann Wasserstoff isoliert werden. Die externen Energiequellen, die bei der Produktion von Wasserstoff als Kohlenstofflieferant dienen, sind erschöpfbare Energieträger (Erdöl, Erdgas, Kohle). Bei der Verwendung von Sekundärenergieträgern als Kohlenstofflieferant ist nach dem Ursprung (Primärenergie oder regenerative Energie) zu differenzieren.

Bei der Erzeugung von Wasserstoff werden prinzipiell drei verschiedene Verfahren unterschieden¹²:

- Chemische Verfahren
- Elektrolyse von Wasser
- Biologische Prozesse

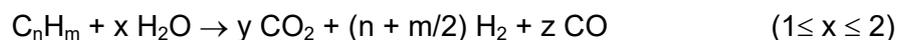
2.3.1 Chemische Verfahren

Bei konventionellen chemischen Verfahren basiert die Wasserstoff-Produktion auf einer Redoxreaktion. Wasser reagiert dabei mit Kohlenstoff oder Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid und Wasserstoff.

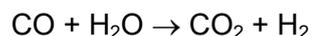
- **Dampfreformer (Erdgas)**

Die Dampfreformierung ist in zwei Teilschritte unterteilt. Im ersten Schritt erfolgt eine endotherme katalytische Umsetzung von Kohlenwasserstoffen, z. B. Methan mit Wasserdampf. Dieser Vorgang erfolgt in großtechnischen Anlagen bei Temperaturen von 800 bis 900 °C und einem Druck von ca. 25 bar. Als Reaktionsprodukt entstehen Kohlenmonoxid, -dioxid und Wasserstoff.

Allgemeine Reaktionsgleichung:



Der zweite Prozessschritt, die exotherme katalytische Umsetzung des entstandenen Kohlenmonoxids mit Wasserdampf wird auch Shiftreaktion genannt:



Das entstandene Gas wird einer Reinigung unterzogen, in der das Kohlendioxid und andere unerwünschte Bestandteile entfernt werden. Nach Abspaltung des Wasserstoffs verbleibt sog. Restgas, das bis zu 60 % brennbare Verbindungen enthält. Es wird zur Befeuerung des Reformers verwendet.

Die Verfahren der Dampfreformierung sind mittlerweile technisch sehr ausgereift. Es bestehen große Reformierungsanlagen mit Produktionskapazitäten von bis zu 50.000 m³_N Reinstwasserstoff pro Stunde. Die Wasserstoffentstehungskosten errechnen sich zu rund 10

¹¹ www.diebrennstoffzelle.de

¹² BMWA, Forschungsbericht 546, S. 22-28

Cent/kWh (LH₂), wobei die Primärenergiebezugskosten und die Personalkosten in der Berechnung ausschlaggebend sind.¹³

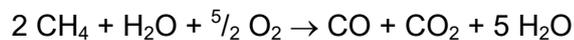
Der Gasanbieter Linde deckt mit über 820 Lieferstellen in ganz Deutschland rund 60 % der Wasserstoffproduktion hierzulande ab.¹⁴

- **Partielle Oxidation (Ölvergasung)**

Das technisch ausgereifte Verfahren (Texaco-Verfahren) der partiellen Oxidation ist eine exotherme Umsetzung von Schweröl und schweren Kohlenwasserstoffen, wie z.B. Rückstandsölen aus der Erdölverarbeitung, mit Sauerstoff.

Die Eingangstoffe werden bei Temperaturen von 1.300 bis 1.500 °C in einer Flammenreaktion unter Dampf- und Sauerstoffzusatz durch partielle Oxidation aufgeschlossen. Durch entsprechende Bemessung der Sauerstoff- und Wasserdampfmengen läuft die Vergasung autotherm ab, d. h. ohne äußere Energiezufuhr. Als Ausgangsstoff entstehen Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Wasserstoff.¹⁵

Es findet eine ganze Anzahl von Reaktionen statt, z. B.:



Das entstandene Gas wird nun ähnlich wie bei der Dampfreformierung einer CO Reinigung unterzogen.

Partialoxidatoren sind großtechnisch einsetzbar und werden mit üblichen Kapazitäten von 110.000 m³ /h (Deutschland) angeboten. Die Wasserstoffgestehungskosten errechnen sich zu etwa 6 Cent/kWh, abhängig von den Primärenergiekosten und dem Personalaufwand.¹⁶

In Kohleförderländern wie Südafrika oder China wird Wasserstoff auch durch partielle Oxidation von Kohle gewonnen. Dieses Verfahren ist ähnlich der Ölvergasung, nur das eine Kohlebehandlung vorangeht.

Die Kohle wird hierbei zermahlen und mit Wasser zu einer pumpfähigen Suspension, mit einem Feststoffgehalt von 50 bis 70 %, vermischt. Bei Temperaturen von 1.400 bis 1.600 °C läuft die Vergasung autotherm unter Zusatz von Sauerstoff und Dampf ab. Die Vergasungsreaktion wird entweder in einer Flugstaubflamme (Koppers-Totzek-Verfahren), in einem abbrennenden Festbett (Lurgi-Druckvergasung) oder in einem abbrennenden Wirbelbett (Hochtemperatur-Wirbelvergaser) durchgeführt.¹⁷ Bis zum 2. Weltkrieg wurde die Hauptmenge des Wasserstoffs durch Kohlevergasung erzeugt.

- **Autotherme Reformer (Methanolreformierung)**

Anstelle von Erdgas wird auch Methanol zur Wasserstoff-Herstellung verwendet, wobei grundsätzlich sowohl die Dampfreformierung (unter Wärmezufuhr) als auch die partielle Oxidation (unter Wärmefreisetzung) genutzt werden können.

Die Kombination aus beiden Verfahren wird autotherme Reformierung genannt. Dieses Verfahren kann sowohl mit Methanol als auch mit Erdgas, Benzin oder Diesel angewandt

¹³ BMWA, 2005, S. 55

¹⁴ www.hydrogeit.de

¹⁵ www.aves-zh.ch

¹⁶ www.hyweb.de

¹⁷ Pichler, H., et al., 1970, S. 133

werden, ermöglicht aber wesentlich höhere Wirkungsgrade als eine partielle Oxidation allein. Die Wasserdampf- und Luftzufuhr wird so eingestellt, dass der exotherme Reaktionsablauf der partiellen Oxidation den Energiebedarf der Dampfreformierung deckt.¹⁸

Anfang des Jahres 1998 gelang es am Paul-Scherrer-Institut (PSI/Schweiz) durch die autotherme Reformierung die Ausbeute wesentlich zu steigern. Die Wasserstoff-Produktionsrate (16.000 L pro Stunde und pro Liter des Reaktorvolumens) übertrifft den besten publizierten Wert um ein Drittel. Wenn es gelingt die erforderlichen Zusatzaggregate klein zu halten, kann eine wesentliche Anforderung erfüllt werden, die zurzeit noch die Hersteller von mobilen Brennstoffzellen beschäftigt: Der Methanolreformer sollte weniger Gewicht und Volumen aufweisen als das Brennstoffzellen-Aggregat das die Leistung erzeugt.

- **Nachbehandlung von Wasserstoff**

An die Reinheit des produzierten Wasserstoffes werden höchste Anforderungen gestellt, denn geringste Spuren von Kohlenmonoxid beeinträchtigen die Aktivität des Edelmetallkatalysators in einer Brennstoffzelle. Für das in Wasserstoff-Brennstoffzellen verwendete Platin wird ein CO-Volumenanteil von 10 ppm als obere akzeptable Grenze angesehen. Solche Werte können nur mit einer Nachreinigungseinheit erreicht werden. Reinsten Wasserstoff kann durch Palladiummembranen mit geeigneten Zusätzen abgetrennt werden, doch macht deren geringe Durchlässigkeit große Membranflächen und die Verwendung hoher Drucke erforderlich.

Große Membranflächen verursachen jedoch hohe Kosten resultieren und hohe Drucke beeinträchtigen den Gesamtwirkungsgrad wegen der erforderlichen Kompression des Reformats. Um das Potenzial der Methode auszuloten, werden am PSI neue Membrantypen auf ihre Eignung im realen Reformatgas untersucht. Alternativ zur Membrantechnik wird eine Reihe katalytischer Verfahren ausprobiert. Die Aufgabe, kleinste Mengen von CO zu CO₂ zu oxidieren, ohne den in großem Überschuss vorhandenen Wasserstoff zu verbrennen, stellt eine Herausforderung an die Entwicklung dar.¹⁹

- **Entwicklungen im Bereich der konventionellen chemischen Verfahren**

a) Kvaerner-Verfahren

Die Kvaerner Engineering S.A. aus Norwegen entwickelt seit den achtziger Jahren ein Verfahren zur CO₂-freien Herstellung von Aktivkohle und Wasserstoff (Kvaerner Carbon Black and Hydrogen Prozess, Plasmabogenprozess). Bei einer Temperatur von 1.600 °C trennt ein Plasma-Brenner unter Einwirkung von Strom und Kühlwasser Kohlenwasserstoffe wie Erdgas oder Öl in Aktivkohle und Wasserstoff. Als Nebenprodukt fällt zusätzlich Heißdampf an.

Bei dem Verfahren findet ein nahezu vollständiger Materialumsatz statt, so dass keine nennenswerten Emissionen auftreten.²⁰

Eine seit 1992 in Kanada betriebene Pilotanlage erzeugt aus 1.000 m³_N/h Erdgas, bei einer Leistungsaufnahme von 2.100 kW_{el}, neben Heißdampf mit einer Leistung von 1.000 kW pro Stunde rund 500 kg Aktivkohle und 2.000 m³₀ Wasserstoff. Berücksichtigt man alle

¹⁸ www.hydrogeit.de

¹⁹ www.hydrogeit.de

²⁰ www.hydrogeit.de

verwertbaren Produkte erreicht die Anlage einen Wirkungsgrad von nahezu 100 %. Davon fallen etwa 48 % auf Wasserstoff, 40 % auf Aktivkohle und 10 % auf Heißdampf.

Als nächsten großen Schritt ist eine Anlage, die unter industriellen Bedingungen 100.000 m³N/h produzieren soll.²¹

b) Kleine Reformer und partielle Oxidatoren

Die Übertragung der Erkenntnisse aus den technisch bereits ausgereiften Großanlagen auf kleinere Energieeinheiten ist Aufgabe der weiteren Entwicklung. Einsatz finden diese Kleinanlagen in mobilen Anwendungen wie Fahrzeugen oder in kleinen stationären Einheiten wie Heizanlagen, BHKW etc. Dabei ist die Partialoxidation von Methanol oder Diesel auf Grund des erwünschten niedrigen Temperaturniveaus der Erdgasreformierung im Augenblick überlegen. Weitere Entwicklungspotenziale beim Reforming-Prozess erschließen sich, wenn auch die anfallende Prozesswärme genutzt werden kann.

2.3.2 Elektrolyse von Wasser

Wasserstoff lässt sich auch durch elektrochemische Spaltung von Wasser gewinnen (siehe Bild 2).

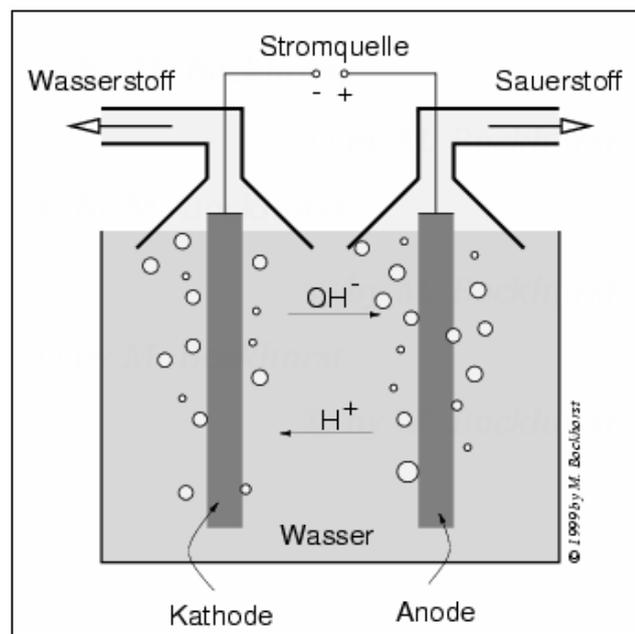


Bild 2: Elektrolyse von Wasser (Quelle: www.energieinfo.de)

Unter den verschiedenen Verfahren zur Wasserstoffherstellung ist die Elektrolyse heute und auf absehbare Zeit die einzige von praktischer Bedeutung. Sie wird in ihrer bekanntesten Form, der alkalischen Elektrolyse, bereits seit über 80 Jahren angewandt.²²

Hierbei stellen sich aber die Fragen nach Kosten und Mengen. Heute ist der Einsatz der Elektrolyse nur in Ländern wie Island oder Norwegen sinnvoll, da hier die Strompreise verhältnismäßig niedrig sind. In einer zukünftigen Wasserstoff-Energiewirtschaft sind aber auch dezentrale Lösungen denkbar, ebenso wie der Einsatz an H₂-Tankstellen.

²¹ www.diebrennstoffzelle.de

²² www.diebrennstoffzelle.de

Unter der Elektrolyse versteht man die Zersetzung von Wasser in seine Bestandteile (Wasserstoff und Sauerstoff) durch elektrische Energie. Die elektrische Energie kann dabei ihren Ursprung sowohl in einem Primärenergieträger haben, als auch durch regenerative Energien gewonnen werden. Unter umwelttechnischen Aspekten ist eine Wasserstoffwirtschaft aber nur dann sinnvoll, wenn der für die Elektrolyse notwendige Strom durch regenerative Energien wie Wind, Sonne oder Wasserkraft gewonnen wird.²³

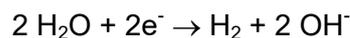
Die Elektrolyse besteht aus zwei Teilreaktionen an den beiden Elektroden, welche sich in Elektrolyten befinden.

A: Durch einen von außen erzwungenen Stromfluss entsteht an der negativen Elektrode (Katode) Wasserstoff und an der positiven Elektrode (Anode) Sauerstoff. Die beiden Reaktionsräume sind durch ein gasundurchlässiges Diaphragma voneinander getrennt, was eine Vermischung der Produktionsgase verhindert. Die Reaktion findet bei etwa 80 bis 85 °C und einer Zersetzungsspannung von 1,9 bis 2,3 V statt.²⁴

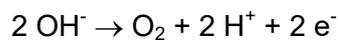
B: Die an der Katode entstandenen negativen Ionen geben an die positiv geladene Anode Elektronen ab, die über den Stromkreis zur Katode wandern. Dort nehmen positiv geladene Ionen Elektronen auf. (Achtung: Die Bezeichnungen Katode und Anode sind umgekehrt wie bei der Brennstoffzelle!)

Für die Wasserelektrolyse ergeben sich die folgenden Reaktionsgleichungen:

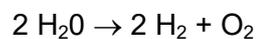
Katode:



Anode:



Gesamtreaktion:



• Unterschiedliche Elektrolyse-Verfahren

Alkalische Elektrolyse

Seit rund 80 Jahren kommerziell zur Wasserstoffherstellung genutzt. Sie arbeitet mit einem wässrigen, alkalischen Elektrolyten (30 %-ige Kalilauge). Durch Hintereinanderschaltung (Filterpressenprinzip) mehrere Einzelzellen zu einem sog. Stack wird die Leistung erhöht. Dabei sind die Elektrolyseure bipolar ausgeführt, d. h. die metallische Trennwand zwischen den Einzelzellen stellt auf der einen Seite die Anode der einen Zelle dar und auf der anderen Seite die Katode der nächsten Zelle (Arbeitstemperatur etwa 80 °C).

Die Technik der alkalischen Elektrolyse gilt als weitgehend ausgereift. Aus Kostengründen werden allerdings nur kleine bis mittlere Anlagen produziert (100 bis 1.000 m_N³/h oder 0,5 bis 5 MW). Große Anlagen sind nur dann wirtschaftlich, wenn kostengünstige elektrische Energie z. B. aus der Wasserkraftnutzung zur Verfügung steht. Die Kosten für kommerzielle Elektrolyseure liegen zwischen 250 bis 500 €/kW_{el}.²⁵

²³ Römpp, CD-Rom Chemie Lexikon, 1995

²⁴ Römoo, CD-Rom Chemie Lexikon, 1995

²⁵ Nitsch, J, Winter, C.-J., 1986, S. 194

Membran-Elektrolyse

Durch ein Diffusions-Fällungsverfahren werden Anode und Katode direkt auf die beiden Seiten einer Membran aufgebracht. So bedarf das zu zersetzende Wasser keine Elektrolyt-Zugabe um die Leitfähigkeit zu erhöhen. Das Wasser wird ausschließlich auf der Anodenseite zugeführt.

Die Membran-Elektrolyseure sind bipolar aufgebaut (was vor allem einen räumlichen Vorteil bewirkt). Die Forschung an der Membran-Elektrolyse wurde wesentlich durch die Forschung an der Proton-Exchange-Brennstoffzelle (PEMFC) vorangetrieben. In der fortschreitenden Entwicklung hat sich gezeigt, dass diese neue Art der Wasserstoffgewinnung eher in kleineren Systemen rentabel ist. Die Investitionskosten für entsprechende Anlagen hängen stark von der weiteren Entwicklung auf dem Gebiet der Brennstoffzellenforschung ab. Bei einem Übergang zur Serienfertigung würde das Verfahren trotz der kleineren Einheiten als wirtschaftlich werden.

Hochdruckwasserelektrolyse

Eine besondere Materialauswahl und –optimierung erlaubt es, Wasserstoff mit Drucken bis zu 50 bar zu generieren (Großkraftwerk-Elektrolyse 12 US\$/GJ Wasserstoffenergie²⁶). Ein weiteres Entwicklungsziel ist die Optimierung der Elektrolyseurleistung auch bei stark schwankender elektrischer Zufuhr, z. B. durch Photovoltaik- oder Windkraftanlagen. Das Verfahren ist noch in der Entwicklung.²⁷

Hochtemperatur-Elektrolyse

Die Hochtemperaturolektrolyse (Hot Elly) verwendet als Elektrolyt eine Sauerstoffionen leitende Keramik. Das Wasser wird katodenseitig als Dampf zugeführt, der bei der Zersetzung ein Wasserstoff-Dampf-Gemisch bildet. Die Hochtemperaturolektrolyse versucht, einen Teil der notwendigen Energie extern in Form von Hochtemperaturwärme um 800 bis 1.000 °C einzubringen und den Anteil der elektrischen Energie zu senken. Bei diesem Verfahren ist an die Nutzung von Kraftwerksabwärme oder konzentrierter solarer Strahlungsenergie gedacht. Das Verfahren ist aber wegen Werkstoffproblemen bislang nicht über das Entwicklungsstadium hinaus gekommen.

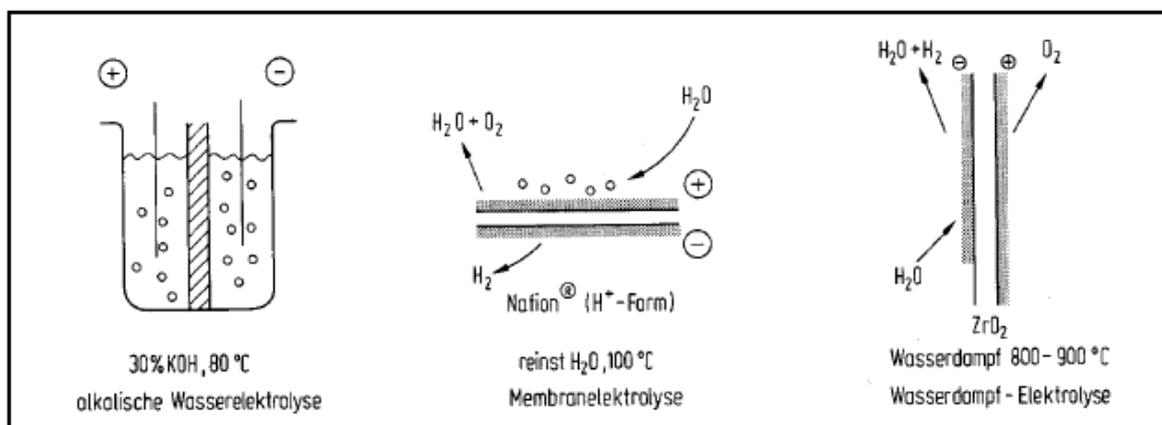


Bild 3: Übersicht der Elektrolyseverfahren (Quelle: www.serious-technology.de, www.furmatech.com, www.chemienet.info)

²⁶ <http://marienschule-euskirchen.de>

²⁷ BMWA, 2005, S. 16

Hochleistungs-Elektrolyseur

Unter einem Elektrolyseur versteht man das Aggregat in dem die Reaktion der Elektrolyse stattfindet. Bis heute muss Wasserstoff - ob in gasförmiger oder flüssiger Form - häufig über lange Strecken transportiert werden. Damit Wasserstoff in der mobilen Anwendung überall benutzt werden kann, ist eine flächendeckende Wasserstoffversorgung notwendig, z.B. durch Tankstellen-Elektrolyseure.

Die Verflüssigung bzw. die Hochdruckverdichtung ist teilweise aufwendiger als der Aufwand zur Herstellung der Gase selbst. Daher verfährt die GHW (Gesellschaft für Hochleistungs-Elektrolyse zur Wasserstoffherzeugung mbH) nach folgenden Prinzip:

Quelle: Elektrische Energie aus Wind und Sonne, Wasserkraft oder konventionellen Systemen

- Umwandlung im Elektrolyseur
- Erzeugung von Wasserstoff für Brennstoffzellen, industrielle Prozesse, Verkehrsanwendungen

Der Hochleistungs-Elektrolyseur arbeitet zum einen als Speicher und zum anderen als Wandler. Elektrolytisch wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff umgewandelt und beide Gase werden bis zur Rückverstromung gespeichert. Wasserstoff ist selbst für große Mengen elektrischer Energie ein idealer Speicher. Die Rückverstromung kann mit sehr hohem Wirkungsgrad in Brennstoffzellen geschehen; alternativ können mit Wasserstoff versorgte Verbrennungsmotoren eingesetzt werden.

Der Betriebsdruck in diesem Aggregat liegt bei 30 bar. Bei Nennlast ist ein Wirkungsgrad von 80%, bei 20% Last ein Wirkungsgrad von 90% möglich.

Vorteile:

- hohe Versorgungssicherheit
- niedrige Kosten
- Entlastung des Straßenverkehrs
- Kein Transportrisiko
- schnell regelbar
- hohe Gasreinheit

Zitat MTU- (Motoren- und Turbinen-Union-) Friedrichshafen: "Mit einem Hochleistungs-Elektrolyseur, der vor Ort bedarfsabhängig betrieben wird, kann ein Großverbraucher problemlos seinen Bedarf an Wasserstoff und Sauerstoff selbst decken. Diese Versorgungsautarkie ist in vielen Fällen wirtschaftlicher als die Versorgung über die Straße." Der MTU-Elektrolyseur wird bereits an der Tankstelle am Flughafen München seit dem Sommer 1998 eingesetzt.

2.3.3 Biochemische Herstellung

• **Biomasse**

Neben den kommerziellen Verfahren, bei denen z.B. über die Verbrennung von Biomasse Strom erzeugt wird, kann auch Biomasse unmittelbar genutzt werden; für die

Wasserstoffproduktion, bzw. die Versorgung von Brennstoffzellen. Der Vorteil liegt hier im Unterschied zur Erzeugung von Wasserstoff mittels des herkömmlichen Elektrolyse-Verfahrens darin, dass durch die direkte Produktion der Umweg über die Verstromung entfällt und sich somit der Systemwirkungsgrad erhöhen lässt.

Wasserdampfvergasung von Biomasse

Durch Pyrolyse (Zersetzung) oder Vergasung entstehen wasserstoffreiche Gase. Der Wasserstoffanteil des Gases wird von den Prozessparametern Druck und Temperatur bestimmt. Hier kommen die schon beschriebenen Verfahren des Reformierungsprozesses zur Anwendung. Auch ist der Einsatz einer weiteren Konvertierungsstufe möglich. Die Marktreife dieses Verfahrens wird in kurzer Zeit erwartet.

Vergärung von Biomasse

Aus Biomasse mit hohem Feuchtigkeitsanteil, z.B. Biomüll aus Haushalten, kann durch anaerobe Methangärung Biogas hergestellt werden, das zu 60 – 70 % Methan enthält. In fortschrittlichen BSZ wie der Hochtemperatur-MCFC, kann das Gas somit direkt als Brenngas eingesetzt werden (Reformierung), was hohe Stromerzeugungswirkungsgrade zur Folge hat. Die Biomassenvergärung ist schon zur Marktreife entwickelt und gehört zusammen mit der Großwasserkraftwerk-Elektrolyse zu den Herstellverfahren für Wasserstoff mit den geringsten spezifischen Kosten (13US\$/GJ).²⁸

• **Wasserspaltung mit Sonnenenergie**

Die Erzeugung von solarem Wasserstoff ist mit photoelektrochemischen, photochemischen und photobiologischen Verfahren möglich. Die Sonnenstrahlung stellt bei diesen Verfahren die nötige Energie zur Spaltung des Wassers zu Verfügung. Allerdings bedarf es eines zusätzlichen Systems zur Strahlungsabsorption, da Wassermoleküle allein nicht ausreichend absorbieren.

Die Forschung verspricht sich am meisten Erfolg von der photobiologischen Wasserstoffherstellung. Bestimmte Bakterien- und Algenarten (z. B. Cyanobakterien oder Purpurbakterien) setzen unter Einwirkung von Sonnenenergie Wasserstoff frei oder erzeugen ihn als Zwischenprodukt. Prinzipiell sind zwei Verfahren zu unterscheiden²⁹: Die Photosynthese, die durch Licht ausgelöst wird und die Fermentation. Aus dem Forschungsstadium wird in den nächsten Jahren ein marktreifes photosynthetisches System erhofft.

Die Purpurbakterien leben in den tieferen Schichten der Seen und verarbeiten mit Hilfe des Sonnenlichts die organischen Substanzen, die zu ihnen hinunterschweben. "Wenn sie zuviel Nahrung bekommen und zugleich unter Stickstoffmangel leiden, geben sie Wasserstoff ab, um das Innere ihrer Zellen im sicheren chemischen Gleichgewicht zu halten. Unsere Arbeitsgruppe aus Bio- und Verfahrenstechnikern will binnen eines Jahres im Freilandversuch eine kontinuierliche und energieautarke Wasserstoffproduktion erreichen - und das mit einer Mindestmenge von stündlich zwei Litern Wasserstoff pro Quadratmeter Kollektorfläche" (Tramm-Werner, 2005). Ein Vorteil dieses Konzepts gegenüber der Wasserstoffherzeugung über Solarzellen ist, dass keine Silizium-Solarzellen und keine komplizierten und teuren Elektrolyse-Apparaturen nötig sind. Einen Weg, Wasserstoff in Zukunft biochemisch billiger aus Traubenzucker zu gewinnen, zeigen J. Woodward und seine Kollegen vom Oak Ridge National Laboratory (Woodward, 1998).

²⁸ <http://marienschule-euskirchen.de>

²⁹ www.hydrogeit.de

Der Trick der amerikanischen Wissenschaftler besteht darin, eine bereits bekannte Methode zur Erzeugung von Wasserstoff durch Bakterien zu vereinfachen. So bedienen sie sich nicht mehr der Mikroorganismen, sondern nur noch deren Enzyme. Diese beschleunigen biochemische Reaktionen. Die Forscher nutzen zunächst einen solchen Biokatalysator, um Traubenzucker in Glukonsäure zu überführen. Dabei wird Wasserstoff frei, wonach das Hilfsmolekül erneut Wasserstoff vom Traubenzucker aufnehmen kann. Die Enzyme stammen aus Archaeobakterien, die in glimmenden Kohlehalden oder Tiefseevulkanen vorkommen. Sie arbeiten bei 60°C, einer Temperatur, bei der die Reaktionen schnell ablaufen und sich keine schmarotzenden Bakterien in der Traubenzuckerlösung ausbreiten. Weiter verbessern wollen die Forscher ihr Verfahren, indem sie ein drittes Enzym mit einbeziehen.³⁰

2.4 Speicherung und Transport

Wenn der Wasserstoff-Technologie der Durchbruch gelingt, wird dies höchstwahrscheinlich im Brennstoffzellensektor geschehen oder werden herkömmliche Treibstoffe bei Verbrennungskraftmaschinen ersetzen. Im Laufe der Entwicklung wurden jedoch weitere Wege entdeckt, die zum Teil gute Chancen bieten, so dass an ihnen weiter geforscht wird.

Im Nutzungsbereich von Wasserstoff als Energieträger gibt es eine ganze Reihe von Möglichkeiten, die sich darin unterscheiden, wie Wasserstoff getankt, gespeichert und für den Antrieb zugänglich gemacht wird.

Die Speicher werden in drei Kategorien eingeteilt, hauptsächlich nach Größenklassen:³¹

- stationäre Großspeicher mit 10^2 bis 10^4 m³ Volumen und ca. 100 bar Überdruck (entsprechen etwa 10^2 bis 10^4 MWh)
- Stationäre Kleinspeicher mit 1 bis 10^2 m³ Volumen sowie mobile Transportspeicher
- Kraftstoffreservoir mit 0,1 bis 0,5 m³ Volumen

2.4.1 Speichieranforderungen

Wasserstoffspeichersysteme müssen einer Reihe von technischen, wirtschaftlichen, sicherheits- und infrastrukturenspezifischen Anforderungen gerecht werden. Diese unterscheiden sich auch nach dem Nutzungsprofil des jeweiligen Einsatzes, also z.B. für dezentrale Energieversorgungssysteme oder PKW.

Die wichtigsten Kriterien sind:³²

- hohe volumetrische Speicherdichte (kWh/L)
- hohe gravimetrische Speicherdichte (kWh/kg)
- geometrische Konformität (beliebiges Design)
- hohe Eigensicherheit
- hohe Sicherheit gegen äußere mechanische Einwirkungen und bei Bedienung
- keine Betriebs-Einschränkungen

³⁰ www.hydrogeit.de

³¹ Bauer, G., 1986, S. 259

³² Bünger, U., 2001, S. 2

- keine Einschränkungen der Lebensdauer
- möglichst geringer Kostenaufwand (Material und Herstellung)
- Kompatibilität mit Betankungsinfrastruktur

Eine weitere wichtige Anforderung an portable Speichersysteme ist eine vergleichbare Leistungsdichte wie entsprechende Akkumulatoren, sowie wettbewerbsfähige Kostend.

2.4.2 Druckwasserstoffspeicherung

Druckwasserstoffbehälter (Speicherung in Druckbehältern) werden in der Industrie bereits seit vielen Jahren eingesetzt. Während diese bisher jedoch nur in Ausnahmefällen auf Volumen und Gewicht optimiert waren (z. B. Gasflaschen-Trailertransport), muss sich die „neue Generation“ von Wasserstoffdruckbehältern anderen technischen, wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Anforderungen stellen. Einige der wichtigsten Merkmale von Druckwasserstoffbehältern sind folgend aufgezählt.

- Die zulässige Betriebs- muss dem Umgebungstemperaturbereich entsprechen
- Theoretisch wird eine der Flüssigspeicherung vergleichbare volumetrische Speicherdichte erst bei ca. 1.000 MPa erreicht
- Betriebsdruck heute 25 MPa bzw. 35 MPa
- Vollumwickelte Stahl- und Al- Verbundbehälter sind Industriestandard
- Schnellbefüllung stellt hohe mechanische und thermische Anforderungen an Behälter
- Hohe passive Sicherheit durch Druckbehälterauslegung (Sicherheitsfaktor > 2,35)

Um auch die im KFZ-Sektor geforderten Reichweiten von ca. 400 bis 500 km pro Tankfüllung zu erzielen, ist die Realisierung von sehr hohen Betriebsdrücken (z.B. 70 MPa) anzustreben. Dieses Druckniveau erfordert in jedem Fall den Einsatz von hochreißfesten Kohlefaser verstärkten Verbundwerkstoffen.

Wichtige Entwicklungsziele sind:

- Erhöhung der Speicherdichte
 - höheres Druckniveau bis z.B. 70 MPa,
 - höherwertige Kohlenstofffasern wie z.B. T-1000G,
 - Linermaterial aus Kunststoff (PE)
 - variables Design
- Verbesserung der Sicherheit
 - innen liegende Tankventile (Kfz-Sektor)
 - verbesserte Temperaturlösung
- Reduktion der Kosten
 - Massenfertigung hochfester Fasern
 - Kompatible Ventilkombinationen

Zudem stellt die Infrastruktur der (Druck-) Wasserstoffbetankung die größte Herausforderung dar. Zwar kann auch durch hoch isolierte Drucktankwagen Flüssigwasserstoff (kryogen) bei

über 250 bar transportiert werden, jedoch sind hier noch keine hinreichenden Versorgungsstrukturen vorhanden.³³

Im Rhein-Ruhr-Gebiet sorgt ein über 200 km langes (Druck-) Rohrleitungsnetz im Verbund mit 14 Wasserstoff erzeugenden und verbrauchenden Werken für eine Energieversorgung. Der größte Teil des produzierten Wasserstoffs wird direkt beim Erzeuger weiterverarbeitet.³⁴

2.4.3 Flüssigwasserstoffspeicherung

Die wesentlichen Eigenschaften der Wasserstoffspeicherung in flüssiger Form (LH₂-speicherung) lassen sich folgendermaßen kurz zusammenfassen:

- Betriebsdruck 1 - 10 bar (Siedetemperatur bei 10 bar = 91 K; $p_{\text{krit}} = 13$ bar)
- Verflüssigung benötigt etwa 20-30% der enthaltenen Energie
- doppelwandige Behälter mit Vielschicht-Vakuumsuperisolation (70 – 100 Schichten, 25 mm)
- ein oder mehrere bei Flüssigentnahme gekühlte thermische Schilde im Einsatz
- Wärmeeintrag heute ca. 2 W, Standzeit ca. 4 Tage, Abdampftrate (boil-off) 1%/Tag
- Gewicht eines 120 l Behälters heute etwa 100 kg
- beschränkte Nutzung wegen begrenzter Füllraten
- hohe passive Sicherheit durch doppelwandige Ausführung
- Schnellbefüllung technisch möglich und realisiert
- Behälter für ca. 50 Prototypfahrzeuge hergestellt (ca. 120 L)

Als besonderes ungünstig für das Handling dieser Behälter stellt sich die begrenzte Haltezeit heraus, die aufgrund des geringfügigen Wärmeeintrages von wenigen Watt zu einem Druckanstieg im Behälter führt. Da die Verdampfungswärme von Wasserstoff nur 31,61 kJ/L beträgt (im Vergleich: Flüssigerdgas 216,37 kJ/L), liegt die Haltezeit in heute realisierten passiv wärmegeprägten Behältern bei nur wenigen Tagen. Diese kann nur durch aktive Maßnahmen wie aktive thermische Schilde (z.B. mit Verlustkühlung durch Reservoir mit flüssigem Stickstoff oder flüssiger Luft) verbessert werden.³⁵

Des Weiteren wird das nutzbare Behälterspeichervolumen durch den maximal zulässigen Betriebsdruck begrenzt, da bei der sukzessiven Erwärmung der Flüssigkeit deren Dichte abnimmt und damit der Flüssigkeitspegel steigt. Der durch das Regelwerk erlaubte Grenzwert beträgt 95 % des Gesamtvolumens. Dadurch ist z. B. bei einem auf maximal 6 bar begrenzten Betriebsdruck die Volumennutzung auf höchstens 79 % limitiert. Die Gesamtvolumennutzung wird durch den zur Kühlung erforderlichen Restwasserstoff, die doppelwandige Behälterausführung und die externen Behälterarmaturen weiter reduziert.

Trotzdem bietet die Speicherung von Flüssigwasserstoff an Bord von Fahrzeugen heute noch die beste Kombination gravimetrischer und volumetrischer Speicherdichte, solange die begrenzte Haltezeit akzeptiert werden kann. Bis zu etwa 12 Gew. % (Nutzgewichtanteil) scheinen heute erreichbar, die sich jedoch je nach Einbauverhältnissen im Fahrzeug und zulässigen Kosten deutlich reduzieren.

³³ Bünger, U., 2001, S. 8

³⁴ Römpf, CD-Rom Chemie Lexikon, 1995

³⁵ Bünger, U., 2001, S. 6

Ohne hier wegen der Vielfalt der Themen ins Detail gehen zu können, ergeben sich weitere Verbesserungspotenziale durch:

- Verbesserung der Isolierung/Haltezeit
 - Innenbehälteraufhängung mit supraleitenden Magneten
 - thermische Schilde
 - Temperaturschichtung durch Einbauten
- Erhöhung der Speicherdichten (auf bis zu 14 Gew. %)
 - Einsatz von Verbundwerkstoffen und Al statt Stahl
 - Armaturen gewichts- und volumenreduziert
 - Reduktion der Isolationsspaltstärke auf z. B. 18 mm
- Bessere Ausnutzung des verfügbaren Einbauraumes
 - Variation der geometrischen Konformität
- Deutliche Kostenreduktion auf wenige Tausend € pro Behälter

- **Methylzyklohexan**

Durch chemische Umsetzung von Wasserstoff entsteht Methylzyklohexan, der dann als Kraftstoff genutzt werden kann. Diese Variante wurde 1975 in den USA entwickelt und 1979 am PSI zusammen mit der ETH Zürich weiter erforscht. Getankt wird eine Flüssigkeit, an die Wasserstoff chemisch gebunden ist. Mit Hilfe der Auspuffhitze wird dieser Wasserstoff in einer bordeigenen Anlage abgetrennt und die Restflüssigkeit später von neuem mit Wasserstoff beladen.

Erste Versuche mit diesem Verfahren gab es bereits ab 1980. 1989 folgte die Dehydrier-Anlage *MTH-3* (PSI). Diese war mit 950 kg und einem Bau-Volumen von 2,5 m³ bereits in einem fort geschrittenen Entwicklungsstadium.

Toluol ist wie Metallzyklohexan leicht zu handhaben und beliebig lange zu lagern, dient nur als Wasserstoffträger und wird in diesem Kreislauf nicht verbraucht. Das Ziel von Prof. Taube vom PSI war, den in der Schweiz im Sommer produzierten Überschussstrom dazu zu nutzen, per Elektrolyse Wasserstoff zu erzeugen und damit Fahrzeuge anzutreiben.³⁶

2.4.4 Metallhydridspeicher

Bestimmte Metalle können große Mengen Wasserstoff sozusagen wie ein Schwamm 'aufsaugen', speichern und wieder abgeben. Der Wasserstoff kann so in einer noch höheren Dichte (0,4 bis 5,2 MJ/L) als im flüssigen Zustand gespeichert werden. Solche Verbindungen werden Metallhydride genannt (oder Metall-Wasserstoff-Legierungen/Wasserstoffschwämme).

Der Wasserstoff steht hierbei gasförmig zur Verfügung. Viele elementare Metalle, intermetallische Verbindungen und ein- oder mehr-phasige Legierungen sind in der Lage, Wasserstoffatome zwischen die Metallatome einzulagern und chemisch zu binden:

³⁶ www.hydrogeit.de

- metallische Elemente z.B. Pd, Mg, La
- intermetallische Verbindungen z.B. ZrMn₂, LaNi₅, Mg₂Ni
- mehr-phasige Legierungen, z.B. TiNi-Ti₂Ni oder Mg-Mg₂Ni

Trotz der hohen Speicherdichte im Metallhydrid lässt sich der Wasserstoff unter niedrigem Druck beladen und entnehmen. Die Speicherung von Wasserstoff in Metallhydriden ist von allen Varianten bei weitem die sicherste und wurde über Jahre hinweg intensiv erforscht.³⁷ Anfang der siebziger Jahre entschieden sich die Spezialisten bei Daimler-Benz für die Entwicklung eines fahrzeugtauglichen Metallhydridspeichers. Eine spezielle Legierung auf Basis von Titan, Vanadium und Mangan erwies sich am besten geeignet, um Anforderungen wie große Reichweite, schnelle Wiederbetankung (in ca. 10 min) und problemloses Verhalten beim Kaltstart zu erfüllen. 1975 lief das erste Fahrzeug der Welt mit einem Wasserstoff-Hydridspeicher.³⁸

Für die praktische Anwendung von Metallhydridspeichern ist vor allem eine niedrige Desorptions-Temperatur wichtig, zudem sollte der Speicher preiswert sein. In Temperatur-Hydriden (20-90 °C, kovalente Bindungen) und Hochtemperatur-Hydriden (150-300 °C, ionische Bindungen) treten unterschiedliche Effekte auf. Ein Hydridschwamm auf Titan-Basis desorbiert zwar knapp über Raumtemperatur (zur Desorption von Hochtemperatur-Hydriden würde die Wärme der Auspuffgase nicht ausreichen), fasst aber bei 280 kg Masse nur den Energiegegenwert von elf Liter Benzin, d. h. er ist rund 25-mal so schwer wie ein äquivalenter Tank mit Benzin.³⁹

Wichtige Merkmale der Metallhydridspeicherung sind:

- Chemische Einlagerung von Wasserstoff zwischen Metallgitteratomen, pulverförmige Legierungen von H₂ speichernden Metallen (La, Ti, Zr, Mg, Ca) und nicht H₂-speichernden Metallen (Fe, Ni, Mn, Co, Al)
- Betrieb von Umgebungstemperatur bis ca. 300 °C
- Betriebsdruck heute 3 - 6 MPa (30-60 bar)
- Wasserstoff-Freisetzung durch Druckreduktion und Wärmezufuhr, aber Zyklenstabilität begrenzt, begrenzte Regenerierbarkeit

Vor- und Nachteile:

- + im Vergleich zu Druckgasflaschen und Kryospeichern eine sichere Speichermethode
- + der desorbierte Wasserstoff ist ultrarein
- + kompakte Bauweise
- + niedrige Drücke
- hohes Gewicht
- geringe Reichweite
- lange Betankungszeit

³⁷ Bünger, U., 2001, S. 8

³⁸ www.hydrogeit.de

³⁹ Metallhydridspeicher hatten 1994 das 25fache Gewicht und das zehnfache Volumen von herkömmlichen Benzintanks. Bezüglich derartiger Zusatzmassen ist zu berücksichtigen, dass 100 kg weniger Gewicht eine Kraftstoffeinsparung von bis zu 0,3 Liter auf 100 km bringen.

- hohe Materialkosten und aufwändige Tankstelleninfrastruktur erforderlich

Neuesten Meldungen zufolge (Zitat) hat die Chemikerin Nelly Rodriguez und ihr Team an der Northeastern University in Boston/Massachusetts Graphit Nanofasern entwickelt die eine extrem hohe Speicherkapazität haben, und alle bisherigen Systeme übertreffen, womit das Problem der Wasserstoffspeicherung gelöst wäre. Ein Gramm Kohlenstoff soll etwa 30 l gasförmigen Wasserstoff speichern. Dies ist vermutlich auf die großen Zwischenräume/Struktur des Kohlenstoffs zurückzuführen, in die sich Wasserstoffatome dicht gepackt einlagern können. Dies ist im Einzelnen jedoch noch nicht geklärt.

Wird der Druck reduziert, werden bis zu 95 % der adsorbierten Wasserstoffmenge wieder freigesetzt. Ein Fahrzeugtank von etwa 25 l Volumen und 87 kg Masse könnte bis zu 8.000 Kilometer Reichweite ermöglichen. Allerdings kann der Tank nur vier bis fünfmal gefüllt werden. Die Regenerierbarkeit ist noch ungeklärt. Laut Aussagen der Forscher sollen die Mikrofasern nicht sehr teuer sein.⁴⁰

2.5 Substitution von erschöpfbaren Energiequellen und Kostenfaktoren

In der derzeitigen Gaswirtschaft kommt Wasserstoff eine große Bedeutung als Rohstoff in der Chemieindustrie und zur Veredelung von Primärenergieträgern zu. Insbesondere diese Form der Nutzung hat die Entwicklung der Wasserstofftechnik in den letzten Jahren vorangetrieben. Das in diesen Bereichen erworbene Wissen in der sicheren Erzeugung, Handhabung und Speicherung von großen Mengen Wasserstoff ist für die weitere Expansion der energetischen Nutzung des Energieträgers von großer Bedeutung.

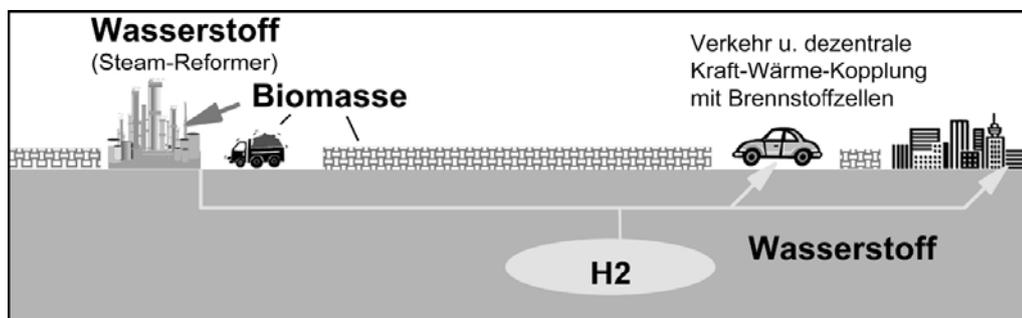


Bild 4: Wasserstoff-Anwendung in zukünftiger Infrastruktur (Quelle: Tetzlaff, 2005, S. 18-19)

2.5.1 Nicht energetische Nutzung

- **Synthesen mit Wasserstoff**

Der weitaus größte Anteil des erzeugten Wasserstoffs wird bei der Ammoniak- und Methanolsynthese eingesetzt. Durch Synthese von Wasserstoff und Stickstoff nach dem Haber-Bosch-Verfahren wird Ammoniak erzeugt, das zu 80 % in der Düngemittelindustrie Einsatz findet und zu 20 % in die Kunststoffproduktion einfließt. Bei der Methanolsynthese wird aus einem Synthesegas (Mischung aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid) Methanol gewonnen. Über die Hälfte der erzeugten Methanolmenge wird zur Produktion von Kunststoffen benutzt. Nur ein kleiner Teil des Methanols wird heute z. B. als Kraftstoffzusatz energetisch eingesetzt. In der Zukunft könnte Methanol nicht nur als chemisches

⁴⁰ Bünger, U., 2001, S. 21

Zwischenprodukt sondern auch als Energieträger und synthetischer Kraftstoff große Bedeutung erlangen. Die Umsetzung in Methanol statt der Anwendung vom reinem Wasserstoff könnte vor allem im mobilen Einsatz konventionelle Kraftstoffe auf Grund der vergleichbaren Eigenschaften substituieren, u. a. wäre eine problemlose Nutzung der derzeitigen Infrastrukturen für die Verteilung von Methanol möglich.

- **Eisenherstellung**

Neben den konventionellen Hochofenverfahren zur Herstellung von Roheisen aus Eisenerz gibt es ein Direktreduktionsverfahren, bei dem unter Zugabe von Wasserstoff als Reduktionsgas Eisenerz in Eisenschwamm umgewandelt wird. Wegen seiner technischen Vorteile und der besseren Energiebilanz gewinnt dieses Verfahren in der Verhüttung von Eisenerzen zunehmend an Bedeutung.⁴¹

- **Anderweitige Nutzung von Wasserstoff als Reduktionsmittel**

Bei der Herstellung von Chemikalien und Zwischenprodukten in der organischen Chemie mit Hydrierreaktionen wird Wasserstoff benötigt, ferner in der Lebensmittelindustrie zur Fettenthärtung, in der Metallurgie zur Herstellung von Wolfram, Molybdän und Nickel und in der Glasindustrie zur Fertigung hochwertiger Gläser. In der Elektrotechnik dient Wasserstoff bei der Siliziumherstellung und in der Halbleitertechnik als Schutzgas.⁴²

2.5.2 Indirekt energetische Nutzung

Unter 'indirekter energetischer Nutzung' ist der Einsatz von Wasserstoff zur Veredelung von anderen Energieträgern zu verstehen. Z. B. werden fossile Energieträger wie Erdöl, Schweröl und Kohle werden zu marktfähigen Produkten wie Benzin oder Gas veredelt. Die Einbringung von Wasserstoff erhöht das Wasserstoff-Kohlenstoff-Verhältnis (H/C-Verhältnis) und damit den Energieinhalt der Produkte. Außerdem wird Wasserstoff als Reduktionsmittel zur Reinigung fossiler Rohstoffe von Schwefel, Stickstoff und Schwermetallen verwendet [winter,89], z. B. werden beim *Hydrotreating* von Schweröl und Erdöl unter der Zugabe von Wasserstoff Verunreinigungen wie Schwefel, Stickstoff und metallische Verbindungen aus dem Rohöl herausgefiltert. Diese Stoffe würden in der späteren Verbrennung der Raffinerieprodukte zu erheblichen Schadstoffbelastungen führen.

Das *Hydrocracken* dient dazu durch Einbringen von Wasserstoff aus schweren Rohölen und Ölsanden leichte Raffinerieprodukte zu gewinnen. Die zunehmende Erschöpfung der Reserven an leichtem Rohöl wird dieses Verfahren in Zukunft an Bedeutung gewinnen lassen.⁴³

- **Hydrierende Kohleveredlung**

Eine Umwandlung von Kohle in hochwertigen synthetischen Kohlenwasserstoff ist technisch möglich. Diese dienen der chemischen Industrie als Grundstoff und als Energieträger. Sämtliche aus Erdöl und -gas erzeugten Produkte sind auch unter der Verwendung von synthetischen Kohlenwasserstoffen herstellbar. Die Veredelung von Kohle ist aber vor allem vor dem Hintergrund einer zunehmenden Erschöpfung der Erdöl- und Erdgasreserven zu sehen. Prinzip aller Veredelungsverfahren ist die Spaltung der hochmolekularen Kohlestruktur unter Anlagerung von Wasserstoff in einer exothermen Reaktion. Je nach Art

⁴¹ Umweltbundesamt, 1998, S. 28

⁴² Forum Wissenschaft, 3/1999, S. 56

⁴³ Schaub, G., 2004, S. 8

der eingesetzten Kohle und gewünschtem Reaktionsprodukt werden die hydrierende Kohlevergasung, die Wasserdampfvergasung, die Hydrolyse und die Kohleverflüssigung unterschieden.⁴⁴

2.5.3 Energetische Nutzung

2.5.3.1 Verbrennung von Wasserstoff

Die Verbrennung von Wasserstoff mit Luft in Verbrennungsmotoren oder Gasturbinen ist bei geeigneter Verbrennungsführung nur mit sehr geringen, vernachlässigbaren Schadstoffemissionen verbunden. Spuren von Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid und Schwefelbestandteile entstehen nur durch das Mitverbrennen von geringen Ölmengen. Bei intelligenter Prozesssteuerung unter Verringerung der Verbrennungstemperatur ist auch die Emission von Stickoxiden deutlich reduziert.

- **Bereitstellung von Prozesswärme**

Wasserstoff fällt bei vielen chemischen Prozessen als Koppelprodukt an. Sind Weiterverarbeitung oder Transport nicht rentabel, kann Wasserstoff bei der Wärmeerzeugung andere Brenngase substituieren. Eine Zumischung zum Erdgas ist von Vorteil, da vorhandene Anlagen ohne umständliche Anpassung genutzt werden können. Die Verbrennung von reinem Wasserstoff bedarf größerer Investitionen, und bei den relativ niedrigen Bezugspreisen für Erdgas ist die Wirtschaftlichkeit fraglich.⁴⁵

- **Gasturbine**

Gasturbinen können grundsätzlich auf Wasserstoffbetrieb umgerüstet werden. Ähnlich wie bei der Prozesswärmeerzeugung ist auch bei Gasturbinen ein Kombibetrieb mit Erdgas kostengünstiger, da keine aufwändigen Anlagenanpassungen vorgenommen werden müssen. Wasserstoffanteile bis 80 % sind als unproblematisch anzusehen. Beim Einsatz von Wasserstoff in Gasturbinen ist die Schadstofffreiheit des Energieträgers sehr vorteilhaft. Anders als bei fossilen Energieträgern entstehen bei der Verwendung von Wasserstoff keine Verbrennungsrückstände und Aschepartikel, die Ablagerungen und Korrosion an den Turbinenschaufeln verursachen können. Dies wirkt sich positiv auf die Wartungsintervalle und die Lebensdauer der Anlagen aus. Die chemische und petrochemische Industrie nutzt bereits heute den als Koppelprodukt anfallenden Wasserstoff zur Stromerzeugung mit Gasturbinen.⁴⁶

- **Gasmotor**

Konventionelle Motoren können problemlos mit einem Wasserstoff-Erdgas-Gemisch betrieben werden. Die Wirtschaftlichkeit eines reinen Wasserstoffbetriebes ist z. Z. nicht absehbar, da die Technik noch einiger Entwicklungsarbeit und hoher Investitionen bedarf. Der Einsatz von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen ist im Vergleich zu anderen Kraftstoffen aber durchaus rentabel. Insbesondere hinsichtlich der Schadstoffemission wäre der H₂-Motor überlegen. Das Entwicklungspotenzial des

⁴⁴ Schaub, 2004, S. 10

⁴⁵ Physik Journal, 7/2004, S. 19

⁴⁶ Physik Journal, 3/2006, S. 6

reinen Wasserstoffmotors ist allerdings auch durch andere Technologien wie die der Brennstoffzelle begrenzt, er wird daher in Zukunft wohl keine große Rolle spielen.⁴⁷

2.5.3.2 Spezifische Techniken

- **Katalytische Brenner**

Bei dem seit langem bekannten Prinzip des Döbereiner Feuerzeugs findet eine kalte Verbrennung statt, d. h. es entsteht keine Flamme. Wasserstoff und Sauerstoff werden an einem Katalysator zusammengeführt, wobei dieser sich erwärmt. Er erreicht Temperaturen von knapp oberhalb der Umgebungstemperatur bis zu einigen hundert Grad. Der entscheidende Vorteil ist die völlig emissionsfreie Verbrennung. Anwendung könnte das Verfahren in der Raumheizung finden. Der entstehende Wasserdampf könnte zur Regulierung der Raumluftfeuchte verwendet werden. Katalytische Brenner für Flüssiggas sind als 'Katalytöfen' häufig in Südeuropa in Betrieb. Der Einsatz von Wasserstoff bedarf aber noch eigener Entwicklungsarbeit im Bereich der Katalysatoren, der Sicherheitstechnik und der Konzeption des gesamten Heizsystems.⁴⁸

- **H₂/O₂-Dampferzeuger**

Der H₂/O₂-Dampferzeuger arbeitet nach dem 'Raketenprinzip'. Ein stöchiometrisches Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch wird kontrolliert zu Wasserdampf verbrannt. Zur Regelung der Dampfsättigung wird zusätzlich Wasser in den Prozess eingespritzt, das sofort verdampft. Die Vorteile liegen in der Dampfreinheit, in den positiven Regeleigenschaften und den extrem kurzen Ansprechzeiten. Schon kleine geometrische Abmessungen erlauben eine hohe thermische Leistung: Mit einem Rohr von 2 Meter Länge und 10 cm Durchmesser wird eine thermische Leistung von 35 MW erreicht. Durch Zumischen von Wasser lassen sich Temperaturen bis zu 3.300 °C erzielen. Die Elektrizitätswirtschaft bekundet Interesse an diesem Verfahren, um in Dampfturbinenkraftwerken Spitzenlasten ausgleichen zu können. Kleinere Dampferzeuger finden Anwendung in Anlagen, in denen eine schnelle Bereitstellung von Dampf und begrenzte räumliche Abmessungen gefordert werden, z. B. in der Pharmazie oder in der Lebensmittelindustrie (Dampf-Sterilisation).⁴⁹

- **Brennstoffzellen**

Die wohl fortschrittlichste Anwendung von Wasserstoff ist die Brennstoffzelle - eigentlicher Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

2.5.3.3 Mobile Anwendungen

⁴⁷ Physik Journal, 5/2000, S. 53

⁴⁸ Physik Journal, 11/2000, S. 13

⁴⁹ Physik Journal, 11/2000, S. 14

In der Raumfahrt wird flüssiger Wasserstoff als Antriebsmittel genutzt. Die hohe massenbezogene Energiedichte ist dort ausschlaggebend. Die aktuellen Entwicklungsbemühungen richten sich vorwiegend auf den Kraftfahrzeugbereich. Auch hier liegen die besten Zukunftsaussichten bei der Brennstoffzelle. Eine Reihe von Konzepten unter Verwendung von Erdgas, Methanol und Wasserstoff als Energieträger steht kurz vor der Marktreife. Nahezu jeder Automobilkonzern betreibt Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet oder bildet Allianzen mit Forschungsstandorten. Häufig wird allerdings der Umweg über Methanol oder Erdgas wird z. Z. wegen der Nutzbarkeit vorhandener Infrastruktur für Kraftstoffe noch favorisiert.

2.5.4 Kosten

Die Bestimmung der aktuellen Nutzenergiekosten für Wasserstoff ist schwierig, da diese sich aus sehr unterschiedlichen Herstellungs-, Umwandlungs- sowie Transport- und Verteilungskosten zusammensetzen. Hinzu kommen die Gewinnspannen der Produzenten und Handelspartner sowie staatliche Steuern und Abgaben, die politischen und wirtschaftlichen Einflüssen unterliegen.

Z. Z. liegt der Preis für flüssigen Wasserstoff (ohne Steuern) bei etwa 0,50 € pro Liter. Diesen Preis stehen knapp 1,50 € für einen Liter Benzin gegenüber. Energetisch ist ein Liter Benzin etwa der vierfachen Menge Wasserstoff gleichzusetzen,⁵⁰ d. h. die effektiven Preise sind vergleichbar, wenn Wasserstoff steuerfrei bleiben sollte.

Es gibt jedoch sehr viel billigeren Wasserstoff, der durch Dampfreformierung beispielsweise aus Erdgas hergestellt wird oder als Nebenprodukt in der chemischen Industrie anfällt. Ebenso wird teurer Wasserstoff angeboten, der mit Hilfe von Solarstrom in Photovoltaik-Anlagen erzeugt wird.

Beispiel: Am Flughafen München wird an der dortigen Tankstelle derzeit 1 l flüssiger Wasserstoff für 0,55 € angeboten, dies entspräche einem Benzinpreis von etwa 2,- €/l (23 Cent/kWh). Ein Mittelklasse-Wagen würde ungefähr 32 l LH₂ auf 100 km verbrauchen. Das entspricht Treibstoffkosten von 17,6,- € im Gegensatz zu 12,- € für Benzin (bei 8 l Benzin auf 100 km). Der Wasserstoffpreis ist jedoch in keiner Weise kostendeckend - er wird von den beteiligten Firmen subventioniert.⁵¹

Wasserstoff vom Gaslieferanten kostet derzeit pro 50 l-Flasche (bei 200 bar, 9 m³_N) zwischen 35,- und 70,- € (plus Flaschenmiete 0,30 € pro Tag und Flasche). Dies entspricht spezifischen Kosten von etwa 1,10 - 2,20 €/kWh (ohne Flaschenmiete).

Tabelle 5: Kosten der H₂-Herstellung (Quelle: www.energieportal24.de, www.ewariss.de, Stand 2001)

Herstellung (Stand 2001)	Kosten Cent/kWh
Erdgas Dampfreformierung	4
Wasserkraft, Elektrolyse	9
Biomasse, Vergasung	10
Wind, Elektrolyse	23
Photovoltaik, Elektrolyse	75
Kraftstoff-Preise (Stand 2006, einschl. Steuern)	
Benzin	14,6

⁵⁰ www.energieportal24.de

⁵¹ www.bg-bahnen.de

Diesel	11,1
--------	------

Beim typischen Haushaltstarif sind die Leitungs- und Verteilungskosten für Strom ohne Steuern und Abgaben mit ca. 8 Cent/kWh doppelt so hoch wie die mittleren Stromerzeugungskosten mit ca. 4 Cent/kWh. Die Energietransportkosten von Wasserstoff über das Rohrnetz werden dagegen ohne Steuern nur ca. 0,7 Cent/kWh veranschlagt.⁵²

In naher Zukunft rechnet die Fachwelt mit sinkenden Wasserstoff-Bezugskosten aufgrund fortschrittliche Herstellungs- und Transportverfahren. Langfristig wird eine Verteuerung der Primärenergieträger auch die Wasserstoffgestehungskosten erhöhen, da die Kosten für die Energieträger die Investitionskosten für die Anlagen bei weitem übersteigen – Kostenreduktionen bei der Verfahrenstechnik, haben nur einen zweitrangigen Einfluss auf den Wasserstoffpreis.

Regenerative Konzepte (vornehmlich Techniken zur Stromerzeugung) werden in dieser Kostensituation wirtschaftlicher, da hier die Investitionen im Vordergrund stehen. Eine Weiterentwicklung der Verfahren und eine massive Preisreduktion durch Massenfertigung könnten die Stromgestehungskosten der Systeme in den nächsten Jahren senken.

⁵² Tetzlaff, K., 2005, S. 18-19

3 ANFORDERUNGEN AN DAS HANDBUCH/PFLICHTENHEFT

Durch den Einsatz der Brennstoffzellen in unterschiedlichen Funktionsbereichen entstehen in der Arbeitspraxis neue Tätigkeitsfelder, die eine spezifische Fachbildung der Mitarbeiter erfordern. Dazu soll dieses Handbuch beitragen. Handwerker und andere von der Neustrukturierung der Ausbildungsinhalte Betroffene sollen in Form eines Überblicks Basisinformationen zur Funktion der Brennstoffzelle (BSZ), der Technologie und der Markteinführung erhalten.

3.1 Zielgruppen

Nach Durchsicht der einschlägigen Ausbildungsverordnungen ist eine Vielzahl von Ausbildungsberufen identifiziert worden, die sich mit der Anwendung von BSZ-Systemen verändern werden.

Änderungen ergeben sich vor allem in den Handwerksberufen. Dazu zählen nicht nur das Sanitär-, Heizungs- und Klima- (SHK-) Fachhandwerk, sondern auch die Handwerksberufe im Elektrobereich, im Kraftfahrzeug- und im Schornsteinfegergewerbe.

Folgende Ausbildungsberufe werden durch das Handbuch angesprochen:

Anlagenmechaniker/-in für Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik	Informations-/Kommunikationselektroniker/-in
Bootsbauer/-in	IT-Systemelektroniker/-in
Elektroanlagenmonteur/-in	Kälteanlagenbauer/-in
Elektromaschinenbauer/-in	Klempner/-in
Elektromaschinenmonteur/-in	Kfz-Mechatroniker/-in
Elektromechaniker/-in	Mikrotechnologe/-in
Elektroniker/-in für Automatisierungstechnik/Energie und Gebäudetechnik/Geräte und Systeme	Mechatroniker/-in
Fachinformatiker/-in	Rohrleitungsbauer/-in
Feuerungs- und Schornsteinbauer/-in	Schornsteinfeger/-in
Informationselektroniker/-in	Zweiradmechaniker/-in

Tabelle 6: Berufe mit Ausbildungsverknüpfung zur BSZ (Quelle: lernen & lehren, Heft 81)

Im Rahmen der Aus- und Weiterbildung der Handwerkskammer Hamburg/ZEWU (Zentrum für Energie-, Wasser- und Umwelttechnik) finden umfangreiche Lehrgänge, zahlreiche Tageskurse und Seminare für die verschiedensten Handwerks- und Ausbildungsberufe statt. Dies Handbuch wurde erstellt, um den Teilnehmern Arbeitsinformationen für die Lehrgänge möglichst kostenfrei anbieten zu können.

3.2 Vorkenntnisse

Vorrangig soll das Handbuch innerhalb der Lehrgänge des ZEWU eingesetzt werden und dort Basisinformation vermitteln. Die Teilnahme an den Lehrgängen der HWK/ZEWU setzt gewisse Sachkenntnis voraus. Sämtliche Fortbildungen innerhalb des ZEWU finden unter dem Schwerpunkt Umweltschutz statt.

Die Kurse wenden sich an ausgebildete Handwerker, Meister, Ingenieure, Naturwissenschaftler, Betriebswirte, und sowie an Techniker verschiedener Fachrichtungen.

Als Mindestvoraussetzung für ein ausreichendes Verständnis des Handbuchs wird eine abgeschlossene Gesellenausbildung im Schwerpunkt SHK oder im Elektrogewerbe (siehe auch die oben genannten Berufsgruppen) erachtet.

3.3 Lernziele

Das Bemühen um Verständlichkeit muss im Vordergrund stehen, wenn es um die Erläuterung einer neuen technologischen Entwicklung geht. Die Einführung von Innovationen verlangt pädagogisches Geschick, damit die Chance der ersten Marktinformation richtig genutzt wird. Die potenziellen Käufer sowie die später zuständigen Vertriebs- und Wartungsfirmen sollen nicht unnötig mit kompliziertem Fachwissen überhäuft werden, weil sie sonst möglicherweise überfordert sind und vor dem Produkt zurückschrecken.

Die frühzeitige Entwicklung von Weiterbildungskonzepten ist Voraussetzung für die Einführung neuer Technologien. Ohne kompetente Ausbildung ist eine breite Markteinführung und –durchdringung nicht denkbar.

Das Handbuch soll ein breites Basiswissen zur BSZ-Technologie vermitteln. Dabei sind nicht nur technische Inhalte gefragt, sondern auch die Informationen zu Umweltaspekten, Einsatzfeldern im Privathaushalt und rechtlichen Rahmenbedingungen. Außerdem sollen die Perspektiven der neuen Technik aufgezeigt werden. Sie sind wesentlich auch durch die Förderbedingungen und die tatsächliche Marktentwicklung bestimmt. Dem Handwerker oder Fachbetrieb soll frühzeitig die Möglichkeit geboten werden, sich selbstständig auf dem Gebiet der BSZ-Technologie zu engagieren und kontinuierlich Wissen zu erwerben.

Die Informationen des Handbuchs sollen es dem Fachhandwerker ermöglichen, private Verbraucher zu beraten. Dies beinhaltet auch die Erläuterung der Vor- und Nachteile gegenüber konventionellen Heiz- oder Energieversorgungssystemen und KWK-Anlagen.

3.4 Hilfsmittel zum Erreichen der Lernziele

Die Lehrgänge bieten Gelegenheit, zusätzlich zu der schriftlichen Information durch das Handbuch aktiv umfassendes Wissen zu dem betreffenden Thema zu erwerben. Die Inhalte aus dem Handbuch werden an praktischen Beispielen, erläutert und von kompetenten Referenten bei Bedarf ergänzt.

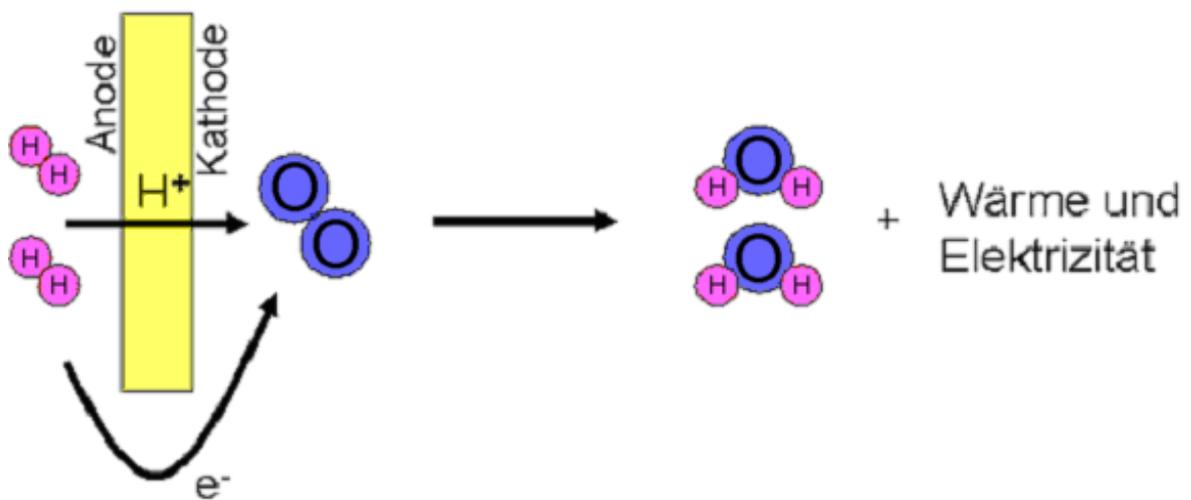
Es wäre vorstellbar, zusätzlich E-learning Einheiten anzubieten. Diese könnte eine interaktive Auseinandersetzung mit dem Thema ermöglichen und es den Lehrgangsteilnehmern erleichtern, sich ein Bild von der neuen Technologie zu machen. Durch grafische Animationen und ausführliche bildliche Darstellungen kann der trockene Fachinhalt anschaulich und attraktiv unter Einbezug des Lernenden vermittelt werden. Komplizierte Sachverhalte würden so verständlicher gemacht – z. B. ließe sich durch eine animierte schrittweise Darstellung der Vorgänge in einer Brennstoffzelle eindrucksvoll deren Funktion verdeutlichen.

4 HANDBUCH

4.1 Deckblatt und Impressum

Handbuch

Brennstoffzellen



Quelle www.pemfc.de

Zentrum für Energie-, Wasser- und Umwelttechnik
(ZEWU)

Handbuch Brennstoffzellen

Zentrum für Energie-, Wasser- und Umwelttechnik (ZEWU)

Buxtehuder Str. 76

21073 Hamburg

Text:

Friederike Schmekal

Rahlstedter Straße

22143 Hamburg

Dieses Handbuch wurde im Rahmen einer Diplomarbeit an der HAW Hamburg im August 2006 fertig gestellt.

4.2 Historische Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie

Bereits 1838 fand Prof. Schönbein in Basel heraus, dass Elektronen freigesetzt werden, wenn Wasserstoff mit Sauerstoff (oder Chlor) reagiert. Diese Erkenntnis der **Polarisation** wurde von dem walisischen Richter und Physiker Sir William Grove (1811 bis 1896) weiter erforscht.

Grove deutete das Phänomen der chemischen Stromerzeugung als **Umkehrung der Elektrolyse**. Die erste „Gasbatterie“ Groves (1842) bestand aus einer Reihenschaltung von einzelnen Elementen mit verdünnter Schwefelsäure als Elektrolyt.

Die Tragweite dieser Entdeckung wurde damals jedoch nur von wenigen erkannt, z.B. von dem Chemiker Wilhelm Ostwald (1853 bis 1932): *“Haben wir ein galvanisches Element, welches aus Kohle und dem Sauerstoff der Luft unmittelbar elektrische Energie liefert (...), dann stehen wir vor einer technischen Umwälzung, gegen welche die bei der Erfindung der Dampfmaschine verschwinden muss. Denken wir nur, wie (...) sich das Aussehen unserer Industrieorte ändern wird! Kein Rauch, kein Ruß, keine Dampfmaschine, ja kein Feuer mehr...“*⁵³

Erst **1932** griff Francis Bacon das Problem auf. In den fünfziger Jahren des vorherigen Jahrhunderts wurde mit der Herstellung der ersten praktisch anwendbaren alkalischen Zelle (AFC) ein großer Erfolg erzielt.⁵⁴

Damals wurden für die bemannte Raumfahrt anstelle von Batterien mit ihrer begrenzten Kapazität effiziente Stromerzeuger für mehrwöchige Raummissionen gesucht. Im Jahre **1963** fand bei der *Gemini*-Mission erstmals eine AFC-Brennstoffzelle Anwendung. Die Anlage wurde mit Wasserstoff und Sauerstoff betrieben, der elektrische Wirkungsgrad betrug 60 %. Das Reaktionsprodukt Wasser war für die Versorgung der Besatzung als Trinkwasser nutzbar. Inzwischen werden Brennstoffzellen in der Raumfahrt routinemäßig eingesetzt, z.B. beim *Apollo*-Projekt oder bei der *Spaceshuttle*-Mission. Heute werden BSZ auch für **außenluftunabhängige** Antriebssysteme (U-Boote) verwendet.

Der Brennstoffzellenantrieb von Pkw und Bussen ist global Gegenstand vieler Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Die Serienproduktion für den Automobilsektor würde auch für stationäre Anwendungen eine erhebliche Kostenreduktion ermöglichen.⁵⁵ Dieser Bereich ist vor allem aus ökologischen Gründen relevant, jedoch wurde eine darauf zielende Entwicklung erst in den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts intensiviert. Vor allem die **Ressourcenverknappung** zwingt zur Nutzung von erneuerbaren Energiequellen.

In letzter Zeit nimmt das Interesse an der BSZ-Technologie sprunghaft zu, wie die wachsende Anzahl von Firmengründungen, Demonstrationsanlagen, die Entwicklung von Prototypen, sowie die Aktivitäten im Bereich Bildung und Öffentlichkeitsinformation zeigen. So wird jetzt der Weg für eine innovative Technologiegeburt geebnet, die schon lange in der Diskussion ist.

⁵³ www.energieportal24.de/brennstoffzellen_geschichte.php

⁵⁴ www.wbzu.de/infopool.php

⁵⁵ www.staxon.com/technologie_brennstoffzelle.htm

4.3 Prinzipieller Aufbau einer Brennstoffzelle

Wie jede Batterie produziert auch eine BSZ durch eine chemische Reaktion elektrischen Strom (**elektrochemische Zelle**). Zwischen Anode und Katode liegt eine Spannung von etwa einem Volt pro Zelle (Leerlaufspannung 1,23 V bei 25 °C). Um eine brauchbare Gesamtspannung zu erreichen, werden mehrere Zellen in Reihe geschaltet.

Als Brennstoff dient **Wasserstoff**, Erdgas oder auch Methanol, woraus Wasserstoff abgespalten wird. Bei einer konventionellen Batterie wird durch die Strom erzeugende chemische Reaktion das Elektrodenmaterial allmählich aufgezehrt – wenn bei der bekannten Alkalizelle beispielsweise die Zink-Elektrode durch den Elektrolyt Kalilauge 'aufgefressen' wurde, ist die Batterie irreversibel erschöpft. Bei einer BSZ werden dagegen die Partner für die chemische Reaktion – die Gase Wasserstoff und (Luft-) Sauerstoff kontinuierlich neu zugeführt. Ein Elektrodenverbrauch findet im Prinzip nicht statt, so dass die Lebensdauer der BSZ fast unendlich im Vergleich zu einer konventionellen Batterie ist. Anders als erschöpfbare Batterien benötigt die BSZ aber einen externen Tank oder einen Gas-Leitungsanschluss.

Die elektrochemische Reaktion setzt sich aus Teilreaktionen an Anode und Katode zusammen. Dieses Grundmuster ist bei allen BSZ-Typen das gleiche. Die Gase Wasserstoff und Sauerstoff reagieren zu Wasser, aber nicht wie bei der bekannten **Knallgasreaktion**: Der Ablauf ist kontrolliert und erfolgt ohne Detonation oder Flamme. Die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser ist zwar exotherm (d. h. es wird Wärmeenergie freigesetzt), aber die Reaktion hat eine hohe Reaktionsschwelle, die zunächst durch Zündenergie Überwunden werden muss. Wenn die Knallgasreaktion einmal eingesetzt hat, entsteht dadurch eine so hohe Temperatur, dass explosionsartig der gesamte Brenngasvorrat reagiert. Bei der BSZ sind Wasserstoff und Sauerstoff durch einen Elektrolyt getrennt, so dass die Reaktion unter Kontrolle bleibt. Es handelt es sich um eine **'kalte Verbrennung'**.

4.3.1 Elektronenfluss

An der Anode wird Wasserstoffgas mit Hilfe eines **Katalysators** in Protonen (H^+ , positiv) und Elektronen (e^- , negativ) aufgespaltet. Pro Molekül H_2 entstehen zwei **Protonen** und zwei **freie Elektronen**.

Die Elektronen gelangen durch den *äußeren Stromkreis* zur Katode des BSZ und lagern sich dort in Gegenwart eines Katalysators an die Sauerstoffatome an. Die Bezeichnungen 'Anode und Katode' beziehen sich auf den *inneren Stromkreis*: Zur Katode wandern die Kationen = Protonen, die Katode stellt den Pluspol der BSZ als Spannungsquelle dar. Umgekehrt ist die Anode der Minuspol der BSZ. Die entstehenden Sauerstoffionen werden durch die über den Elektrolyten transportierten Protonen **neutralisiert**.

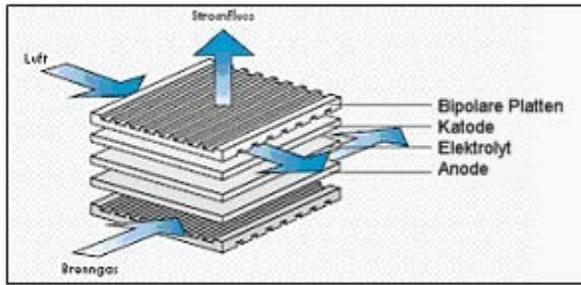


Bild 5: Aufbau einer BSZ
(Quelle: ASUE, 2000, S. 7)

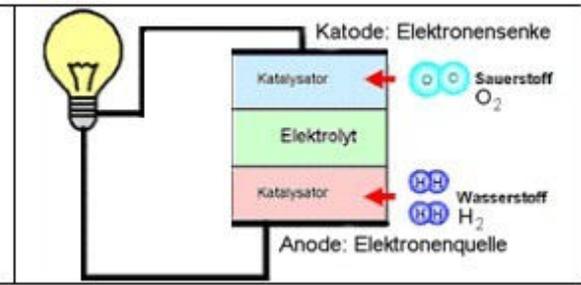


Bild 6: Funktionsschema einer BSZ
(nach efc-GmbH Hamburg)

Es laufen folgende Reaktionen ab:

Anode



Katode



Gesamtreaktion



Die chemische Reaktion setzt dabei außer der elektrischen Energie **Wärmeenergie** frei, die nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung ebenfalls genutzt werden kann.

Aus Wasserstoff und Sauerstoff wird **reines Wasser** gebildet. Pro Wassermolekül werden im äußeren Stromkreis zwei Elektronen von der Anode zur Kathode übertragen.

Wird der äußere Stromkreis unterbrochen, ist kein Elektronenfluss mehr möglich und die chemische Reaktion kommt zum Erliegen. Dabei stellt sich die „*Leerlaufspannung*“ zwischen den Anschlussklemmen ein (**thermodynamisches Gleichgewicht**).

Die Wirkungsweise im Gesamt-Überblick ist in Bild 7 dargestellt.

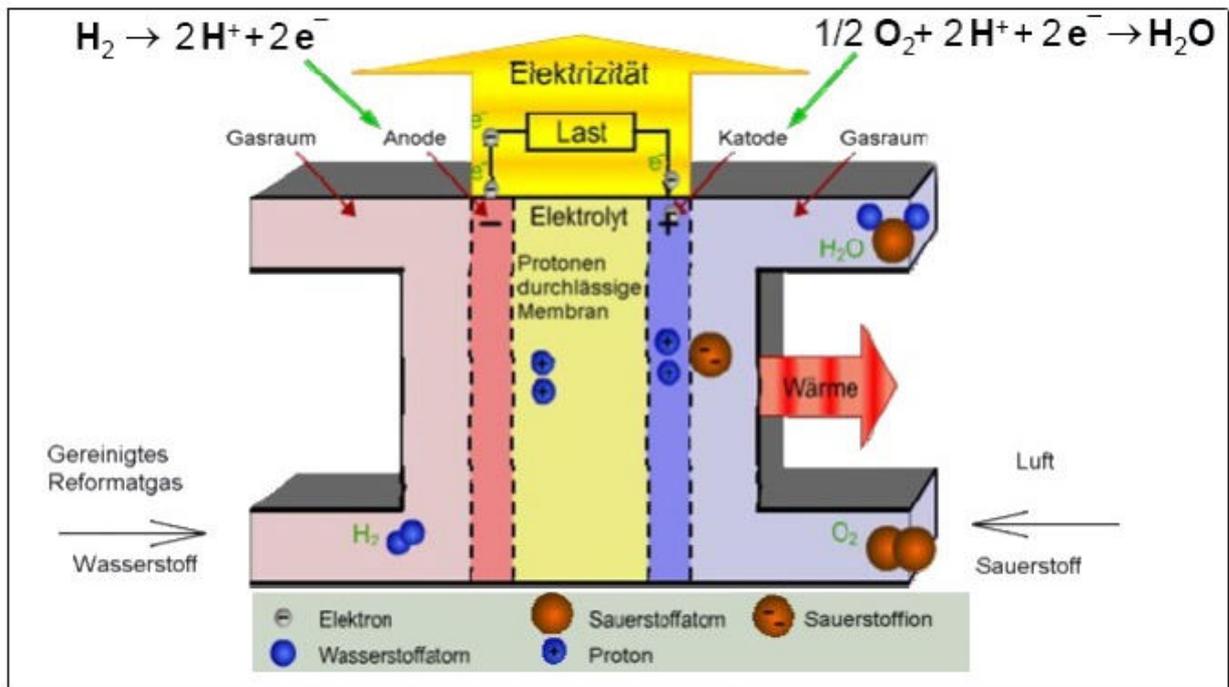


Bild 7: Funktionsprinzip einer Niedertemperatur-BSZ (nach Forschungszentrum Jülich)

4.3.2 Bauarten

Die BSZ-Typen werden nach dem verwendeten Elektrolyten (der die beiden Reaktionsgase voneinander trennt und gleichzeitig den Austausch von Ionen ermöglicht) und der Betriebstemperatur klassifiziert. Bei der *alkalischen BSZ (AFC; Alkaline Fuel Cell)* wird Kalilauge als Elektrolyt verwendet. Da neben Wasserstoff hochreiner Sauerstoff benötigt wird, kommt ein breiter Einsatz in der Energieerzeugung nicht in Frage. Die Zelle ist außerdem sehr empfindlich gegenüber Kohlendioxid, das als Karbonat ausfallen würde. Die AFC wird vorrangig im mobilen und portablen Sektor eingesetzt.

Bei der *phosphorsauren BSZ (PAFC; Phosphoric Acid Fuel Cell)* besteht der Elektrolyt aus Phosphorsäure in einer Siliziumkarbid-Matrix. Die PAFC wird stationär eingesetzt.

Gleichermaßen eine Anwendung im mobilen, im portablen und im stationären Bereich findet die *Polymer-Elektrolyt-Membran BSZ (PEMFC)*. Daher richtet sich das Interesse der Forschung vorrangig auf diesen BSZ-Typ.

Wie die AFC und die PAFC gehört auch die PEM zu den **Niedertemperatur-BSZ** (mit Arbeitstemperaturen bis zu 200°C). Die hohe Leistungsdichte der PEM erlaubt eine kompakte Bauweise, was letztlich auch Materialkosten reduzieren hilft. Außerdem entfaltet die Zelle schon bei Raumtemperatur rund 50% ihrer Leistung, bis sie sich innerhalb von wenigen Minuten selbst auf die Dauerbetriebstemperatur von etwa 90°C gebracht hat (Betriebstemperatur bei neueren Modellen bis zu 200°C). Gespeist wird die PEM mit hochreinem Wasserstoff und mit Sauerstoff aus der Raumluft.⁵⁶

Zu den **Hochtemperatur-BSZ** gehören die *Schmelzkarbonat-BSZ (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell)* und die *oxidkeramische BSZ (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell)*. Hochtemperatur-BSZ sind vorrangig für den mittleren bis hohen Leistungsbereich geeignet, u. a. auch deshalb, weil bei einem Einsatz im unteren Leistungsbereich die anfallende Reaktionswärme nicht optimal genutzt werden könnte. (einigen Watt bis 50 kW_{el})

⁵⁶ Brennstoffzelle -das Multitalent, Bild der Wissenschaft, S. 11, 2002

verstanden, als mittlerer Bereich eine Leistung bis 1 MW_{el} und als oberer Bereich Leistungen ab 1 MW_{el}.⁵⁷⁾

Aufgrund der besseren Eignung von PEM Zellen zum Einsatz im Privathaushalt wird im Weiteren besonders auf diese Art von BSZ eingegangen. Tab. 7 und 8 geben einen Überblick über die BSZ-Typen.

Tabelle 7: Klassifizierung der BSZ-Typen (Quelle: ASUE, 2000, S. 10)

	Anode	Elektrolyt	Kathode
	H ₂ ↓	I _{el} →	O ₂ ↓
AFC	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	OH ⁻ ←	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$
PAFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	H ⁺ →	$2H^+ + \frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$
PEMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	H ⁺ →	$2H^+ + \frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	CO ₃ ²⁻ ←	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
SOFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	2O ²⁻ ←	$O_2 + 4e^- \rightarrow 2 O^{2-}$

Tabelle 8: BSZ-Typen im Vergleich (Quelle: ASUE, 2000, S. 10)

- h: häusliche Strom- und Wärmeerzeugung
- m: mittlerer Leistungsbereich
- o: oberer Leistungsbereich

	Einsatzbereich	Elektrolyt	Arbeits-temp. (°C)	Brennstoff	Entwicklungsstand	Elektrischer Wirkungsgrad (%)
AFC	mobil, portabel, Sonderanwendungen	Kalilauge (30%)	60 – 80	Reinstwasserstoff	kommerziell verfügbar	ca. 60
PAFC	stationär (m)	konz. Phosphorsäure	170 – 200	Wasserstoff, Erdgas, Biogase	kommerziell verfügbar	40 – 45
PEMFC	mobil, portabel, stationär (h/m)	Protonenleitende Membran	70 – 90	Wasserstoff, Erdgas, Methanol	Feldtestphase, Labor	40 – 50
MCFC	stationär (m/o)	Alkalikarbonatschmelze	650	Wasserstoff, Erdgas, Biogase	Feldtestphase, Labor	55 – 60
SOFC	stationär (h/m/o)	stabilisierte Zirkonoxid	900 – 1000	Wasserstoff, Erdgas, Biogase	Feldtestphase, Labor	60 – 70

⁵⁷⁾ Krewitt et al., 2004, S. 43-47

4.3.3 Brennstoffversorgung der PEM -Zelle

Wasserstoff steht für die Wärme- und Stromerzeugung kaum zur Verfügung. Daher muss dieser aus methanhaltigem Erdgas durch **Reformierung** gewonnen werden. Der Reformierungsprozess lässt sich in Teilabschnitte untergliedern:

Tabelle 9: Teilabschnitte der Erdgasreformierung

Teilabschnitt	Vorgang
A	Entschwefelung des Erdgases
B ₁ /B ₂	Wasserstoffbildung
C	Entfernung von Kohlenmonoxid (partielle Oxidation)

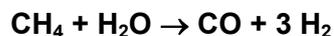
A: Im ersten Schritt wird das Gas entschwefelt (im **Desulfer**). Die im Erdgas enthaltenen Schwefelverbindungen würden die Katalysatoren im Zellstapel der BSZ (Stack) schädigen. Im Desulfer befindet sich ein Granulatfilter (Zusammensetzung nur herstellereintern bekannt) der durch Aufnahme der Schwefelverbindungen mit der Zeit gesättigt wird. Daher muss dieser jährlich ausgetauscht werden.

B: Nach der Durchleitung des Gases durch den Desulfer findet im so genannten Reformer die eigentliche **Umsetzung zu Wasserstoff** statt (unter Einsatz von Wasserdampf). Die Dampfreformierung des Prozessgases geschieht durch zwei Prozessschritte:

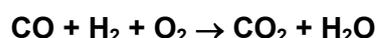
B₁: Zunächst erfolgt eine **endotherme katalytische Umsetzung** des Methans mit Wasserdampf. So wird wasserstoffreiches Prozessgas erzeugt. Die Reaktion findet in Anwesenheit eines Kupferkatalysators bei Temperaturen um die 650°C statt.⁵⁸ Dabei wird aus Methan (CH₄) und Wasserdampf (H₂O) die Gase Kohlendioxid (CO₂) und Wasserstoff (H₂) gewonnen.



B₂: Parallel dazu entstehen aus Methan und Wasserdampf die Gase Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff.



C: Zur Entfernung des entstandenen Kohlenmonoxids ist eine **exotherme katalytische Umsetzung dieses Gases** mit Wasserdampf nachgeschaltet, auch Shiftreaktion (**Prox = Partielle Oxidation** mittels Zinkkatalysator) genannt. Das in der Reaktion B₂ entstandene Kohlenmonoxid würde sonst die Katalysatoren der BSZ schädigen. In der Shift-Reaktion wird das Kohlenmonoxid mit Hilfe von Wasserstoff und Sauerstoff zu Kohlendioxid und Wasser umgewandelt.



Vom Wasserstoff wird das schwerere, sog. **Restgas** abgetrennt, das bis zu 60 % brennbare Verbindungen enthält. Es wird zur Befeuerung des Reformers verwendet. Die Reformierung

⁵⁸ Angaben efc GmbH Hamburg, PEMFC

hat einen **Gesamtwirkungsgrad** von etwa 78 %, d.h. die Menge des gewonnenen Reformatgases ist hoch bezogen auf das stöchiometrische Maximum.⁵⁹

Für die Gasaufbereitung im Reformer wird Wasser benötigt. Auch der BSZ-Stapel benötigt Wasser zur Kühlung. Das Wasser muss hochrein sein, um Kalk- und Salzablagerungen zu vermeiden; Kalkablagerungen im Reformer mindern den Wirkungsgrad. Im Wasser enthaltene Salze können an den Elektroden des Stacks zu Kurzschlüssen führen, wodurch die Anlage ausfällt. Daher gehört zu einer BSZ-Anlage eine **Wasseraufbereitungsanlage**, die Härtebildner und Salze durch einen Ionenaustauscher entfernt.

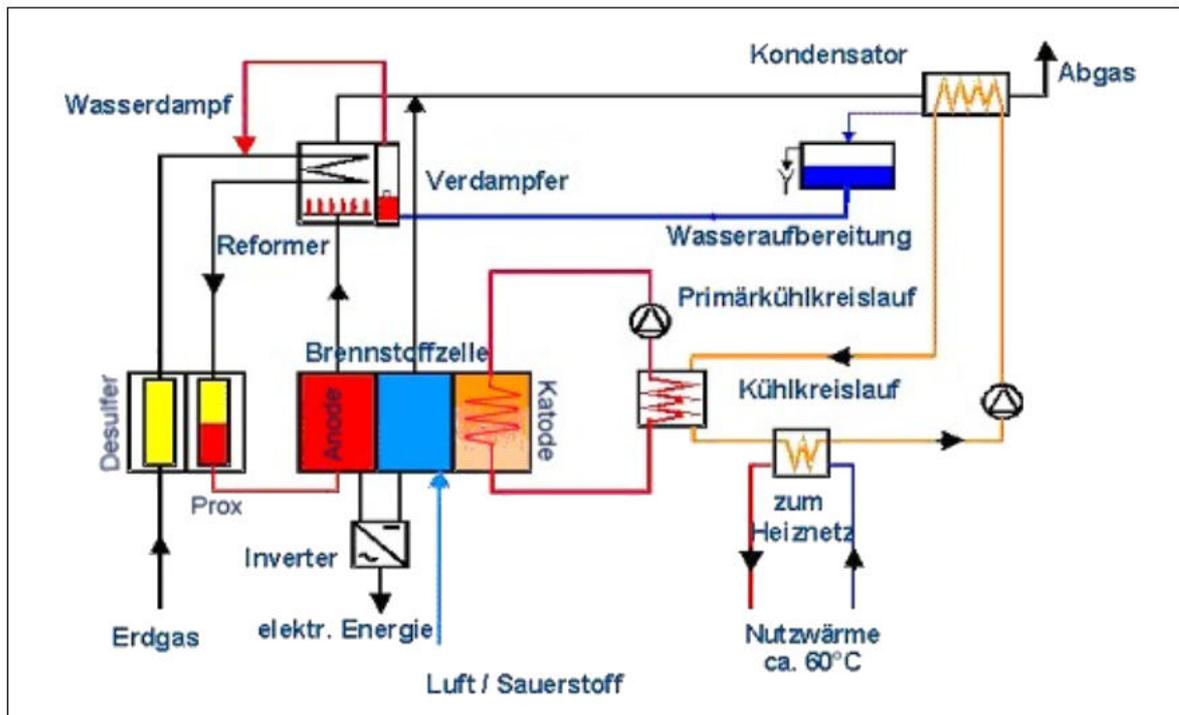


Bild 8: Vereinfachtes Fließschema einer PEM-BSZ (nach efc-GmbH-Hamburg)

Der Wasserkreislauf des **Heizungswassers** innerhalb der Anlage arbeitet mit unbehandeltem Wasser. (Bei der Feldtestanlage der efc-GmbH Hamburg sind die Leitungen aus unterschiedlichen Materialien, um beide Leitungssysteme sicher auseinander halten zu können.)

4.4 Anwendungsbereiche

Statt nach dem Elektrolyt zu klassifizieren, ist es u. U. für die Praxis zweckmäßig, die verschiedenen Brennstoffzellentechnologien nach den **Einsatzmöglichkeiten** einzuteilen. In Betracht kommen die mobile, die stationäre und die portable (s.u.) Anwendung. In jedem Fall wird Strom erzeugt, wobei auch immer ein gewisser Anteil an Wärmeproduktion unvermeidlich ist.

⁵⁹ Angaben efc GmbH Hamburg, PEMFC

Tabelle 10: Anwendungsbeispiele der BSZ-Technologie (nach Koschorke, W./Bünger, U., 2005, S. 6)

Anwendung	Charakterisierung	Beispiele
mobil	Kopplung mit einem Antrieb	Kfz, Lkw, Busse, Eisenbahn, U-Boot
stationär	Kopplung mit Wärme/Kälte	Heizanlagen im E/MFH, Kleingewerbe, KWK –Großanlagen
portabel	Ersatz von Batterien und Akkus oder kleinen Verbrennungsmotoren	Computer, Handys, kabellose Kleingeräte, Camcorder, Notstrom – Aggregate etc.

4.4.1 Stationäre Anwendungen

Bei optimalem Einsatz von stationären BSZ wird die anfallende Abwärme gleichzeitig mitgenutzt, was z.B. zur **Hausenergieversorgung** sinnvoll ist. Wegen der gleichzeitigen Produktion von elektrischer und thermischer Energie handelt es sich bei BSZ im Prinzip um KWK–Anlagen.

Viele Hersteller sehen für den Einsatz der BSZ-Technologie in der Hausenergieversorgung die **PEM-BSZ** vor. Sie arbeitet im Niedertemperatur Bereich von ca. 70 – 80 °C (künftig 120 – 140 °C). Damit können auch mittlere Betriebe wie Krankenhäuser, Hotels, industrielle Gewerbeanlagen sowie Handwerksbetriebe versorgt werden.⁶⁰

Andere Hersteller setzen auf die **SOFC-BSZ**, die im Hochtemperaturbereich arbeitet (800 – 900 °C, künftig 600 – 700 °C). Die SOFC bringt dabei mit **geringeren Materialkosten** (*geringerer Pt-Bedarf wegen höherer Betriebstemperatur*) eine Kostenreduktion mit ein. Außerdem bietet sie den Vorteil der internen Reformierung (kein externer Reformer erforderlich), womit auch fossile gasförmige Brennstoffe eingesetzt werden können.⁶¹ Negativ zu bewerten sind allerdings die erhöhten **Temperaturanforderungen** an die Materialien.

Stationäre BSZ –Anlagen können auch als **Kraftwerksanlagen** von 200 kW bis 1 MW betrieben werden. Hier findet insbesondere die Schmelzkarbonat-BSZ (**MCFC**, Hersteller z.B. MTU-Friedrichshafen), die phosphorsaure BSZ (**PAFC**, Hersteller z.B. ONSI-Connecticut) sowie die oxidkeramische BSZ (**SOFC**, Hersteller z.B. Siemens-Westinghouse) Anwendung.

Zur Deckung des **Raumwärmebedarfs** wird ein bestimmter Energiebetrag benötigt, der vom Alter und der Dämmung des Gebäudes abhängt. In den Sommermonaten (Juni bis September) sinkt der Raumwärmebedarf wesentlich ab. Die Energieversorgungssysteme müssen daher eine weit reichende Parametervariation erlauben und flexibel in der Handhabung sein. Hierbei bietet der **wärmegeführte** Betrieb der BSZ–Geräte einen entscheidenden Vorteil; je nach aktuellem Wärmebedarf schaltet sich bei Bedarf automatisch ein Zusatzheizgerät ein.⁶² Dieses kann entweder in das Gerät selbst integriert werden oder als unabhängiges Aggregat aufgestellt sein.

⁶⁰ Koschorke, W./Bünger, U., 2005, S.8

⁶¹ Betrieben werden die Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen im stationären Bereich bis 2010 wohl ausschließlich mit fossilen Brennstoffen, den Wasserstoff ist noch nicht im Nennswerten Maße zur individuellen Versorgung verfügbar.

⁶² Da auch BSZ -Aggregate nach einem wirtschaftlichen Optimum ausgelegt sind, können sie auch im Volllastbetrieb den Energiebedarf in den Wintermonaten nicht abdecken.

Bei den vertretbaren Außenmaßen des BSZ-Heizgeräts für ein EFH von ca. 1,00 * 0,50 * 2,00 m (B*T*H) empfiehlt sich die **Integration des Zusatzheizgeräts**. Nachteilig für ein externes Zusatzgerät ist, dass keine Anschlussnorm existiert, vorteilhaft dass es individuell für den Wärmebedarf des jeweiligen Objektes gewählt werden kann. Optimal ist ein Heizgerät mit einem möglichst großen Variationsbereich der Heizleistung.

Der **Warmwasserbedarf** ist im Gegensatz zum Heizenergiebedarf über das Jahr hin konstant und lediglich vom Nutzerverhalten abhängig. Untersuchungen zum Warmwasserbedarf in Deutschland geben einen Bedarf von etwa 45 l pro Person und Tag bei 60 °C Warmwassertemperatur an.⁶³ Das entspricht einem **Energiebedarf** von ca. 1,6 kWh pro Tag und Person (ca. 600 kWh im Jahr). Um den Warmwasserspitzenbedarf abzudecken, wird empfohlen, den **Pufferspeicher** auf 200 l pro WE auszulegen.⁶⁴ Ein BSZ-Gerät mit 3 kW thermischer Leistung ist zur Warmwasserversorgung von bis zu zwei Personen ausreichend. Die Firma Vaillant hat einen Warmwasserspeicher zum Patent angemeldet, der bereits über eine integrierte 'Tauchsieder-BSZ' verfügt.

Bei der elektrischen Versorgung eines Privathaushalts hat die tarifliche Ausgestaltung der öffentlichen Netzanbindung einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Klein-BHKW (el. Leistung bis 15 kW). Eine KWK-freundliche Gestaltung des Stromaustauschs von Haus zu Haus würde eine neue Versorgungssituation bieten, um die öffentlichen Netze zu entlasten. Insbesondere bei dichter Bebauung und einem Stromverbund zwischen benachbarten Häusern, wird der Einsatz von Mini-BHKW im Einfamilienhaus begünstigt: Es ist dann nur **eine** Schnittstelle zum öffentlichen Netz erforderlich ist,

Der Vorteil von Klein-BHKW mit BSZ-Technik liegt bei den hohen **Stromkennzahlen**. Studien zur Wirtschaftlichkeit stationärer Geräte legen nahe, BSZ-BHKW **hybrid**-gesteuert zu betreiben, das heißt primär nach dem aktuellen Strombedarf im betreffenden Objekt und erst sekundär nach dem Wärmebedarf. Als optimale Systemgröße wurden etwa 0,5 – 1,0 kW_{el} für Einfamilienhäuser und 5 – 7 kW_{el} für Mehrfamilienhäuser (8 bis 12 WE) ermittelt.⁶⁵

4.4.2 Mobile Anwendungen

Unter mobilem Einsatz der BSZ-Technologie ist vor allem die Anwendung für den **Antrieb** von Kraftfahrzeugen zu verstehen, wobei die Stromversorgung an Bord von Automobilen ausgeschlossen ist (siehe portable Anwendungen).

Für die Fahrzeugindustrie ist bei Einführung der neuen Antriebssysteme eine Reduzierung des Bedarfs an konventioneller Automobiltechnik um mehr als 70 % zu erwarten⁶⁶(Abb. Veränderung der Nachfrage). Die Händler können sich ausschließlich auf den Verkauf beschränken, dem Kunden muss allerdings eine vom Hersteller autorisierte Werkstatt genannt werden oder sie müssen sich auf die neue Technologie umstellen.

Außer im Kfz Sektor wird auch eine Anwendung im **Schiffs- und Bahnantriebsbereich** angestrebt. Die AFC-BSZ hat bereits erfolgreichen Eingang in den militärischen Bereich gefunden. Einsatz im mobilen Sektor finden PEM-BSZ (U-Boot/Fahrzeugantrieb) sowie SOFC (Bordenergie)-BSZ. Für die Bahntechnik besteht der Vorteil, dass aufwändige Oberleitungen und das elektrische Versorgungssystem eingespart wird.⁶⁷ Die Lokomotiven sollen durch BSZ an Bord direkt versorgt werden. Zur Wasserstoff-Versorgung können z.B.

⁶³ Koschorke, W./Bünger, U., 2005, S. 10

⁶⁴ BEWAG/GASAG/Tab –Brennstoffzellenstudie, S. 4-17

⁶⁵ Koschorke, W./Bünger U., 2005, S. 12

⁶⁶ Koschorke, W./Bünger U., 2005, S. 31

⁶⁷ Bild der Wissenschaft plus, Die Power Generation, S. 38

Windkraftanlagen herangezogen werden – drei Anlagen mit je 1,5 MW Leistung würden für die mittlere Leistung einer Lokomotive ausreichen.

Ein weiteres Beispiel der mobilen Anwendung bilden die BSZ-Citaro **Busse** von Mercedes Benz. Im Laufe eines Testbetriebs sind in Amsterdam, Barcelona, London, Luxemburg, Porto, Stockholm, Stuttgart und Hamburg jeweils drei Busse mit Wasserstoffantrieb im normalen Linienverkehr eingesetzt worden (Projektzeit 2003-2005).

4.4.3 Portable Anwendung

Portable BSZ-Versorgungssysteme dienen der Versorgung von elektrischen Geräten im Leistungsbereich von 10 W bis 10 kW, die bisher mittels einer **Batterie**, eines **Akkumulators** oder **Aggregats** netzunabhängig versorgt werden. Der Einsatz einer BSZ soll die Batterie bzw. den Akku ersetzen und den Betrieb zusätzlich komfortabler gestalten. Der Austausch der Batterie bzw. die Aufladung des Akkus würde entfallen, dafür wäre die Zelle mit Wasserstoff oder Methanol (je nach Typ) zu versorgen. Somit vergrößert sich der nutzbare Anwendungsbereich der Geräte im High-Tech-Alltag erheblich. Alle elektronischen Kleingeräte wie Camcorder, Handys, Laptops, Drucker aber auch Bohrschrauber können von der **Substitution** profitieren.⁶⁸

Eines der Hauptprobleme von derartigen Versorgungseinheiten wird die Baugröße darstellen. BSZ haben zwar eine viel größere spezifische **Energiedichte** als Akkus, diese jedoch eine sehr viel höhere spezifische **Leistungsdichte**. Bei den erwähnten Anwendungen werden allerdings selten hohe Leistungen verlangt (Ausnahme z. B. Bohrschrauber) so dass die BSZ im Vorteil ist.

Im Rahmen der CeBIT 2006 wurden von den taiwanesischen Unternehmen Antig und ACV bereits erste serienreife **Notebooks** mit BSZ-Versorgung angeboten. Die Zelle selbst hat dabei die Größe eines CD-Rom-Laufwerks. Versorgt werden die Zellen mit Methanol und in die sog. Media Bay in das Notebook eingesetzt. AVC kombinierte dabei die SOFC Brennstoffzellenmodule von Antig mit den eigenen Erfahrungen in den Bereichen Wärmetechnik und Systemdesign. So soll eine hohe Funktionssicherheit zu einem konkurrenzfähigen Preis gewährleistet werden.⁶⁹

Der Hersteller Canon will Drucker mit BSZ ausstatten. Prototypen wurden bereits in Tokio präsentiert. Andere Hersteller wie NEC, Toshiba, Hitachi und NTT Docomo engagieren sich ebenfalls auf dem Sektor von portablen Lösungen. Die Herstellung von Serienprodukten für den Markt ist jedoch bisher noch nicht gelungen.

Der Hauptvorteil der BSZ gegenüber dem Akku liegt darin, dass die Betriebszeit durch den Wechsel des Brennstofftanks beliebig ausgedehnt werden kann, ohne dass ein Anschluss an das Stromnetz erforderlich ist.

4.5 Einsatz von Brennstoffzellen im Privathaushalt

4.5.1 Wandel der Energieversorgungsstruktur

Mittelfristig werden BSZ einen wichtigen Beitrag zur wirtschaftlichen Entwicklung leisten. Sie sind eine neue **Schlüsseltechnologie** für die mobile, portable und stationäre Energieversorgung. Kleine BSZ-Heizgeräte erzeugen direkt am Verbrauchsort **Strom** und **Wärme** und erschließen noch neue Potenziale im Wohnsektor. Damit wird eine

⁶⁸ Koschorke, W./Bünger, U., 2005, S. 37

⁶⁹ www.elektroauto-tipp.de

Dezentralisierung der Stromversorgung vorangetrieben und ein wichtiger Beitrag zum **Klimaschutz** geleistet. Dennoch können die heutigen Großkraftwerke kurzfristig nicht durch BSZ ersetzt werden. Erst langsam werden sich Mischstrukturen herausbilden - dezentrale und zentrale Technik werden gemeinsam im **Verbund** betrieben. Grundlastkraftwerke, Mittellastanlagen und kleine dezentrale Erzeuger optimieren die Stromerzeugung. Deutsche EVU gehen davon aus, dass sich der Anteil der Stromerzeugung durch **Großkraftwerke** von derzeit 76 % auf 66 % im Jahre 2010 verringern wird, bis zum Jahr 2020 sogar auf 54 %. In weniger als 20 Jahren sollen also bereits 46 % unseres Stroms aus KWK-/KKK-Anlagen und regenerativen Kraftwerken kommen.⁷⁰ Häufig im Gespräch ist die Vision der 'virtuellen Kraftwerke'. Statt Großanlagen sollen zigtausende von dezentralen Anlagen Strom erzeugen. Gleichzeitig werden über intelligente Netzwerke die Anlagen von Energiekunden mit einbezogen, vom Solarmodul auf dem Reihenhausbach bis hin zur Windkraftanlage, die von einer Betreibergesellschaft installiert ist.

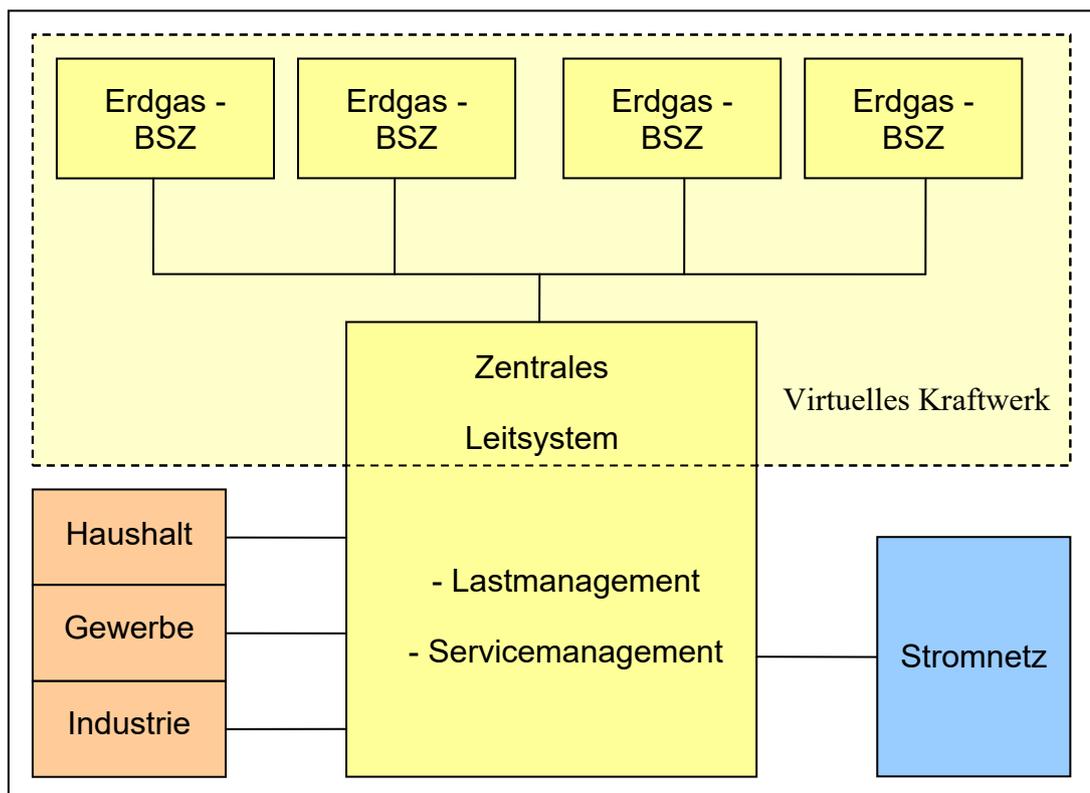


Bild 9: Energiemanagement unter Einbindung virtueller Kraftwerke (Quelle: BIBB, BSZ in der Haustechnik, S.14)

Der Einsatz zur **dezentralen Energieversorgung** verlangt Techniken mit folgenden Eigenschaften:⁷¹

- kleine Einheiten (1 bis 10 kW_{el})
- schnelles Anfahren von Raumtemperatur aus
- schnelle Reaktion auf Lastwechselanforderung
- hohe Stromkennzahl
- akzeptables Temperaturniveau für die Wärmenutzung
- effiziente, integrierte Brenngasaufbereitung
- minimale Verluste durch Nebenaggregate

⁷⁰ Bild der Wissenschaft plus, die Power Generation, 2002, S. 34

⁷¹ Krewitt, W., et al., 2004, S. 43

- niedrige Kosten

Dezentrale intelligente **Netzwerke** optimieren Erzeugung und Verbrauch bereits auf der Nieder- und Mittelspannungsebene und greifen erst dann auf die Hochspannungsebene zurück, wenn entweder Defizite oder Überschüsse in dem jeweiligen Gebiet entstehen. Einig ist sich die Energieversorgungsbranche auch, dass künftig verstärkt Anlagen zur gleichzeitigen Nutzung von Strom und Wärme (bzw. Kälte) sowie regenerative Kraftwerke gebaut werden müssen. Grund dafür ist die endende Überkapazität in der Stromversorgung. Der Strukturwandel wird auch durch staatlich initiierte Förderprogramme begünstigt.

4.5.2 Alternativen zur konventionellen Energieversorgung

Die BSZ-Technologie muss sich auf einem Markt behaupten, der durch zahlreiche Konkurrenzsysteme gekennzeichnet ist. Dies gilt sowohl für den Bereich der Kraftwerke als auch für den KWK-Bereich, wo Motor-BHKW, Stirling-Motoren und Gasturbinen ein breites Leistungsspektrum abdecken, ebenso im Bereich der reinen Wärmeerzeugungssysteme, wo Erdgas-Brennwertkessel, elektrische Wärmepumpen oder Lüftungskompaktgeräte im Wettbewerb stehen.

Bei einem ökonomischen und ökologischen **Vergleich** der verschiedenen Systeme ist auf die Eigenheiten zu achten. Nicht alle Systeme können in einem Zuge miteinander verglichen werden (siehe Tab. 11, Charakterisierung von Konkurrenzsystemen).

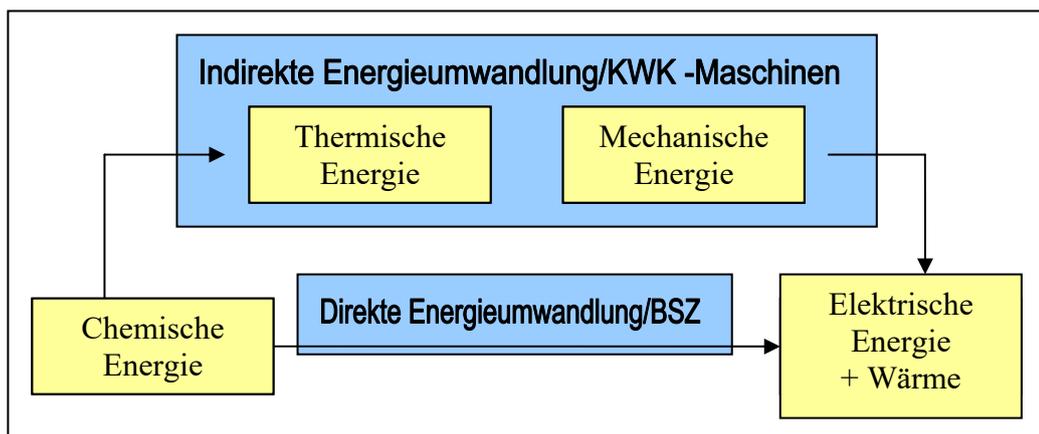


Bild 10: Umwandlungsstufen einer Kraft-Wärme-Maschine und einer BSZ (nach ASUE, Stationäre Brennstoffzellen, S. 6/BIBB, Brennstoffzellen in der Haustechnik, S.9)

4.5.2.1 Technologien der Wärmebereitstellung

- **Gas-Brennwerttechnik**

Vorteilhaft bei der Gas- und Brennwerttechnik ist, dass durch zusätzliche Wärmetauscher das Rauchgas soweit abgekühlt wird, dass bei der Verbrennung von Erdgas entstehendes Wasser kondensiert und die freiwerdende **latente** Wärme genutzt werden kann. Der **Normwirkungsgrad** wird mit bis zu 108 % (seitens der Hersteller) angegeben. Diese Angaben übertreffen, insbesondere im Vollastbetrieb, die in der Praxis erzielbaren Nutzungsgrade. (Ein Systemwirkungsgrad von über 100 % ist nach dem Energieerhaltungssatz nicht möglich. Der Trick besteht hier darin, dass als Bezugsgröße nicht der gesamte Energiegehalt des Brenngases gewählt wird, sondern der um die Kondensationsenergie niedrigere `untere Heizwert`!)

Die direkten Emissionen von Brennwert- und Industriekessel werden anhand von Emissionsfaktoren bilanziert; GEMIS 2002 (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) und ESU 1996 (Energie- und Stoffumsetzungen in der Umwelt).

- **Öl-Kessel**

Alternativ zu Erdgaskesseln werden in vielen Versorgungsgebieten Ölheizkessel eingesetzt. Bei Heizöl ist die aufgrund des geringeren Wasserdampfanteils im Rauchgas zurückgewinnbare latente Wärmemenge geringer, so dass die Wirkungsgradsteigerung durch Ausnutzung der Abgaskondensation deutlich geringer ist. Das theoretische **Wirkungsgrad** Maximum, beträgt bei der Verbrennung von Heizöl 106 %.⁷² Die geringere Wirkungsgradsteigerung und der zum Teil erhebliche Schwefelanteil im Brennstoff verhinderten bisher einen nennenswerten Einsatz der Brennwerttechnik bei Ölbrennern.

- **Pelletheizungen**

Neben Scheitholz und Stroh können auch **Holzpellets** (Presslinge aus naturbelassenen Holz; Säge- oder Hobelspäne) oder **Hackschnitzel** zur Befuerung von Zentral- oder Einzelheizungen eingesetzt werden. In Deutschland sind überwiegend Kleinstanlagen (<15 kW_{th}) oder Kleinanlagen (≤ 350 kW_{th}) gebräuchlich. Dabei hat die automatische Beschickung der Anlagen deutlich den Bedienkomfort erhöht. Pellet befeuerte Heizungsanlagen haben den Vorteil, dass sie nahezu wartungsfrei sind. Rußablagerungen im Befuerungsraum und Emissionsbildung sind vernachlässigbar. Beim Heizen mit Holz entsteht nur soviel Kohlendioxid wie der Rohstoff, d.h. die Pflanze, im Laufe seines Wachstums aufgenommen hat.

Für die Pelletheizungen spricht auch eine hohe **Energiedichte** des Brennstoffs; dies erfordert nur vergleichsweise geringe Lagervolumina.

Gegenwärtig sind Anlagenleistungen von ca. 7 kW_{th} bis zu ca. 60 kW_{th} Nennleistung auf dem Markt verfügbar. Der **Wirkungsgrad** einer guten Holzpellet-Heizung sollte bei rund 90 % liegen (Holzpellets-Online 2003). Als Jahresmittel über verschiedene Teillastansprüche wird in Tab. 10 von einem Jahresnutzungsgrad von 85 % ausgegangen.⁷³

- **Elektrische Sole/Wasser-Wärmepumpe**

Wärmepumpen (**WP**) heben das Temperaturniveau eines Wärmestroms unter Einsatz von Hilfsenergie auf eine nutzbare Temperatur an. Dabei arbeitet die WP nach dem Prinzip des der **Kältemaschine**.

Zur Bewertung von Maschinen wird allgemein das Verhältnis von Ausgangsleistung zur Eingangsleistung herangezogen. Dieses Verhältnis wird als **Wirkungsgrad** bezeichnet. Im Fall der WP wird das Verhältnis der abgegebenen Wärmemenge zur Antriebsleistung als **Leistungszahl** η benutzt. Die **Arbeitszahl** β (beta) einer WP setzt anstelle der Leistungen die über einen gewissen Zeitraum umgesetzten Energiebeträge ins Verhältnis. Diese Kennzahl entspricht dem Nutzungsgrad einer konventionellen Heizungsanlage. Bedingt durch den Arbeitsprozess sind die Leistungs- und Arbeitszahlen einer WP vom Temperaturhub (Temperatur-Differenz zwischen Kondensator und Verdampfer) abhängig. Aufgrund internen und externen Einflüsse sind die realen Arbeitszahlen, auch bei baugleichen Anlagen und Systemen, in der Praxis unterschiedlich. Für schlecht abgestimmte

⁷² Krewitt, W., 2004, S. 54

⁷³ BSZ in der KWK, 2004, S.55

Systeme ergeben sich Arbeitszahlen von ca. 2,5, bei effizient arbeitenden Systemen bis zu 3,5.⁷⁴ Mit Einschluss der Brauchwasserbereitstellung sinken die erreichbaren Jahresarbeitszahlen (**JAZ**) zum Teil erheblich.

Direkte **Emissionen** entstehen während der Betriebsphase überwiegend durch Leckagen des Sole- und Arbeitsmittelkreislaufes, nach Zogg 1999 (Zitat) ist bei der Befüllung der Anlage mit einem durchschnittlichen Verlust von 3 % des Kältemittels zu rechnen. Im Betrieb der Anlage ist mit 2 bis max. 8 % Verlust pro Jahr zu rechnen.⁷⁵

Wichtiger ist bei der Beratung zum Wärmepumpeneinsatz die vorgeschaltete Energieanforderung; Eine WP benötigt mechanische **Antriebsenergie**, die durch einen Elektro- oder Verbrennungsmotor bereitgestellt werden muss.

Im Fall des **Elektroantriebs** ist der Kraftwerk- Wirkungsgrad zu berücksichtigen. Von der eingesetzten Primärenergie wird beim Verbraucher nur etwa 1/3 in Form elektrischer Energie verfügbar, den Hauptanteil beanspruchen die Umwandlungen im Kraftwerk, sowie Umspann- und Leitungsverluste, wobei in jeden Fall unerwünschte Wärme entsteht.

Nach einem ersten Markterfolg zu Anfang der achtziger Jahre kam der Absatz elektrischer WP in Deutschland fast zum Erliegen, erholt sich jedoch seit Mitte der neunziger Jahre stetig. 2004 wurden knapp 12.700 elektrische Heizungs-WP sowie knapp 3.800 Warmwasser-WP abgesetzt.⁷⁶

Prinzipiell ist jede Art WP-Technik gegenüber Kesselanlagen zu bevorzugen, senkt doch der thermodynamische Prozess durch Nutzung von Umweltwärme den Primärenergieverbrauch und, aus Gründen des Klimaschutzes heute ein vorrangiges Ziel, die CO₂-Emissionen. Für die heutzutage geringen und durch weitere Verbesserung des Wärmeschutzes auch weiter sinkenden erforderlichen Heizleistungen stehen leider noch immer keine marktreifen, brennstoffbetriebenen WP zur Verfügung.⁷⁷ Deshalb wird zurzeit ausschließlich die Elektro-WP eingesetzt.

- **Thermische Solaranlagen**

Die Verbesserungen im Bereich von **Solarkollektoren** in den letzten Jahren konzentrieren sich auf eine Erhöhung der Transmission der Glasabdeckung, auf effektivere selektive Absorberbeschichtungen und auf einen verbesserten Wärmeübergang zwischen dem Absorber und den Wärmeleitungsrohren.

Prinzipiell wird zwischen Vakuumröhren-, Flach- Schwimmbadkollektoren unterschieden. Die Größe der Anlagen variiert zwischen 2 m² für die sommerliche **Warmwasserbereitung** eines Ein-Personen-Haushalts und 10.000 m² für die Einspeisung in ein **Nahwärmenetz**. Der Temperaturbereich liegt meist bis 40 – 70 °C für die Brauchwasserversorgung.

Die **Jahresausbeuten** sind stark von der Auslegung der Solaranlagen abhängig. Sollen nur 30% des jährlichen Warmwasserbedarfs solar gedeckt werden, so sind Systemausbeuten von 650 kWh/(m² Kollektorfläche) im Jahr möglich. Bei typischen Warmwasseranlagen mit einem Deckungsanteil von 60 % sinkt die Ausbeute bereits auf 380 kWh/m²a. Reicht die Größe des Kollektorfeldes aus um in den Übergangsmonaten auch noch einen Teil des Raumwärmebedarfs zu decken, so entstehen während der Sommermonate ungenutzte **Wärmeüberschüsse**, wodurch die solare Ausbeute auf 230 kWh/(m² * a) sinkt. Die höhere

⁷⁴ Erb und Eicher et al. 2000

⁷⁵ Krewitt/Pehnt, 2004, S. 56

⁷⁶ Dehli, M., Studie, 2005, S. 18

⁷⁷ Görlicke, P., 2005, S. 1

Bedarfsdeckung bzw. die Raumnutzung in der Übergangszeit setzt also eine größere Kollektorfläche voraus.

4.5.2.2 Kraft-Wärme-Kopplung

- **Motor-BHKW**

Motorische Blockheizkraftwerke (BHKW) durchliefen in den letzten Jahren eine intensive Entwicklung, die sowohl höhere erzielbare **elektrische Wirkungsgrade** als auch eine verstärkte **Wärmenutzung** ergab.

Motor-BHKW können sowohl zur Versorgung von Wohngebäuden oder Nah-/Fernwärmenetzen als auch in der industriellen Energieversorgung eingesetzt werden. Die **ausgekoppelte Wärme** kommt überwiegend aus dem Abgasstrom (bei 450 °C bis 500 °C) und zu etwa 40 % aus Kühlwasser und Schmieröl (Temperaturen um 100 °C).

Der **elektrische Nutzungsgrad** von erdgasbetriebenen Otto –Motor -BHKW variiert zwischen 25 % bei Kleinanlagen (einige kW_{el}) und etwa 44 % bei Großmodulen.⁷⁸

Die erzielbaren **Gesamtnutzungsgrade** von BHKW liegen zwischen 83 % und 95 %⁷⁹. In Tab. 10 werden 90 % für den Gesamtnutzungsgrad angesetzt.

Entsprechend dem höheren Schwefelgehalt des Biogases werden bei Biogasbetrieb höhere SO₂-**Emissionsfaktoren** zu Grunde gelegt. Als Zusammensetzung des Biogases wurde in Tab. 10 von 42,7 % Methan, 56,6 % Kohlendioxid und 0,78 % Spurengase (N₂, H₂S, organische Komponenten) ausgegangen (ifeu-Dat 2002, Literatur BSZ in d KWK).

- **Stirling–Motor–BHKW**

Weltweit entwickeln verschiedene Firmen BHKW auf Basis von Stirling–Motoren. Diese befinden sich derzeit in der Entwicklungs- und Vorserienphase. Vorteil des Stirling–Motors ist, dass er von der Art der Wärmequelle **unabhängig** ist und sich so insbesondere für den Betrieb mit erneuerbaren Brennstoffen eignet. Dieser Motor ist auch unempfindlich gegenüber Schwankungen der Qualität des eingesetzten Brennstoffs. Des Weiteren gelangen keine schädlichen Rückstände aus der Verbrennung in den Motor selbst.

Die Entwickler gehen bei Stirling-BHKW von einem maximalen **elektrischen Wirkungsgrad** von 28 % aus. In der Gegenüberstellung der Systeme (Tab. 11) werden ein elektrischer Jahresnutzungsgrad von 24 % und ein Gesamtnutzungsgrad von 96 % angesetzt.

Das in Tab. 11 betrachtete Stirlingmotor-BHKW arbeitet mit einer externen Verbrennung im FLOX –Verfahren (Flammlose Oxidation, auch biogene Brennstoffe) und erreicht damit sehr niedrige Schadstoffemissionen.⁸⁰

- **Gasturbinen**

Gasturbinen gehören zu der Gruppe der Strömungsmaschinen. Sie können mit gasförmigen und flüssigen Brennstoffen betrieben werden. Gasturbinen sind gekennzeichnet durch

⁷⁸ In der Größenklasse 200 kW elektrisch wird hier von einem elektrischen Jahresnutzungsgrad von 35 % ausgegangen.

⁷⁹ (mittels Einsatz eines zweistufigen Wärmetauschers oder Hochtemperatur-Brennwertnutzung)

⁸⁰ Tabellenangaben Messungen der Fa. Mayer & Cie, GEMIS 2000

niedrige Investitionskosten, hohe Zuverlässigkeit und geringen Wartungsaufwand, hohe Abwärmertemperaturen (bis 500 °C), schnelle Startbereitschaft, geringes Gewicht bei schlechtem Wirkungsgrad und hohen Emissionen.

Typische **elektrische Nettowirkungsgrade** von kleinen Gasturbinen (3,5 – 6 MW_{el}) liegen heute bei 30 %. Unterhalb von 2 MW_{el} geht der Wirkungsgrad heutiger Gasturbinen aufgrund ihrer Bauweise auf unter 25 % zurück. Vorzugsweise werden Gasturbinen bei Anwendungen mit nahezu konstanter Auslastung eingesetzt, da der Teillastbetrieb mit einem weiteren Abfall des Wirkungsgrades verbunden ist.⁸¹ Bei Regelung durch die **Brennstoffzufuhr** nimmt die Temperatur vor Turbineneintritt ab, was sich ungünstig auswirkt.

In dieser Aufstellung (Tab. 11) wird von einem **elektrischen Jahresnutzungsgrad** von 39 % und einem **Gesamtnutzungsgrad** von 74 % (keine Warmwassernutzung), bzw. von 84 % (mit Warmwassernutzung) ausgegangen.

Die **Emissionen** von Gasturbinen sind zum Großteil durch die Ausführung und Gestaltung der Brennkammer vorgegeben. Kritische Schadstoffe bei Gasturbinen sind Stickoxide (NO und NO₂), die aufgrund der hohen Temperaturspitzen, des hohen Luftüberschusses und der turbulenten Verbrennung entstehen.⁸² Beim Kombinationsbetrieb einer Hochtemperatur-BSZ mit einer Gasturbine wird die Temperatur des Luft-Abgasstroms zur Aufheizung der BSZ ausgenutzt.

Folgende Darstellung (Bild 11) macht die ungleichen Wirkungsgrade der verschiedenen Stromerzeugungstechniken sichtbar und zeigt die Effizienz der BSZ-Systeme auf.

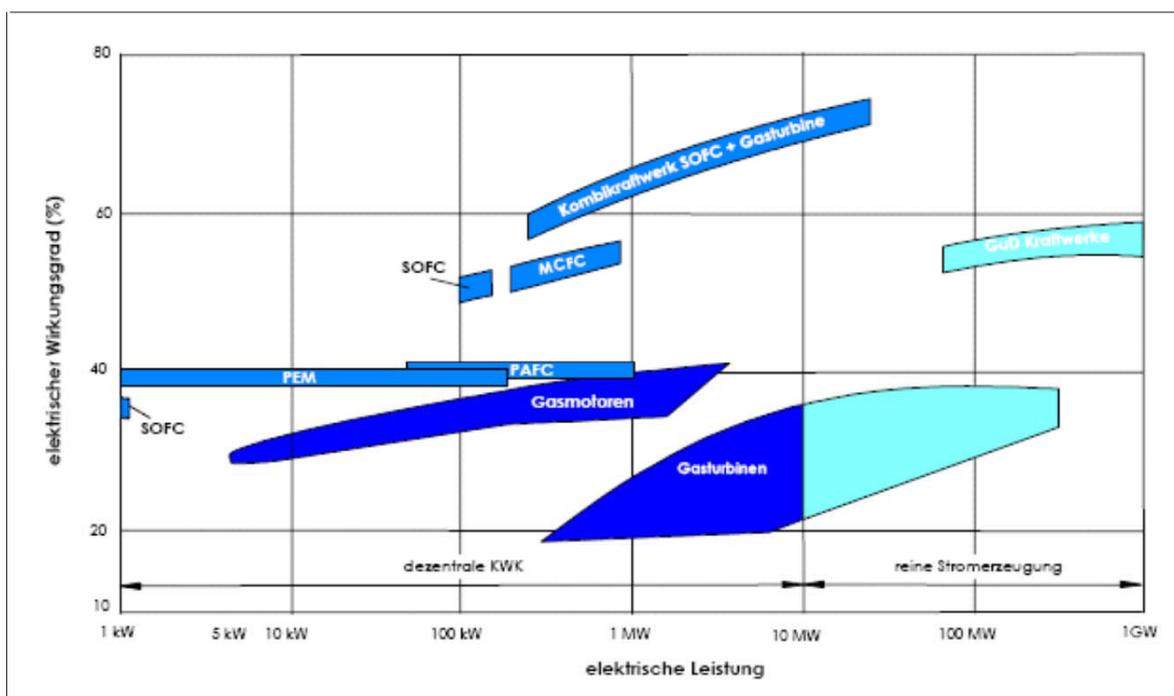


Bild 11: Wirkungsgrad von Stromerzeugungstechniken (Quelle: ASUE, 2001, S. 4)

⁸¹ www.priorartdatabase.com

⁸² Emissionsfaktoren Peht 2002

4.5.2.3 Stromerzeugung

- **Photovoltaik-Anlagen/Solarstrom**

Durch Solarzellen wird auf direktem Weg elektrische Energie aus dem auftreffenden Licht erzeugt. Eine Solarzelle stellt eine Gleichspannungsquelle dar. Durch Nachschaltung eines Umrichters (Wechselrichter, auch Netzeinspeisegerät) wird die netzübliche Netzspannung bereitgestellt.

Je nach Betriebssituation (50 Hz/230 V) Anschlussvariante wird der erzeugte Strom entweder vollständig ins Netz eingespeist oder mindestens teilweise im Haushalt verbraucht; der Überschuss an Strom wird dann an den Netzbetreiber geliefert. Die elektrische Energie wird also nicht beim Erzeuger gespeichert (Ausnahme Inselanlagen).

Eine Solarstrom-Anlage gewinnt nicht nur aus direkt auftreffendem Licht elektrische Energie. Auch diffuse Einstrahlung (z.B. durch einen Wolkenverhang) wird mit einem guten Wirkungsgrad aufgenommen. So kann über das ganze Jahr ein hoher Ertrag erzielt werden. Maximale Zellwirkungsgrade von bis zu 80 % (kristalline Solarzellen) und eine Lebensdauer der Zellen von durchschnittlich 15 Jahren ermöglichen hohe Erntefaktoren der Anlagen.⁸³ Die Systemwirkungsgrade sind jedoch mit 8 – 9 % gering (Wechselrichter-, Leitungsverluste), so dass für eine Ausbeute von 1 kW_p etwa 10 m² Kollektorfläche benötigt werden.

Jedoch sind die Investitionskosten für eine Photovoltaik-Anlage sehr hoch, so dass eine Amortisation während der Lebensdauer nur aufgrund der z. Z. sehr hohen Einspeisevergütung möglich ist. Die Produktion von Solarzellen erfordert einen hohen Energieeinsatz. Die Energierücklaufzeit beträgt einige Jahre, die Angaben variieren stark nach Interessenlage. Für den Erntefaktor, d. h. das Verhältnis der während der Lebensdauer gewonnenen Energie zu der für die Herstellung benötigten Energie, finden sich Werte von 2 bis 8.

⁸³ Seltmann, T., 2000, S. 50, 13, 114

Tabelle 11: Charakterisierung von Konkurrenztechnologien (Quelle Nr.: 1, 5, 27, 37, 50, 54)

		Therm. Solar-	Photovoltaik-	Wärmepumpe	Brennwert-	Öl -Kessel	Pellet-	Motor -BHKW					Stirling -	Gasturbine	PEMFC
		anlage	Anlage		kessel		heizung	Erdgas	Holzgas	Biogas	Erdgas	Diesel	Motor		
Brennstoff		-	-	Heizöl	Erdgas	Heizöl	Holzpellets	Erdgas	Holzgas	Biogas	Erdgas	Diesel	Erdgas	Erdgas	Erdgas
Leistungsklasse	<i>kW</i>	88 kW _{th} /m ²	1kWp/10m ²	4kW _{th} /kW _{Motorleist.}	20 kW _{th}	10 kW _{th}	-	200 kW _{el}	200 kW _{el}	200 kW _{el}	5 kW _{el}	5 kW _{el}	1 – 4,5 kW _{el}	3 – 10 MW _{el}	bis 5kW _{el}
Jahresnutzungsgrade (%)	<i>elektrisch</i>	-	9	-	-	-	-	35	31	35	25	20	24	39	bis 40
	<i>thermisch</i>	35	-	-	108	85	85	55	59	55	70	-	72	40	109
Jahresarbeitszahl	<i>JAZ</i>	-	-	2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Solarer Deckungsanteil/ Performance Ratio	%	60	> 80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissionen (mg/MJ _{IN})	<i>Benzpyren</i>	-	-	-	0,0067	-	0,0067	0,0057	k.A.	k.A.	0,0057	0,0071	-	0,0067	-
	<i>Benzol</i>	-	-	-	0,13	-	3	0,1	k.A.	k.A.	0,1	0,27	-	0,4	-
	<i>CH₄</i>	-	-	-	1,1	0,058	11	315	5,3	2,5	315	2,5	10	4,2	0
	<i>CO</i>	-	-	-	14	25,5	37	63	61,7	63	63	633,2	2	42	1,7
	<i>N₂O</i>	-	-	-	0,3	0,6	3	1,575	2,2	1,575	1,575	21,6	1,7	1	0
	<i>NMHC</i>	-	-	-	0,7	1,28	1	15,8	6,7	15,8	15,8	193,7	1	4	0,3
	<i>NO</i>	-	-	-	22	23	84	52,3	90	52,3	52,3	527,9	6,7	63	0,9
	<i>Partikel</i>	-	-	-	0	-	-	0,1	0	0,1	0,1	0	-	-	0
	<i>Staub</i>	-	-	-	0,3	1,62	10	1,6	2,2	1,6	1,6	94,8	1,7	0,3	0

4.6 Stand der Technik

Laut einer HEA-Analyse (HEA; Fachverband für Energie- Marketing- und –Anwendungen e.V.) entfallen von rund 5.000 verliehenen BSZ-**Patenten** 400 auf deutsche Unternehmen. Mehr als $\frac{3}{4}$ aller in Europa vorhandenen BSZ-Systeme laufen in Deutschland. In 350 privatwirtschaftlichen Unternehmen und öffentlichen Instituten arbeiten in Deutschland 2.800 Menschen an der BSZ und ihren Entwicklungen.⁸⁴ Das geht aus einer Marktanalyse des britischen Fachinformationsdienstes „fuelcelltoday“ hervor. 65 % aller **EVU** beschäftigen sich mit der Technologie, zitiert fuelcelltoday aus einem Bericht des HEA. Die Forschung gilt vornehmlich der PEMFC, gefolgt von der SOFC, deren Entwicklung vor allem Siemens in den letzten Jahren vorangetrieben hat.

4.6.1 Optimierung wichtiger Eigenschaften

Einer deutlichen Verbesserung bedarf es vorrangig bei den Merkmalen:

- Lebensdauer
- Zuverlässigkeit
- Wirtschaftlichkeit: Wirkungsgrad, Investitions- und Wartungskosten⁸⁵
- Brennstoffanforderungen

Lebensdauer: Die Lebensdauer der Stacks heutiger Systeme liegt deutlich unter dem Zielwert von 40.000 Stunden (lt. Fa. Matsushita wurden bisher nie mehr als 13.000 Stunden Betriebszeit erzielt).

Zuverlässigkeit: Die Verfügbarkeit der gesamten BSZ-Anlage ist wesentlich durch die Degradation (Leistungsabfall) des Stack gegeben.

Die Degradationskurve hängt stark von den Eigenschaften des Brenngases ab (Reinheit des Gases, Zusammensetzung, Feuchtigkeit). Außerdem spielen die Art des Gases und die Luftzufuhr sowie die Abstimmung der Einzelkomponenten aufeinander eine Rolle. Ferner ist die Funktionsfähigkeit der Anlagenkomponenten ausschlaggebend.

Wirtschaftlichkeit: Für die Wirtschaftlichkeit ist u. a. der elektrische **Wirkungsgrad** (etwa 30 %) und der Gesamtwirkungsgrad (etwa 85 %) wesentlich. Sowohl der elektrische als auch der Gesamtwirkungsgrad der Anlagen müssen noch erhöht werden. Hier für spielt auch die Reformatgas –Ausbeute aus dem Brennstoff eine Rolle.

Die Zielwerte für die **Anschaffung** liegen bei 1.000 bis 1.500 Euro pro Kilowatt elektrischer Leistung. Zwar stimmt die Tendenz der letzten zehn Jahre optimistisch, doch müssen die Kosten weiterhin noch um einen Faktor vier bis zehn reduziert werden. Hauptsächliche Kostenverursacher sind Stack, Reformer, Wechselrichter und Steuerung. Anzustreben sind ein reduzierter Materialeinsatz bei gleichen Leistungskennzahlen, Materialsubstitution, Optimierung des Systems, Einsatz von Standardkomponenten, Massenfertigung usw.

Brennstoffanforderung: Für die BSZ-Prozesstechnik ist noch immer der Schwefelgehalt der flüssigen Bren- und Kraftstoffe eine Herausforderung. Der Prozess der partiellen

⁸⁴www.initiative-brennstoffzelle.de/de/ibz/live/nachrichten/detail/78.html

⁸⁵Koschorke, W./Pirk, W., 2004, S. 2

Oxidation verringert den Wirkungsgrad. Dies ist bei der Dampfreformierung nicht der Fall, wenn die Zellabwärme bei Hochtemperaturzellen genutzt wird. So besteht auch im Bereich der Brennstoffergiebigkeit ein Verbesserungspotenzial, das über die nächsten Jahrzehnte Gegenstand der Bemühungen sein wird.

Tabelle 12: BSZ-Perspektiven in Deutschland (Quelle: Koschorke, W./Pirk, W., et al., 2004, S. 2)

Perspektiven in Deutschland	
2005 -2007	einige hundert Brennstoffzellengeräte (Prototypen)
2008 - 2010	einige 1000 Brennstoffzellengeräte (Vorseriengeräte), Lighthouseprojekte in der EU (Hydrogen Communities), beginnende Markteinführung
2011 - 2015	einige 10.000 Systeme (Markteinführung), Demonstration zukünftiger Gerätegenerationen
ab 2016	Marktdurchdringung

Durchaus realistisch ist die Annahme einer breiten **Markteinführung** und –Durchdringung im Zeitraum vom 2010 – 2030 (s. Tab. 12).

Tabelle 13: Feldtest von BSZ–Anlagen (Quelle: Koschorke, W./Pirk, W., et al., 2004, S. 3)

Hersteller	Sulzer Hexis 	Vaillant 	Viessmann 	Buderus/RWE 	Efc 
Technologie	SOFC	PEM	PEM	PEM	PEM
Leistung	1 - 1,5 kWel	4,5 kWel (lt. BINE) 4,6	2 kWel	4,6 kWel (lt. BINE)	1,5 kWel
Elektrischer Wirkungsgrad	25 % Ziel: ≥30 %	29 % Ziel: ≥35 %	28 % Ziel: ≥32 %	Ziel: ≥35 %	25 % Ziel: ≥ 30 %
Gesamtwirkungsgrad	+/- 85%	> 80 %	> 87 %	> 80 %	> 80 %
Markteinführung	Ab 2008	Bis 2010	Ab 2010	Ab 2008	Ab 2012

4.6.2 Feldtest

Auf dem deutschen Markt gibt es im Wesentlichen fünf Anlagentypen mit denen die Entwicklung von Brennstoffzellen-Anlagen in der Hausenergieversorgung vorgetrieben wird. In Japan werden dagegen z. Z. über 60 verschiedene Typen von insgesamt 15 Herstellern getestet.⁸⁶

Neben den deutschen Heizgeräteherstellern Buderus, efc, Sener Tec (Baxi Group), Viessmann und Vaillant, die vorwiegend an der Weiterentwicklung der PEFC arbeiten, hat sich die Firma Siemens vor allem auf die Anwendung von PEFC–Systemen im U–Boot-Sektor spezialisiert. Weitere Mitbewerber im PEFC–Markt sind in Italien die Firma Nuvera, in Japan die Unternehmen Mitsubishi, Matsushita, Sanyo, Toshiba, Ebara Ballard und in den USA Plug Power, Allied Signal sowie in Kanada Hydrogenics.

In Deutschland werden zurzeit mehrere Feldtests durchgeführt. Dabei sind nicht nur diverse **Hersteller** beteiligt, sondern es variiert auch der **Anlagentyp**, wobei jedoch die PEM–BSZ im Vordergrund steht. Aufgrund ihrer noch erhöhbaren **Leistungsdichte** bietet sie entscheidende Vorteile gegenüber anderen Systemen.

⁸⁶ www.elektroauto-tipp.de

Da die Funktionalität der PEM Zellen schon gewisse Erfolge zeigt, liegt ein weiteres Hauptaugenmerk im Feldtest bei der Reduzierung des **Kostenfaktors** (z.B. bei Vaillant heute ca. 10.000 €/kW_{el}, angestrebt 1.500 €/kW_{el}). So soll z. B. die teure perfluorierte Elektrolytmembran durch eine kostengünstigere, nicht fluorierte Membranen auf Kohlenwasserstoffbasis ersetzt werden. Darüber hinaus wird während der Feldtests intensiv an einer Reduzierung der Platinbelegung, an CO-resistenten Katalysatoren und einer Minimierung des Betriebsdrucks gearbeitet.

Im Weiteren soll auch die **Wirtschaftlichkeit** der Anlagen untersucht werden, um verwertbare Daten für den Einsatz der BSZ-Geräte im Privathaushalt zu gewinnen.

Aus heutiger Sicht ist bis zur **Serienreife** noch ein erheblicher Entwicklungsaufwand zu leisten. Viele Komponenten sind noch nicht auf den stationären Einsatz hin optimiert, dazu müssen aufwendige Dauertests durchgeführt werden. Oberstes Ziel ist es, ein qualitatives Produkt mit höherer Zuverlässigkeit anbieten zu können. Dabei geht es um Erfolg vor Schnelligkeit. Bis zur **Markteinführung** eines wirklich marktreifen Seriengerätes werden daher noch einige Jahre vergehen.⁸⁷

In Tab. 14 sind die Entwicklungslinien verschiedener Hersteller von BSZ-Systemen gegenüber gestellt. Mittlerweile ist bei den meisten Herstellern die Entwicklung in der Vorserienphase.

⁸⁷ ASUE, 2001, S.54, BMWI, 2001, S. 46

Tabelle 14: Kenndaten von Entwicklungslinien (Quelle: BINE Informationsdienst, Projektinfo 06/04 ⁸⁸)

System-integration	European Fuel Cell GmbH	Ebara Ballard	RWE/Buderus	Sulzer Hexis	Vaillant	Viessmann
Anlagentyp	PEMFC	PEMFC	PEMFC	SOFC	PEMFC	PEMFC
P_{EL}/kW	1,5	1	4,6	1	1	2
P_{TH}/kW	3	1,4	7	2,5	2,5	5
El.	35	34	35	25	29	28
Systemwirkungsgrad in %						
Entwicklungsstand	Vorserie (Beta-Phase)	Serienreife Anlagen in Japan	Prototyp, drei 4,6 kW Pilotanlagen, zwei davon in Kombination mit Mikrogasturbinen	Vorserienphase	Vorserienphase für Modell HXS 1000 Premiere	Prototyp in dritter Version („SOFA 3“)
Markteinführung	Ab 2012	2005	Ab 2008	Ab 2008	Bis 2010, 2005 erste Serienfertigung	Ab 2010
Feldtest	Test mit 100 Beta – Anlagen in 2005/2006	Kleinserie für 2005, kommerzieller Vertrieb bereits in Japan	Feldtest ab 2005	Feldtest mit Kleinserie ab 2005 mit 110 Geräten	Feldtest mit 50 Geräten, seit 2001	Test ab 2005, ab 2007 in Kleinserie
- Standort	EU	Japanischer Markt	EU	EU	EU	Deutschland
-	-	-	-	-	Vernetzung	-
Besonderheiten						

4.7 Spezielle Chancen und Perspektiven der Brennstoffzelle

4.7.1 Umweltaspekte

Angesichts der steigenden Energiepreise für Primärenergieträger und der Ressourcenverknappung stehen mögliche **Einsparungsmaßnahmen** im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses. Gesetzliche Vorgaben (EnEV, EEG) sowie Richtlinien zwingen das produzierende Gewerbe fortschrittliche Energieversorgungssysteme zu integrieren. Das **Klimaprotokoll** von Kyoto (1997) verpflichtet die wichtigsten Industrieländer (Ausnahme:

⁸⁸ www.diebrennstoffzelle.de/H2Projekte/stationär/brennstoffzellenheizgeräte, www.novatlantis.ch/pdf/Dorer-Hausenergie_v3.pdf, www.Forumbrennstoffzelle.de/index.php?akt=633, www.initiative-brennstoffzelle.de/de/live/pilotprojekte/liste.html

USA) zu einer Reduzierung ihrer Treibhausemissionen.⁸⁹ Für die Europäische Union wurde in Kyoto ein Minderungsziel für die sechs „Kyoto -Gase“ von 8 % festgelegt.⁹⁰

Rund $\frac{3}{4}$ des weltweiten Primärenergie-Verbrauchs wird von etwa $\frac{1}{4}$ der Weltbevölkerung in den Industriestaaten verursacht, während die Gesamtheit der Entwicklungs- und Schwellenländer nur mit $\frac{1}{4}$ daran beteiligt ist. In den Industriestaaten ist das **Reduktionspotenzial** demnach sehr groß. Die Industrienationen müssen daher als Vorreiter der neuen Technik fungieren. Es ist eine Aufgabe von Forschung und Entwicklung, die benötigten Systeme bereitzustellen und Aufgabe des Handwerks, für einen **einwandfreien Betrieb** zu sorgen.

Durch Privathaushalte werden 45 % des **deutschen Endenergieverbrauchs** verursacht. Vom Haushalts-Energieeinsatz sind allein 79 % der Aufwand für Raumheizung und 11 % für die Warmwasserbereitung. Wer wirkungsvoll Energie einsparen möchte, muss beim Heizen beginnen.⁹¹ Hier stellt sich auch die Frage, ob die Notwendigkeit zur Veränderung neue **Perspektiven** für den Einsatz der BSZ in einer zukünftigen Energieversorgung eröffnet. Die ressourcen- und umweltschonende Technik der BSZ wird durch die folgende tabellarische Darstellung belegt.

Tabelle 15: Emissionsüberblick (nach Gummert/Suttor, 2006, S. 76, www.sperber.lth.rwth-aachen.de)

	Emissionen Elektrizitäts-Output		
	Verbundnetz Deutschland	BSZ - Anlage	Reduzierung (%)
CO₂ g/kWh	700	561	20
NO_x g/kWh	0,8	0,35	56
SO₂ g/kWh	2,7	0,11	96
Staub g/kWh	< 0,1	0,02	80

Besonders wichtig für die Reduktion des **Treibhauseffekts** ist die Minderung der CO₂-Emissionen. In der nachstehenden Abbildung ist die spezifische CO₂-Emission für verschiedene **KWK-Optionen** und für ungekoppelte Stromerzeugung dargestellt (Brennstoff Erdgas, Technologiestatus 2010). Die jeweils günstigere Abschätzung wird durch den weißen, bzw. hellgrauen Balkenanteil dargestellt, die mittlere Abschätzung durch die gesamte Balkenlänge (angelehnt an BMU 2004). In der Abbildung ist nach Leistungsklassen unterschieden. Innerhalb der Leistungsklassen sind die Werte für BSZ, sowie Motor-BHKW (GuD) gegliedert. Zum Vergleich sind die Emissionswerte der konventionellen Versorgung eingetragen.

⁸⁹ Nach einer Studie des Weltwirtschaftsrates für nachhaltige Entwicklung (2004) wird eingeschätzt, dass sich der Kohlendioxidausstoß bis zum Jahr 2050 (Basis 2000) auf rund 16 Mrd. Tonnen verdoppeln wird. Beim ersten Weltgipfel in Rio (1992) wurde in der Konvention über den Klimawandel das Ziel formuliert, den CO₂ Ausstoß bis zum Jahre 2050 um 80% zu senken.

⁹⁰ Bei den sechs „Kyoto Gasen“ handelt es sich um die direkt Treibhausrelevanten Gase CO₂, CH₄, N₂O, FKW, HFKW und SF₆

⁹¹ www.global2000.at/pages/co2sparen.htm

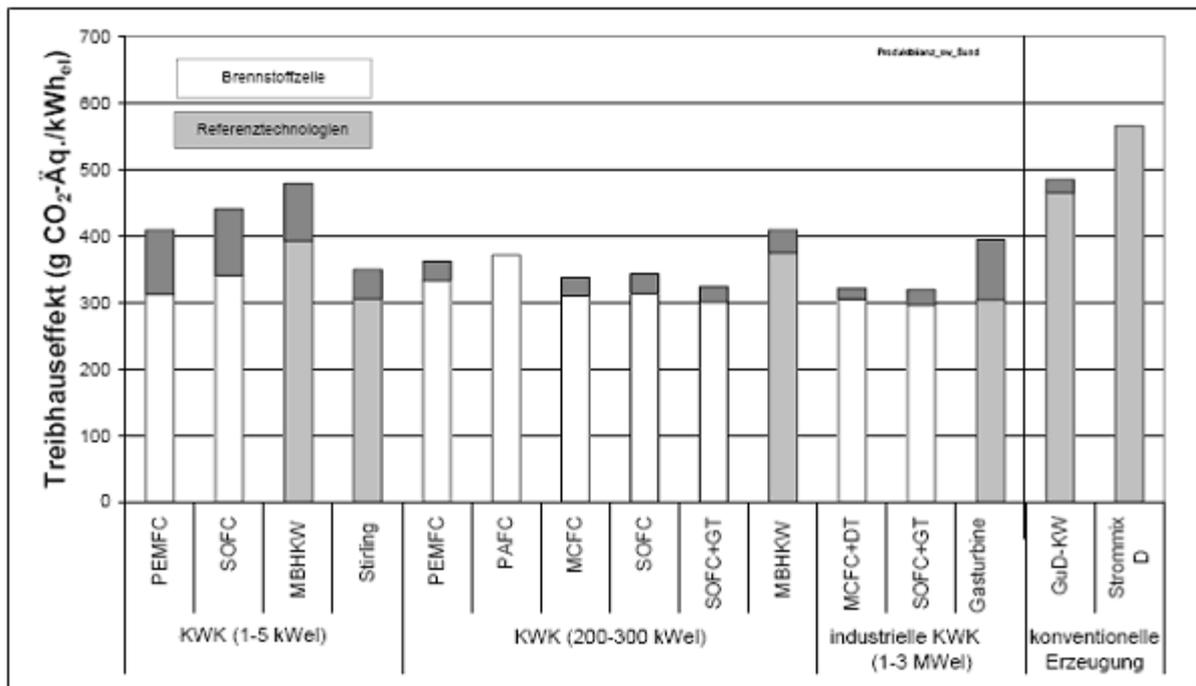


Bild 12: Emissionen von KWK-Optionen (Quelle: M.Pehnt/K.Traube, 2004, S. 13)

Die CO₂-Emission der BSZ beruht darauf, dass im Reformer zunächst aus Methan (CH₄), der Wasserstoff für die BSZ-Versorgung gewonnen werden muss – der im Prinzip 'überflüssige' Kohlenstoff wird dabei zu CO₂ oxidiert. Eine Wasserstoffgespeiste BSZ produziert kein Kohlenstoffdioxid.

Aufgrund der **lokalen Schadstoffarmut** (ohne Berücksichtigung der Brennstoffbereitstellung) bietet die Brennstoffzelle zugleich deutliche Vorteile hinsichtlich anderer Umweltwirkungen, beispielsweise Versauerung (NO_x, SO₂, NH₃), Eutrophierung und Sommersmog gegenüber dem Motor-BHKW und der Gasturbine bzw. gegenüber der ungekoppelten Stromerzeugung (siehe Bild 12).

Zusätzlich zu den erheblichen Emissionseinsparungen ist bei der BSZ-Technik auch der deutlich geringere **Brennstoffeinsatz**. So wird mit Einsparungen von rund 40 % gegenüber klassischer, konventioneller Wärme- und Stromerzeugung gerechnet.⁹² Jedoch sind auch die verschiedenen Aspekte der zukünftigen Energieversorgungsstrukturen sorgfältig gegeneinander abzuwägen.

Die Größe des Vorsprungs der Brennstoffzelle gegenüber den **Konkurrenztechnologien** (Stirling, Motor -BHKW, Gasturbine, GuD- Kraftwerk mit KWK) –auf die hier nicht näher eingegangen wird, hängt aber auch vom Gesamtnutzungsgrad der Anlage ab. Die **Herstellung** der Brennstoffzellen trägt nur mit etwa einem Prozent zu den gesamten, über den Lebensweg erfolgten Treibhausemissionen und mit 5 bis 10 % zu anderen Umweltwirkungen bei. Nur in Einzelfällen (z. B. bei der MCFC wegen des Nickelbedarfs) verursacht die Herstellung bis zu einem Drittel der gesamten ökologischen Belastung.⁹³

All diese Werte belegen deutlich die Steigerung der positiven KWK-Effekte bei der Verwendung von BSZ-Anlagen. Brennstoffzellen koppeln die Klima- und

⁹²Gummert/Suttor, 2006, S. 76

⁹³Pehnt, M./Traube, K., 2004, S. 14

Ressourcenvorteile, die sich für die KWK-Technologie ergeben, mit niedrigen schadstoffbedingten Umweltwirkungen.

Als System betrachtet ist die Brennstoffzelle allerdings keine **Alternative** zur Kraft-Wärme-Kopplung, sondern stellt eine von mehreren möglichen Formen der Kraft-Wärme-Kopplung dar.

4.7.2 Chancen und Risiken

Unter der Annahme, dass in den nächsten Jahren die angestrebten Kostenziele und die Wirtschaftlichkeitswerte im Vergleich mit Konkurrenztechnologien auch tatsächlich erreicht werden, ergeben sich interessante und vielschichtige **Marktperspektiven** für stationäre BSZ.

Die Erfahrungen mit der Markteinführung von innovativen **Energietechniken** in der Vergangenheit zeigen allerdings, dass ein technisch zuverlässiges und wirtschaftlich wettbewerbsfähiges Produkt allein nicht den Markterfolg garantieren kann. In der Regel müssen weitere **Hemmnisse** überwunden und günstige Rahmenbedingungen für die Durchsetzung der neuen Technik geschaffen werden. Die Rahmenbedingungen und andere Voraussetzungen beeinflussen die BSZ-Entwicklung. Ihre Wechselwirkung ist zu beachten (siehe Bild 13).

Für die Kundengruppe der technisch interessierten und ökologisch motivierten Haushalte kann erwartet werden, dass sie als **Vorreiter** wie schon bei anderen Techniken (Solarthermie, Photovoltaik usw.) relativ schnell für die BSZ zu gewinnen ist. Für den durchschnittlichen privaten Endkunden müssen dagegen weitere Bedingungen für eine erfolgreiche Markteinführung im Segment der Hausenergieversorgung erfüllt sein.

Vor allem muss eine Sensibilisierung und Motivation der privaten Verwender für die KWK-Technik im kleinen Leistungssektor stattfinden. Aufgrund der umfangreichen Diskussion über die neue Technologie in den Medien sind die privaten Anwender schon heute gut informiert. Angesichts der Vielzahl von öffentlichen und privaten **Informationsquellen** (Energieagenturen, Energieversorger, Hersteller, Presse etc.) dürften Kenntnisdefizite somit kein wesentliches Hemmnis für die Markteinführung darstellen. Da der Heizungsmarkt traditionell durch das **Fachhandwerk** geprägt ist, wird dies auch bei der Markteinführung der BSZ eine Schlüsselrolle spielen. Insbesondere Installateure haben großen Einfluss auf die Investitionsentscheidungen der Endkunden und können hier die Durchsetzung neuer Techniken maßgeblich fördern oder behindern. Trotz der allgemeinen Bereitschaft der Endkunden zu Umweltentlastenden Investitionen sind meist keine ausreichenden Spezialkenntnisse vorhanden. Daher wurde im Handwerk parallel zur Technologieentwicklung eine Reihe von Pilotprojekten und Weiterbildungsinitiativen gestartet, die das notwendige Wissen vermitteln und erarbeiten.

Bei der Etablierung von attraktiven **Dienstleistungskonzepten** besteht sowohl bei den Endkunden als auch im Fachhandwerk weiterhin ein Bedarf an Umstrukturierung. Umfassende Dienstleistungspakete sollen Vorzüge gegenüber der konventionellen **Energieversorgung** bieten und den Kunden ein „rundum sorglos“ Service-Angebot zur Verfügung stellen. Die Pakete müssen vollständig die technische Abwicklung und die Funktionsgarantie für die Versorgung des Kunden mit Strom und Wärme übernehmen (Contracting).

Bei dieser Form des Betriebs würde die komplexe Technik der BSZ für den Privatanwender kein Hemmnis mehr darstellen. Gleichzeitig ergäbe sich für die Wartungs-, und Installationsbetriebe ein neues **Marktsegment**, wobei völlig neue Akteurgruppen entstehen.

In Energiemanagement und Fernüberwachung der BSZ würden sich Chancen und neue Berufsfelder auftun (z. B. Betrieb, Wartung, Update der Zelle). Es wird deutlich, dass eine besondere Stärke der BSZ-Technik darin liegt, bislang unerschlossene Potenziale der KWK-Anlagen im unteren Leistungsbereich zu nutzen.

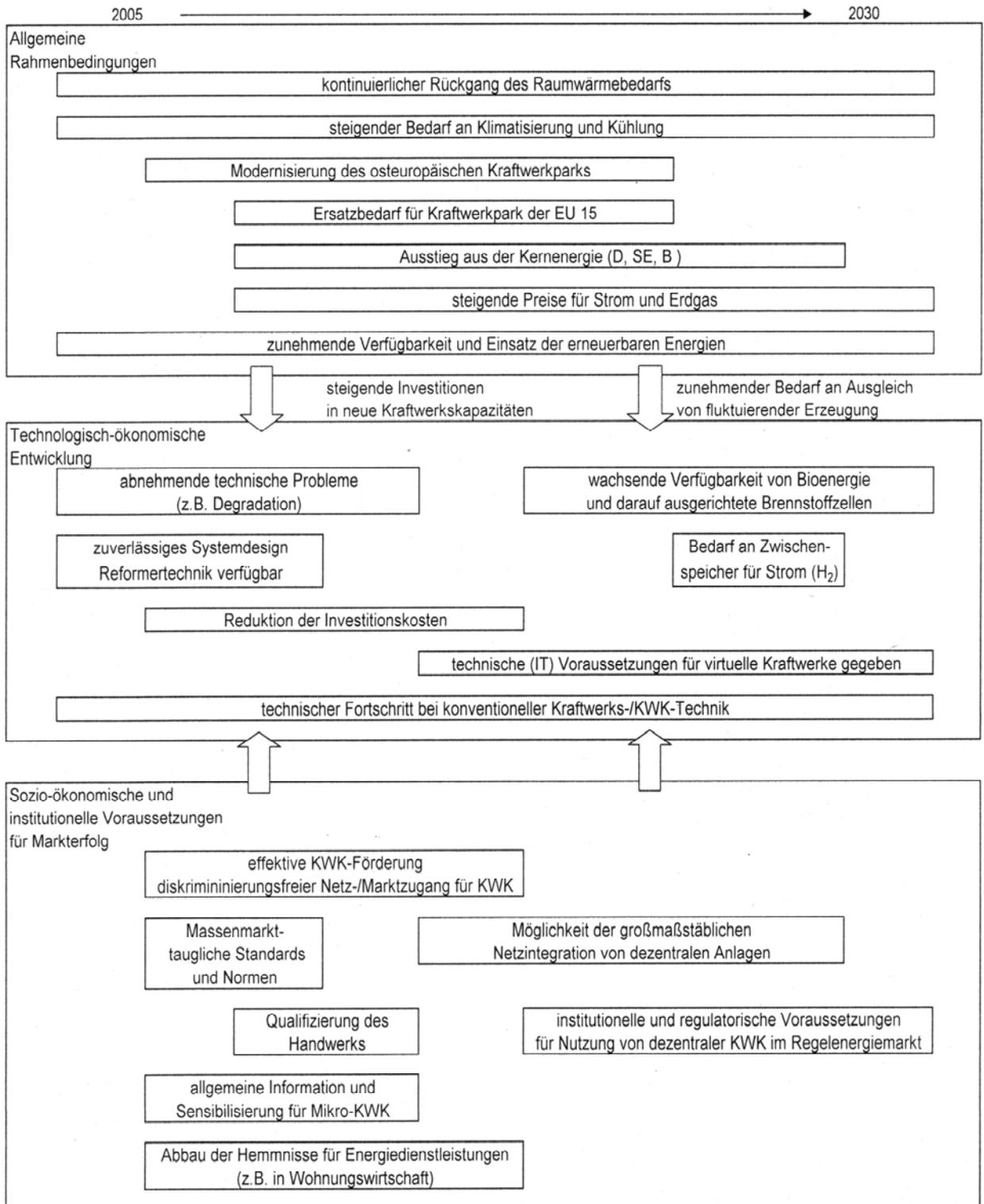


Bild 13: Einflussfaktoren und Wechselwirkungen beim Launch von stationären BSZ (Quelle: Krewitt, W., Dr., 2004, S. 278)

Neben den vielen positiven Triebkräften der neuen Technologie (wobei sich die ökologischen Aspekte herausheben, Kap. 4.7) zeichnet sich aber auch eine Reihe von kritischen **Einflussfaktoren** ab, die gegenwärtige Entwicklungstrends behindern oder sogar scheitern lassen könnten:⁹⁴

- Die BSZ–Entwicklung wird von großer öffentlicher Aufmerksamkeit begleitet und teilweise überzogener **Euphorie** getragen. So kann aber auch durch technische Relativierungen oder Verzögerungen ein Umschlagen in die gegenteilige Einschätzung, d. h. Enttäuschung, folgen. Wie die Erfahrung zeigt, können derartige negative Meinungen und Vorurteile die Markteinführung einer Technik über Jahre hinaus massiv behindern. So empfiehlt es sich, bei der Öffentlichkeitsarbeit zurückhaltend vorzugehen und keine spekulativen Informationen zu verbreiten.
- Die Weiterentwicklung anderer KWK–Techniken sollte nicht vernachlässigt werden. Im Laufe der Zeit könnten der **Vorsprung** der BSZ durch Fortschritte bei den Wettbewerbstechniken teilweise aufgeholt werden.
- Eine besondere Chance für die dezentrale KWK–Technik ergibt sich aus dem **Erneuerungsbedarf des Kraftwerkspark**, der in Deutschland und Europa ab dem Jahr 2010 wirksam wird. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, bis zu diesem Zeitpunkt zuverlässige und wettbewerbsfähige BSZ–Anlagen für den Massenmarkt bereitzustellen und rechtzeitig Vertrauen bei den Zielgruppen aufzubauen, um diese umfassende Chance zum Strukturwandel nutzen zu können.
- Das **Klimaschutzpotenzial** der KWK–Technik im Allgemeinen sowie der BSZ kann nur genutzt werden, wenn auch bei den politischen Vorgaben die Energieversorgung und die Klimasituation eine Weiterentwicklung zu verzeichnen ist. Politische Prozesse brauchen Vorlaufzeiten bis zur Wirksamkeit im Markt und müssen demnach zügig eingeleitet werden.
- Der spezifische **Wärmebedarf** im Privathaushalt wird bis auf einen geringen Wert absinken. Schon jetzt stellt sich für die Gasversorger die Frage, ob bei Neubaugebieten der Gasanschluss der Areale lohnenswert ist. Um den Gasabsatz zu sichern, können hier zunehmend Märkte für auf Gas basierende KWK–Anlagen entstehen – es kann aber auch sein, dass die Anschlussgebühren hochschnellen.
- Die Vorteile eines **Wasserstoffbetriebs** der BSZ in der stationären Anwendung stehen noch offen. Kurz- bis mittelfristig müssen sich BZH als Technik auf Basis von Erdgas behaupten, ohne ihre spezifischen Vorteile bei der H₂-Nutzung ausspielen zu können.⁹⁵

In den nächsten Jahren wird sich herausstellen, ob sich die attraktiven Angebote der BSZ–Technologie im kommerziellen Markt etablieren und durchsetzen können. Dabei sind vor allem die sozio–ökonomischen Trends und die institutionellen Aspekte neben den politischen und wirtschaftlichen Entwicklungsbedingungen von Bedeutung (siehe Bild 13).

⁹⁴Krewitt, W., et al., 2004, S. 277

⁹⁵ Krewitt et al., 2004, S. 277

4.7.3 Markteinführung

Die Höhe der Investitionskosten sowie eine nachvollziehbare Amortisationskalkulation spielen für die kommerzielle Markteinführung eine **Schlüsselrolle**⁹⁶. Die BSZ wird keineswegs ein 'Selbstgänger' sein.

Die zentrale Herausforderung besteht darin dass die BSZ wie andere Innovationen auch zu Beginn der **Kommerzialisierung** vergleichsweise teuer sein wird. Um die Kosten zu senken, müssen Erfahrungen im Zuge einer Massenproduktion erschlossen werden. Das setzt allerdings voraus, dass für eine **Übergangsphase** eine erhebliche Stückzahl zu nicht wettbewerbsfähigen Kosten abgesetzt werden muss, bevor ein lukrativer Absatz zu Marktpreisen erreicht werden kann (siehe Bild 14). Zusätzlich sind die institutionellen und sozio-ökonomischen Voraussetzungen für ein stabiles Marktwachstum sicherzustellen. Die Konzeption einer geeigneten Absatzstrategie für die innovative Technik ist daher unumgänglich.

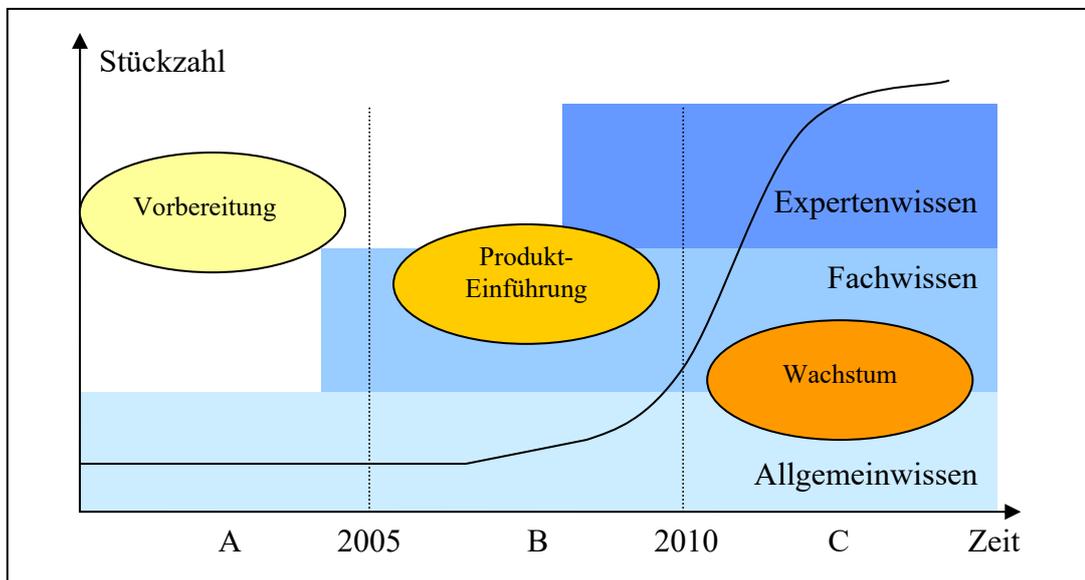


Bild 14: Marktentwicklung und Qualifizierungsbedarf im Handwerk (Quelle: BIBB, BSZ in der Haustechnik, S.21/22)

Für die Absatzstrategie spielt natürlich auch die **Wirtschaftlichkeit** der BSZ-Anlagen eine Rolle bei der Markteinführung. Zur Berechnung sind dabei nicht nur die Kapitalkosten (Investitions- und Anlagekosten) und die Betriebskosten (Verbrauchs- und betriebsgebundene Kosten, Wartung, Brennstoff etc.) heranzuziehen, sondern auch die Erlöse, die durch Einspeisung und die Kostenreduktion, die durch Förderung entstehen.⁹⁷

Forschung und Entwicklung der BSZ-Technologie dürfen nicht in Vergessenheit geraten. Der Weg bis zum serienreifen Produkt erfordert weitere **Entwicklungsschritte**, die dynamisch zu unterstützen sind (finanziell, wirtschaftlich, politisch). Dabei muss auch an die Weiterentwicklung im Bereich der **Wasserstoffbereitstellung** gedacht werden. Ohne diese Art der Brennstoffversorgung bietet die Technologie der BSZ erheblicher weniger Kaufanreize.

⁹⁶ Zusätzlich besteht Handlungsbedarf im Regulierungsrahmen der zu erwartenden Aufwendungen für Netzausbau- und Entwicklung.

⁹⁷ Die entstehenden Stromkosten durch die „Stromherstellung“ können mit den üblichen Strombezugskosten verglichen werden.

Die **Herstellungskosten** für stationäre BSZ liegen heute zwischen ca. 4.000 und 15.000 € je kW_{el}.⁹⁸ Allein diese große Bandbreite zeigt, dass es sich zum Teil noch um Produkte in einer frühen Entwicklungsphase handelt. Die von den Herstellern genannten **Zielkosten** liegen mit etwa 1.000 €/kW_{el}, deutlich unter den heutigen Herstellkosten. Da die vorliegenden Demonstrations- und Testanlagen weitgehend Prototypen sind, sagen die jetzigen Produktionskosten allerdings kaum etwas über die Kosten eines marktfähigen Serienproduktes aus.⁹⁹ Die Kosten für das 5 kW_{el} PEM-BSZ-System von Plug Power, das in den Vaillant Geräten eingesetzt wird, liegen bei ca. 55.000 \$, die spezifischen Kosten betragen dementsprechend 11.000 €/kW_{el}.¹⁰⁰ Plug Power geht davon aus, dass es noch 4 bis 7 Jahre dauern wird, bis das BSZ-System eine wirtschaftlich vertretbare Alternative für **Hausenergiesysteme** darstellt.

Laut einer Aussage von Dr.-Ing. Wolfram Krewitt (DLR, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt Stuttgart), kann die BSZ selbst bei Investitionskosten von ca. 5.000 €/kW_{el} (bei gekoppelter Versorgung mit Strom und Wärme), noch wirtschaftlich betrieben werden. Die Arbeitsgemeinschaft DLR setzt für den wirtschaftlichen Betrieb einer 2 kW_{el} PEMFC eine notwendige Einspeisevergütung von ca. 22 Cent/kWh (bei 5.000 €/kW_{el}) voraus.¹⁰¹

Die Einschätzung der Kostenaufschlüsselung ist bei den Herstellern uneinheitlich. Die Prognose für die Serienfertigung beruht auf Ausnahmen. Eine Recherche von Siemens zu den Kosten einer 5 kW_{el} PEM-BZH für den Privathaushalt ergibt, dass der BSZ-Stack bei geschätzten Kosten von 100 €/kW_{el} nur ca. 5 % der **Gesamtkosten** verursacht. Alleine die Einkaufskosten der verschiedenen Peripherie-Komponenten werden selbst bei einer Jahresstückzahl von 50.000 Geräten auf mindestens 1.550 €/kW_{el} geschätzt. Die Firma Viessmann gibt für die **Materialkosten** ihres aktuellen 2 kW_{el} BZH-Prototyps bei einer Produktionsmenge von mindestens 10.000 Stück pro Jahr 6.100 € an, dabei entfallen 20 % der Materialkosten auf den Stack.

Tabelle 16: Herstellerangaben zu aktuellen BZH; Prototypen/Kosten (Quelle: Krewitt 2004, S. 110)

	spezifische Kosten (€/kW _{el})
Hausenergieversorgung BSZHG	
Vaillant/Plug Power 4,7 kW _{el}	ca. 11.000
Sulzer Hexis 1 kW _{el} SOFC	> 5.000
BHKW	
UTC Fuel Cells 200 kW _{el} PAFC PC25	ca. 4.250
Alstrom/Ballard 250 kW _{el} PEMFC	ca. 14.000
MTU 250 kW _{el} MCFC Hot Module	ca. 6.000 - 12.000
Siemens 300 kW _{el} SOFC	ca. 10.000

Als Beurteilungskriterium für die Wirtschaftlichkeit wird die **Amortisationszeit** herangezogen, die für den Kapitalrücklauf erforderlichen Zeitraum. Die Gewinne werden (abzgl. Verzinsung und Abschreibung) den Investitionsausgaben gegenüber gestellt.

⁹⁸ Krewitt, W., 2004, S. 110, Fachtagung BMU, 2004, Berlin

⁹⁹ Pehnt, M., Traube, K., 2004, S. 15

¹⁰⁰ fuel cell today, 2002

¹⁰¹ BMU, Fachtagung, 2004, Berlin

Die Betrachtung der Gesamtwirtschaftlichkeit müssen nicht nur objektbezogene¹⁰², sondern auch gerätebezogene Einflussgrößen herangezogen werden. Diese sind vorwiegend entwicklungsspezifisch, d.h. sie hängen stark vom jeweiligen Entwicklungsstand der Komponente ab.¹⁰³ Sonstige Einflussgrößen wie Stromsteuer oder auch Mineralölsteuer unterliegen staatlicher Bestimmung, hier ist von Firmenseite allein keine Einflussnahme möglich.

Eine weitere Entwicklung der Energieversorgungssysteme im Sinne einer **Trendfortschreibung** führt keinesfalls zu einer nachhaltigen Marktstruktur und verfehlt die Klimaschutzziele. Die Entwicklung einer stärker vernetzten Versorgungsstruktur mit dezentralisiertem Charakter (wie auch der KWK-Technik) würde nicht gefördert, ebenso wenig ein tragfähiger Zukunftsmarkt für die BSZ-Technologie. Langzeitszenarien zeigen, dass engagierte Nachhaltigkeitsziele im Energiebereich nicht ohne tief greifende Änderungen in der Bedarfs- und Versorgungsstruktur zu erreichen sind. Mehrere gut aufeinander abgestimmte **Teilstrategien** sind unumgänglich, um eine nachhaltige Energieversorgung (unter Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit, in ökonomisch verträglicher Form) zu erreichen.

Durch Effizienzmaßnahmen muss vor allem bei der energetischen Sanierung des Gebäudebestandes der Energieverbrauch gesenkt werden. Dies ist Grundvoraussetzung für alle auf Dauer angelegten **Reduzierungsstrategien** im Bereich des Energieeinsatzes. Nur dann ist der gleichzeitige Ausbau regenerativer Energien effektiv und der Einsatz fossiler Energieträger bis 2050 um rund zwei Drittel reduzierbar (ebenso die CO₂-Emissionen). Die dezentrale Energieversorgung fördert gleichzeitig das Marktpotenzial effizienter KWK-Technologien und damit auch die BSZ. Dies unterstützt letztlich auch den Übergang zu einer wesentlich auf Wasserstoff basierenden Energieversorgung in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts.¹⁰⁴

4.8 Rechtlicher Rahmen/Förderbedingungen

4.8.1 Gesetze/Novellierungen

Bei der erfolgreichen Einführung einer neuen Technik sind auch immer die angrenzenden **Wirtschaftszweige** und der staatliche Rahmen betr. der benötigten Unterstützung gefragt. So muss bei der BSZ-Technologie nicht nur das Handwerk auf die neue Technologie vorbereitet werden - ein struktureller Wandel, bei dem **Beschäftigungsfelder** zu entwickeln sind – sondern es muss auch eine Unterstützung durch Wirtschaft und Politik erfolgen.

Die **Politik** kann¹⁰⁵

- dem Handwerk helfen, ein Bewusstsein für allgemeine Veränderungen und die Auswirkungen auf das jeweilige Gewerk zu schaffen
- das Handwerk durch Sonderprogramme und aktive Maßnahmen fördern, um Handlungsoptionen aufzuzeigen und den interessierten Handwerksbetrieben zu helfen, sich auf die Auswirkungen einzustellen

¹⁰² Objektbezogen: z.B. Wärmepreis, Brennstoffpreis, Strompreis

¹⁰³ Gerätebezogen: Lebensdauer, Wartungs- und Servicekosten, Gerätepreis

¹⁰⁴ Krewitt, W., 2004, S. 324

¹⁰⁵ Koschorke, W./ Bünger, U., 2005, S. 156

- rechtliche Rahmenbedingungen schaffen, um die Arbeit des Handwerks zu fördern und wirtschaftlich attraktiv zu machen (EEG, KWK-Gesetz)

Die politische Unterstützung ist sowohl im Hinblick auf den Erhalt der Arbeitsplätze im Handwerk als auch für eine reibungslose Markteinführung der BSZ-Technologie nötig. Noch bedeutender sind die **indirekten** Beschäftigungseffekte. Diese sind zu erwarten, wenn es Deutschland gelingt 'Market Leader' für BSZ zu werden und im großen Umfang BSZ zu exportieren. Aufgrund der vielfachen aktiven Forschungstätigkeit und des Engagements der Industrie verfügt Deutschland in Europa über eine gute **Ausgangsposition**.¹⁰⁶ Diese Situation sollte von der Politik genutzt und gefördert werden.

Im Zuge der absehbaren Markteinführung von BSZ-Anlagen werden folgende Gesetze und Richtlinien an **Bedeutung** gewinnen:

Mit dem **Energiewirtschaftsgesetz (EnWG vom 07.07.2005)** setzt die Bundesregierung das EU-Gemeinschaftsrecht für die leitungsgebundene Energieversorgung in nationales Recht um. Zweck des Gesetzes ist dabei eine möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente und umweltverträgliche leitungsgebundene **Versorgung** der Allgemeinheit mit Elektrizität und Gas. Die Regulierung der Elektrizitäts- und Gasversorgungsnetze dient dem Ziel der Sicherstellung eines wirksamen und unverfälschten Wettbewerbs bei der Versorgung mit Elektrizität und Gas und der Gewährleistung eines langfristig angelegten leistungsfähigen und zuverlässigen Betriebs von **Energieversorgungsnetzen**.

Dabei ist vor allem die Verbraucherfreundlichkeit und Umweltverträglichkeit der Versorgung mit Elektrizität und Gas sicher zu stellen.¹⁰⁷

Im **Gesetz zum Einstieg in die ökologische Steuerreform (Ökosteuern, seit dem 01.04.1999 in Kraft)** wird eine Steuerentlastung für die Anwendung der KWK festgelegt. Sie geht soweit, dass zu den gleichen Kosten wie mit einem Heizkessel geheizt werden kann, während des Strombezug im Mittel entfällt, und somit keine Kosten verursacht.

Die Ökosteuern gliedert sich in das **Stromsteuergesetz** (Artikel 1) und die Änderung des **Mineralölsteuergesetzes** (Artikel 2). Die Mineralölsteuer für den in den BSZ eingesetzten Brennstoff und die Stromsteuer auf den in der BSZ –Anlage erzeugten Strom entfallen seit dem 01.04.1999 ganz. Um den Bonus von 5,1 Cent/kWh nach dem KWK –Gesetz für BSZ –Anlagen zu erhalten, muss der Strom in das öffentliche Netz eingespeist werden. Für diesen Teil fällt allerdings Stromsteuer an.

Nach dem Stromsteuergesetz (§ 4, Abs. 1) hat Stromsteuer abzuführen, wer Versorger und **Eigenerzeuger** im Sinne § 2, Abs. 1 und 2 ist. Der Betreiber einer BSZ-Anlage gilt nicht als Eigenerzeuger und i. d. R. nicht als Versorger im Sinne des Gesetzes, da die Nennleistung unter 2 MW liegt und meist keine anderen Endverbraucher versorgt werden. Eine Besonderheit bildet die Versorgung dritter (Geschäftsform des **Contracting**). Gemäß Stromsteuergesetz (§ 11, Abs. 4) ist vorgesehen „...“, dass Unternehmen, Betriebe und Personen, die Strom an ihre Mieter, Pächter oder vergleichbare Vertragspartner abgeben, sowie diejenigen, die im Rahmen eines Vertragsverhältnisses für einen anderen eine Anlage zur Stromversorgung betreiben, nicht als Erzeuger gelten.“

¹⁰⁶ Frost/Sullivan, European Stationary Fuel Cells Markets, August 2004, Koschorke, W./Bünger, U., 2005, S. 157

¹⁰⁷ EnWG, § 1 Zweck des Gesetzes

Nach **Mineralölsteuergesetz** § 25, Abs. 3, Nr. 1.1a, 4.1 und 5.1 wird die Steuer erlassen, erstattet oder vergütet, wenn KWK –Anlagen mit einem Monatsnutzungsgrad von >70 % eingesetzt werden.¹⁰⁸

Das **Kraft–Wärme–Kopplungs Gesetz (KWKG vom 19.03.2002)** verfolgt vornehmlich das Ziel die Kohlendioxid-**Emissionen** zu reduzieren, und zwar um größenordnungsmäßig 10 Millionen Tonnen bis zum Jahr 2010. Diese Werte entsprechen der im Nationalen **Klimaschutzprogramm** vom 18. Oktober 2000 bekräftigten klimaschutzpolitischen Zielsetzung der Bundesregierung, die insgesamt auf eine Emissionsreduzierung um 25 % CO₂ von 2008 bis 2010 gegenüber 1990 gerichtet ist.

Dieses Ziel des KWK–Gesetzes soll durch den befristeten Schutz und die Modernisierung von Kraft–Wärme–Kopplungs–Anlagen sowie den Ausbau der **dezentralen Stromerzeugung** (durch kleinere KWK–Anlagen und die Markteinführung von Brennstoffzellen) im Interesse des Klimaschutzes erlangt werden. Die Bundesregierung und die deutschen EVU hatten sich am 25. Juni 2001 auf eine **Selbstverpflichtung** der Energieunternehmen zum verstärkten Ausbau der KWK geeinigt. Das auf dieser Vereinbarung basierende KWK–Gesetz stützt die Selbstverpflichtung der Wirtschaft zur Förderung der KWK.¹⁰⁹

Nach dem KWK–Gesetz (§ 4, Abs. 1) sind **Netzbetreiber** verpflichtet, KWK–Anlagen an ihr Netz anzuschließen und den in diesen Anlagen produzierten Strom abzunehmen. Der vom Netzbetreiber aufgenommene KWK–Strom kann verkauft (§ 4, Abs. 2) oder zur Deckung des eigenen Strombedarfs verwendet werden. Betreiber von BSZ –Anlagen haben für KWK –Strom einen Anspruch auf Zahlung einer Einspeisevergütung in Höhe von 5,1 Cent/kWh für einen Zeitraum von zehn Jahren (ab Inbetriebnahme der Anlage, § 7, Abs. 5).

Wenn die BSZ –Anlage mit **biogenen Brennstoffen** betrieben wird, gilt nicht das KWK–Gesetz sondern das Erneuerbare Energien Gesetz. Für Gruben-, Klär- und Deponiegas werden bis zu einer Leistung von 500 kW pro kWh 9,55 Cent vergütet. Kommt Biomasse bzw. Biogas zum Einsatz, so sind es bis zu 21,33 Cent/kWh.¹¹⁰

Das **Erneuerbare Energien Gesetz (EEG vom 21.07.2004)** verfolgt im Interesse des Klima- und Umweltschutzes das Ziel, eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen. Den Anteil **erneuerbarer Energien** am gesamten Energieverbrauch soll entsprechend den Zielen der Europäischen Union und der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2010 mindestens verdoppelt werden. Dabei regelt das EEG die Abnahme und Vergütung von Strom (erzeugt aus regenerativen Energiequellen, siehe § 2), die Netzkosten (z.B. Kosten des Anschlusses, § 10) und den bundesweiten Ausgleich seitens der EVU.

4.8.2 Richtlinien für BSZ–Anlagen

Bei Einführung der BSZ–Technologie als allgemein gebräuchliche Energieversorgungstechnik wird generell die anzuwendende europäische Richtlinie geltend. Technische **Rechtsvorschriften** sind Reaktionen des Staates auf Nutzen und Risikopotenziale der jeweiligen Technik. Der Gesetzgeber legt die **Anforderungen** fest und nimmt hierdurch seine Aufgabe wahr, für den sicheren Umgang mit der Technik zu sorgen.

¹⁰⁸ Gummert/Suttor, Stationäre Brennstoffzellen, S. 55

¹⁰⁹ http://www.bine.info/magazin_folgesseite.php/magazin_thema=22/seite=200

¹¹⁰ Gummert/Suttor, 2006, S. 60

Vom Anwendungsbereich der Richtlinie erfasste Produkte dürfen nur dann auf den Markt gebracht werden, wenn sie den grundlegenden Anforderungen entsprechen.¹¹¹

¹¹¹ Der Nachweis, dass das Produkt den in der Richtlinie festgelegten europäischen Sicherheitsniveau entspricht, wird durch die CE –Kennzeichnung belegt.

Die in einer BSZ–Anlage integrierten **Gerätekomponenten** zur Wasserstoffherzeugung, zur Gasaufbereitung, zur Kühlung und zur Wärmeauskopplung, zur Strom- und Wärmeerzeugung durch den elektrochemischen Prozess sowie zur Strombehandlung einschließlich der integrierten Pumpen, Gebläse und Brenner zeigen, dass hier eine ganze Reihe von **Richtlinien** greifen müssen, nämlich die Maschinen-, die Gasgeräte-, die Niederspannungs- und die Druckgeräterichtlinie. Auch muss die Richtlinie für die elektromagnetische Verträglichkeit, die einem Konformitäts- Bewertungsverfahren zugrunde liegt, eingehalten werden.¹¹² Nur so lässt sich gewährleisten, dass für Personen und Sachen kein **Gefahrenpotenzial** besteht.

Für BSZ–Gasgeräte, die mit Gasen des öffentlichen Netzes betrieben werden und deren Gasanschlussleistung 70 kW und deren elektrische Leistung 11 kW nicht überschreitet, gilt die Gasgeräte Richtlinie. Für PEMFC liegt eine Prüfgrundlage vor (VP 119 des DVGW). Dort ist z.B. festgelegt, dass die BSZ–Anlage einen gesamten **Wirkungsgrad** von über 80 % haben muss. Im Weiteren wird bei BSZ–Anlagen folgendes gefordert:

- geschlossener Gerätebau
- maximale Drucke und Temperaturen (z.B. Arbeitstemperatur bis 200 °C)
- Brenngas nach DVGW-Arbeitsblatt G260/I
- Werkstoffe und Bauanforderungen
- Gasweg: Gasfilter, 2 automatische Ventile, Gerätedruckregler, Unterdruckabsicherung
- Elektroinstallation nach VDE und diversen EN –Normen
- Kennzeichnung/Typschild/Dokumentation

4.8.3 Weitere Rahmenbedingungen

- Das Erneuerbare Energien Gesetz regelt die Höhe der **Vergütung** für Stromlieferungen an öffentliche Stromversorgungsunternehmen nur, wenn das BHKW mit biogenen Brennstoffen (z.B. Rapsöl, Biodiesel, Biogas, Holz) betrieben wird (nicht betroffen vom EEG: Erdgas, Flüssiggas und Diesel).

- Vor Inbetriebnahme des BSZ–BHKW muss die Anlage bei dem örtlichen **Netzbetreiber** angemeldet (Pflicht) und beim Zollamt ein Antrag auf Genehmigung eines ermäßigten Steuersatz gemäß Mineralölsteuergesetz für Erdgas und Diesel gestellt werden. Ebenso zwingend ist eine Abstimmung der Abgasführung mit dem zuständigen Schornsteinfeger.

- Des Weiteren sind folgende Gesetze und Verordnungen zu beachten:

- EnEG; Energieeinspargesetz (vom 22.07.1976)
- EnEV; Energieeinsparverordnung (vom 16.11.2001)
- Biomasse Verordnung (21.06.2001)
- EU-Richtlinien zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen (vom 27.09.2001)

Ein Ausbau der bereits verfügbaren KWK-Technik kann als Wegbereiter für die BSZ genutzt werden. Durch die zunehmende Substitution konventioneller KWK–Anlagen können stationäre BSZ so einen zusätzlichen Beitrag zur Minderung der Umweltbelastung leisten.

¹¹² Die Konformität muss durch einen Dritt -Zertifizierer , d.h. durch eine bekannte Stelle (DVGW) bescheinigt werden.

4.9 Glossar

- **AFC** (Alcaline Fuel Cell): Brennstoffzelle mit alkalischem Elektrolyten
- **Akkumulator:** Im Gegensatz zur Batterie kann der Akku periodisch aufgeladen werden. Anode und Katode sind dauerhafter; werden nicht verbraucht und machen Energie somit über einen längeren Zeitraum verfügbar. Dagegen wird in der Brennstoffzelle brauchbare Energie stetig durch die Zuführung von Brennstoff (Wasserstoff, Sauerstoff) erzeugt.
- **Anode:** Positiver Pol (*Pluspol*) einer Stromquelle oder positive Elektrode in einem Stromkreis, an der negative Ladungsträger (Ionen, Elektronen) aus Flüssigkeiten oder Gasen in den festen Leiter übertreten.
- **Batterie:** Eine Batterie stellt einen definierten Energiebetrag (elektrische Ladung) über einen bestimmten Zeitraum zur Verfügung. Ist diese Energie aufgebraucht, muss die Batterie ausgetauscht werden. Eine zweite Aufladung ist nicht möglich, Anode und Katode sind verbraucht und können nicht mehr als Leiter dienen (Vergleich Brennstoffzelle siehe Akkumulator).
- **Benzpyren:** *Polyzyklischer Kohlenwasserstoff* (PAK), entsteht bei der unvollständigen Verbrennung von organischen Stoffen, verbreitet vertreten in Auto- und Industriegasen. Auch in Grillprodukten, die über Holzkohle zubereitet wurden, lässt sich Benzpyren nachweisen. Spuren von Benzpyren kommen im Boden, in Gemüse und Getreide vor.
- **BHKW:** *Blockheizkraftwerke* sind Kleinkraftwerke auf Basis von Verbrennungsmotoren im Leistungsbereich von 5 bis 10.000 kW_e. Durch weitgehende Nutzung der Motorabwärme erreichen BHKW-Anlagen Wirkungsgrade bis zu 85%. Der elektrische Wirkungsgrad liegt je nach Verbrennungsprinzip zwischen 35% (Otto –Prozess) und 38% (Diesel –Prozess).
- **Biomasse:** Organische Substanzen, die vor allem durch ihren Gehalt an Kohlenwasserstoffen energetisch genutzt werden können, z.B. zur Erzeugung von elektrischem Strom, Wärme oder Treibstoff. Aus Biomasse kann über Umwandlungsprozesse Wasserstoff gewonnen werden.
- **Bipolarplatten:** Sie dienen als Elektroden der Einzelzellen im Stack (Brennstoffzellen–Stapel), der Zuführung und Verteilung der Reaktionspartner (Wasserstoff und Sauerstoff) sowie der räumlichen Trennung der Einzelzellen im Stack.
- **BSZ:** Brennstoffzelle
- **BZH:** Brennstoffzellenheizgerät
- **CH₄:** *Methan* ist der einfachste Kohlenwasserstoff (gasförmig). In der Natur ist es (infolge Zersetzung von organischer Materie) z.B. im Erdgas und in Biogasen auf. Wegen seines hohen Wasserstoffanteils (auf ein Kohlenstoffatom entfallen vier Wasserstoffatome) eignet sich Methan sehr gut als Prozessgas für Brennstoffzellen.
- **CO:** *Kohlenmonoxid* entsteht als Reaktionsprodukt von Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O) bei unvollständiger Verbrennung. Im menschlichen Körper verhindert es die Aufnahme von Sauerstoff durch das Blut und kann schon in

geringen Mengen Gesundheitsschäden hervorrufen. In Brennstoffzellen führt es zu Spannungsverlust und Katalysatorschäden.

- **CO₂:** *Kohlenstoffdioxid* entsteht bei vollständiger Verbrennung von Kohlenstoff. Es ist ein natürlicher Bestandteil der Luft und spielt eine wichtige Rolle bei der Photosynthese (Pflanzenwachstum). Die wachsende Konzentration CO₂ von in der Erdatmosphäre ist hauptverantwortlich für die Verstärkung des Treibhauseffekts und die daraus resultierenden Klimaänderungen. Deshalb ist die Reduzierung der CO₂-Emissionen, vor allem durch Energieeinsparung und innovative Technologien wie die Brennstoffzelle, ein wichtiges Ziel der globalen Umweltpolitik.
- **Elektrolyse:** Spaltung einer chemischen Verbindung durch elektrische Energie. Wird Spannung an Elektroden in einer wässrigen Lösung angelegt, fließen die positiven Ionen zur Katode, die negativen zur Anode und geben dort ihre Ladung ab. Wasser lässt sich durch Elektrolyse in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegen. Innerhalb des Brennstoffzellen-Stapels findet im Prinzip eine Umkehrung der Elektrolyse statt: Bei der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser wird die bei der Bindung freigesetzte chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt (kalte Verbrennung).
- **Elektrolyt:** Die Elektroden einer Brennstoffzelle sind durch einen Elektrolyten getrennt, der elektrisch geladene Teilchen transportieren, aber gasdicht ist. Wasserstoff und Sauerstoff können daher nicht unmittelbar miteinander reagieren wie bei der Knallgasexplosion.
- **Elektron:** Elektronen sind Träger negativer elektrischer Ladung. Sie bilden die Hülle eines Atoms. In metallischen Leitern stellen sie die einzigen beweglichen Ladungsträger dar. Ein Überschuss an Elektronen bewirkt in einem Element (Atom oder Ion) eine negative Aufladung.
- **Endotherm:** Eine endotherme chemische Reaktion benötigt Wärmezufuhr aus der Umgebungswärme.
- **Eutrophierung:** Zunahme an Nährstoffen, insbesondere an Phosphor- und Stickstoffverbindungen in einem Gewässer. Sie führt zu einem übermäßigen Wachstum von Wasserpflanzen (z.B. Algen, Laichkraut), zur Verschlammung und damit zur allmählichen Verlandung stehender Gewässer.
- **EVU:** Energieversorgungsunternehmen
- **Exotherm:** Bei einer exothermen chemischen Reaktion Prozessen wird Energie in Form von Wärme freigesetzt, z.B. bei einem Verbrennungsprozess.
- **FCKW** (Fluorchlorkohlenwasserstoffe): Vollhalogenierte Kohlenwasserstoffe, die wie polyfluorierte Kohlenwasserstoffe in vielen Lösungsmitteln enthalten sind und z. B. auch bei der Imprägnierung von Textilien verwendet werden.
- **Fossile Brennstoffe:** In tieferen geologischen Schichten gespeicherte *Primärenergieträger*, die aus organischer Substanz entstanden sind. Dazu zählen Erdgas, Erdöl, Ölschiefer, Braun- und Steinkohle. Sie decken einen großen Teil des Weltenergiebedarfs, sind aber nur begrenzt verfügbar. Bei der Verbrennung werden umweltbelastende Verbindungen emittiert, vor allem das Treibhausgas CO₂.

- **GuD:** *Gas- und Dampfkraftwerk*; eine Kombination von Gasturbine und Dampfkraftwerk. Die Gasturbine (die im Übrigen einem Flugkraftwerk entspricht) arbeitet meist mit Erdgas als Brennstoff und treibt einen Generator an. Ihre heißen Abgase werden zur Dampferzeugung für eine Dampfturbine verwendet, die ebenfalls auf einem Generator arbeitet. Auf diese Weise ist ein Wirkungsgrad von etwa 50 % erreichbar (gegenüber 30 % für die Gasturbine und rund 40 % für die Dampfturbine allein).
- **HFKW** (Teil-halogenierte Kohlenwasserstoffe): Im Unterschied zu den vollhalogenierten Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) sind die Wasserstoffatome hier nicht vollständig durch ein Halogen ersetzt. Typisch beträgt die atmosphärische Lebensdauer von FCKW einige 100 Jahre, von HFKW dagegen nur wenige Jahre.
- **H₂:** *Wasserstoff* ist ein farb- und geruchloses, zweiatomiges Gas. Wasserstoff ist das auf der Erde am häufigsten vertretene Element, kommt in der Natur aber nur in gebundener Form vor. Durch geeignete chemische Verfahren lässt sich Wasserstoff abtrennen (z. B. durch Reformierung) und dann energetisch in der Brennstoffzelle nutzen.
- **Ion:** Atom oder Atomgruppe mit Elektronenüberschuss (negatives Ion) oder –mangel (positives Ion). Positive Ionen werden Kationen, negative Anionen genannt. Je nach Anzahl der fehlenden oder überschüssigen Elektronenladungen kann es sich um einfach, zweifach usw. geladene (einwertige, zweiwertige usw.) Ionen handeln.
- **Jahresarbeitszahl (JAZ):** Maßzahl zur Beschreibung der Energie-Effizienz von Wärmepumpen; Quotient aus den Jahressummen der Wärmeabgabe und der aufgenommenen elektrischen Energie
- **KKK:** *Kraft –Kälte –Kopplung*; Gleichzeitige Nutzung von elektrischer Energie und Kälte (bei Absorptionskältemaschinen).
- **Kalte Verbrennung** (auch katalytische Verbrennung): Oxidationsreaktion, die im Gegensatz zur Verbrennung mit offener Flamme infolge der Anwesenheit eines Katalysators weit unterhalb der normalen Verbrennungstemperatur abläuft. Dadurch kann z. B. die NO_x Emission fast auf Null gesenkt werden. Bei der Brennstoffzelle wird durch kalte Verbrennung die Energie im externen Stromkreis verfügbar, die sonst bei der Knallgasreaktion in Wärme umgesetzt würde.
- **Katalysator:** Hilfsstoff, der die energetische Schwelle für eine chemische Reaktion herabsetzt und daher durch seine bloße Anwesenheit chemische Prozesse beschleunigt oder bei niedriger Temperatur überhaupt erst möglich macht. Der Katalysator geht in die Bruttoreaktion nicht ein und verbraucht sich daher nicht. Häufig werden Platin oder platinbeschichtete Oberflächen als Katalysator eingesetzt. In der Brennstoffzelle spaltet der Katalysator an der Anode den Wasserstoff in Elektronen und Protonen.
- **Katode:** Negativer Pol (*Minuspol*) einer Stromquelle in einem Stromkreis. An der Katode treten positive Ladungsträger (Kationen) aus Flüssigkeiten oder Gasen in den festen Leiter über.

- **Knallgasreaktion:** Die Knallgasreaktion ist eine exotherme Verbrennungsreaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff. Um die Reaktion hervorzurufen wird eine zusätzliche (Wärme-) Energie benötigt; die Reaktionsschwelle muss überschritten werden.
- **KWK: Kraft –Wärme –Kopplung;** Gleichzeitige Nutzung (Produktion) der elektrischen Energie und der Abwärme
- **Leistungszahl:** Die Leistungszahl η gibt die abgegebene Heizleistung der Generator-Antriebseinheit im Vergleich zur aufgewendeten elektrischen Antriebsleistung an. Die Leistungszahl 4,0 bedeutet, dass das Vierfache der eingesetzten Anschlussleistung in nutzbare Wärmeleistung umgesetzt wird.
- **MCFC** (Molten Carbonate Fuel Cell): Brennstoffzelle mit flüssigen (geschmolzenen) Polycarbonat als Elektrolyt, Betriebstemperatur über 650 °C
- **Neutron:** Neutronen sind elektrisch neutral. bilden zusammen mit den Protonen den Kern eines Atoms. während Elektronen nur etwa 1/2000 davon aufweisen.
- **NMHC** (*Nicht–Methan–Kohlenwasserstoffe*); Die Kohlenwasserstoffe stellen eine Vielzahl von Verbindungen dar. Sie können in 'Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe' und Methan eingeteilt werden.
- **NO_x:** *Stickstoffoxide* (wie NO, N₂O, NO₂, N₂O₃) entstehen bei Verbrennungsprozessen durch die Reaktion von Sauerstoff mit Luftstickstoff. Die NO_x-Bildung wird durch hohe Verbrennungstemperaturen begünstigt.
- **N₂O** (*Lachgas/Distickoxid*): Dieses Treibhausgas wird vor allem durch Verbrennungsmotoren freigesetzt und entsteht außerdem in der Landwirtschaft.
- **PAFC** (Phosphoric Acid Fuel Cell): Brennstoffzelle mit Phosphorsäure als Elektrolyten
- **PEMFC** (Proton Exchange Membrane Fuel Cell): Brennstoffzelle mit polymeren Elektrolyt (für den Protonaustausch), mit dem eine Membran beschichtet ist.
- **Proton:** Schwerer Kernbaustein mit positiver elektrischer Ladung. Bei neutralen Atomen ist die Kernladung vollständig durch die Elektronenhülle kompensiert: Die Protonen tragen je eine positive Elementarladung und die Anzahl der Hüllenelektronen mit negativer Elementarladung ist ebenso groß wie die Protonenzahl im Kern. Wird ein Hüllenelektron abgetrennt, ist das Atom ein (einwertiges) positives Ion.
- **SF₆:** *Schwefelhexafluorid* ist ein farb- und geruchloses ungiftiges Gas, reaktionsträge und unbrennbar.
- **SOFC** (Solid Oxid Fuel Cell): Brennstoffzelle mit Oxidkeramik als Elektrolyt, Betriebstemperatur > 1000 °C
- **SO₂:** *Schwefeldioxid* entsteht u. a. bei der Reaktion von Sauerstoff mit den in den meisten Brennstoffen enthaltenen Schwefel. Verbindet sich SO₂ mit dem Wasserdampf der Atmosphäre, entsteht schwefelige Säure (H₂SO₃) und damit saurer Regen.
- **Stromkennzahl:** Verhältnis von elektrischer Leistung zur Wärmeleistung bei der Kraft-Wärme-Kopplung

- **WE:** Wohneinheit; eine WE entspricht einer Wohnfläche 70 m²
- **Wirkungsgrad:** Der Wirkungsgrad ist allgemein das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand, bei einer Maschine beispielsweise das Verhältnis von abgegebener zu zugeführter Leistung. Bei Wärmeerzeugern ist stets zwischen Wirkungsgrad und Nutzungsgrad zu unterscheiden. Der Nutzungsgrad ist kein Verhältnis von Leistungen, sondern das Verhältnis von Energiebeiträgen während einer bestimmten Zeit. Z.B. schließt der Jahresnutzungsgrad einer Heizung erhebliche Teillastzeiten ein, in dem der Vollast-Wirkungsgrad nicht erreicht wird.

5 EINBINDUNG DER TECHNOLOGIE IN HANDWERK UND GEWERBE

Im Bereich der Hausenergieversorgung ist das Handwerk durch die Innovation 'Brennstoffzelle' stark betroffen. Die Kopplung der Stromerzeugung mit der Hauswärmeversorgung wird vom Elektrohandwerk als zusätzliches Geschäftsfeld identifiziert, das auch unmittelbar in das SHK- Handwerk eingreift. Diese Entwicklung kann zu einem verschärften Wettbewerb bei der Heizgeräteinstallation zwischen dem SHK- und dem Elektrohandwerk führen.¹¹³

Um einem Verdrängungswettbewerb zwischen den beiden Branchen vorzubeugen, ist schon frühzeitig eine Regelung der Aus- und Weiterbildung erforderlich. Bei entsprechender Umstrukturierung der benannten Handwerksberufe kann die Einführung der neuen Technologie durchaus zu einer Erweiterung der Beschäftigungsfelder führen, die auch einem kleinen bis mittelständischen Betrieb neue Perspektiven eröffnet.

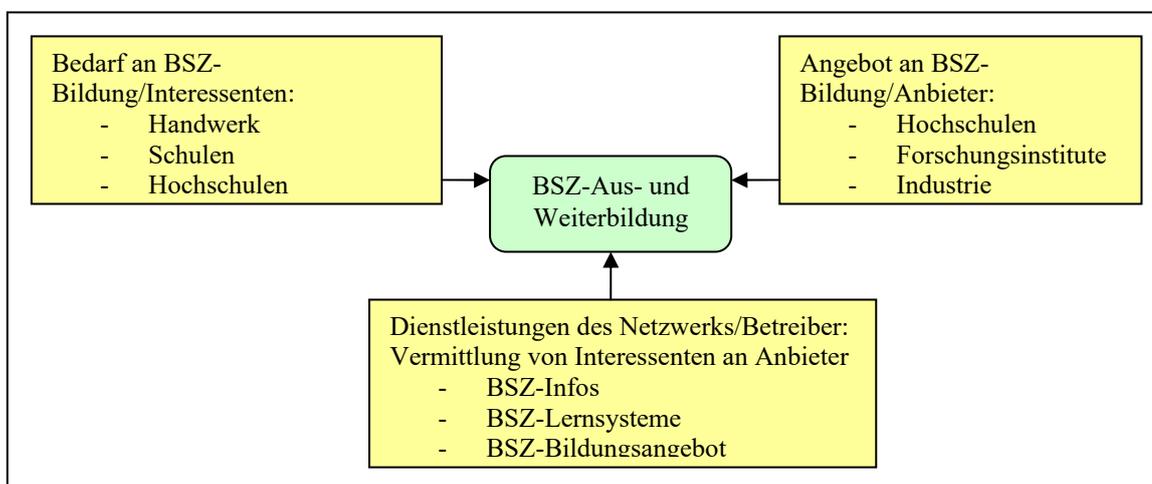


Bild 15: Angebot und Nachfrage BSZ-Bildung (Quelle: Bünger, U., 2005, S. 71)

Der Gesamtenergieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland wird im Wesentlichen durch drei große Verbraucher Gruppen verursacht, die am Bedarf je zu etwa einem Drittel beteiligt sind: Industrie, Verkehr und Haushalte.¹¹⁴ Die folgenden Erörterungen betreffen vorwiegend die Innovation 'Brennstoffzelle' in der Hausenergieversorgung.

5.1 Berufliche Weiterbildung

Schon heute werden Wartung und Reparatur von Energieversorgungsgeräten im Privathaushalt in enger Zusammenarbeit zwischen den Gewerken der Installateur-, Heizungs- und Elektrotechnik durchgeführt. Die Verbändevereinbarung vom 28. Januar 2002 stellt einen wichtigen Schritt zu deren Kooperation dar. In der Präambel der Vereinbarung heißt es: „Die Gewerke übergreifende Gebäudetechnik wird (...) immer mehr an Bedeutung gewinnen. Dabei kommt den beiden größten Gewerken innerhalb der Gebäudetechnik, dem Elektrotechniker-Handwerk sowie dem Installateur- und Heizungsbauer-Handwerk eine richtungweisende Rolle zu.“

¹¹³ Koschorke, W., 2005, S. 25

¹¹⁴ Staiß, F., 2003, S. A 10

Der Nachweis über die erfolgreiche Teilnahme des Handwerkers an einem Fortbildungskurs ermöglicht eine eingeschränkte Eintragung für das jeweils andere Gewerk in der Handwerksrolle. Ein solcher Fortbildungskurs (Modul Elektro/SHK) umfasst 240 Stunden. Ein weiteres Modul 'Brennstoffzelle' von 200 Stunden Umfang, soll sich laut ZVEH (Zentral-Verband Elektro-Handwerk) anschließen.¹¹⁵

Tabelle 17: Umsetzung der BSZ-Technologie im Handwerk (Quelle: BSZ-Bündnis Deutschland)

Ausbildung, Weiterbildung, Öffentlichkeitsarbeit	
2005 - 2007	Basisinformationen, Vorbereitung der Lehrpläne
2008 - 2010	Basisinformationen, Lehrpläne an Pilotschulen erproben, spez. Schulungen durch Hersteller
2011 - 2015	Ausbildungsinitiative, Umsetzung der Lehrpläne, spez. Schulungen durch Hersteller
2016 - 2020	Etablierung als Standardkomponente in der Aus- und Weiterbildung

Eine Basisinformation über die BSZ-Technik ist für die meisten Handwerksbetriebe ausreichend. Im Hinblick auf interessierte Nachfragen seitens der Kunden sollte dieses Informationsangebot jetzt schon genutzt werden: fachkundige Auskunft über Funktionsweise, Vorteile, Einsatzmöglichkeiten und voraussichtliche Marktreife sollte zum Beratungsumfang gehören.

Betriebe können schon heute aktiv in die konventionelle KWK einsteigen, um sich auf die neue Herausforderung durch die BSZ vorzubereiten. Einen wichtigen Punkt bildet hierbei die Wirtschaftlichkeit, die durch eine objektabhängige Bedarfsanalyse zu bestimmen ist. Hier sind Kenntnisse über, Lastprofilerstellung, Einspeisevergütung usw. erforderlich. Bei den Handwerksbetrieben besteht hier ein großer Weiterbildungsbedarf.¹¹⁶

5.1.1 Inhalte des Lehrangebots

Da die BSZ als Wärme- und Stromerzeuger in vorhandene Heizsysteme integriert werden kann und Stromeinspeisung leicht möglich ist, ergeben sich neue Aufgaben- und Geschäftsfelder. Ein zukunftsorientiertes Handwerk wird sich den Entwicklungen in Wirtschaft und Gesellschaft vorausschauend stellen und frühzeitig relevante Ausbildungsangebote wahrzunehmen. Dabei geht es vorrangig um die systematische Verknüpfung und das Zusammenwirken bereits vorhandener Qualifikationen. Für die künftige Berufsausbildung werden u. a. folgende Themenbereiche vorgeschlagen:¹¹⁷

a) Funktion und Arbeitsweisen von BSZ

Zum Verständnis der spezifischen Arbeitsweise von BSZ wird ein gewisses naturwissenschaftliches Grundwissen benötigt. Die einzelnen BSZ-Typen unterscheiden sich in Systemaufbau und Anwendung. Dies betrifft auch die Variationen von Komponenten, z. B. die Art des Elektrolyten oder die integrierte Wasserfilteranlage. Zudem spielt der ökologische Effekt eine große Rolle, der durch die neue Technologie erzielt werden kann. Außerdem

¹¹⁵ Bünger, U., et al., 2005, S. 25

¹¹⁶ Bünger, U., et al., 2005, S. 153

¹¹⁷ Forschungsgruppe Praxisnahe Berufsbildung (Univ. Bremen), 2004

sollen der unterschiedliche nationale Entwicklungsstand sowie Forschungsaktivitäten im Bereich der regenerativen und fossilen Energien vermittelt werden.

b) Optimierung von Heizungsanlagen

Heizungsanlagen sind komplexe technische Systeme, deren optimale Funktion die richtige Dimensionierung aller Komponenten und ihr einwandfreies Zusammenspiel voraussetzt. Bei Neubauten lässt sich diese Anforderung relativ leicht erfüllen. Beim überwiegenden Teil des Gebäudebestandes ist allerdings lediglich eine Anpassung der Systeme möglich, wobei allerdings mehr als 80 % der Heizungsanlagen die Möglichkeiten der hochwertigen Komponenten nicht komplett ausnutzen.¹¹⁸

Der ab 2006 erforderliche 'Energiepass' (Richtlinie 2002/91/EG) zielt verstärkt auf eine Sanierung der bestehenden Heizungssysteme und wird eine erhebliche Öffentlichkeitswirkung haben. Bei der Integration von BSZ-Heizsystemen werden die Optimierungsmaßnahmen auch das bestehende System einschließen.

c) Mini-BHKW als erster Schritt zu BSZ-Heizgeräten

Mini-BHKW stellen genau wie BZH neben Wärme auch elektrische Energie zur Verfügung. BHKW sind allerdings bereits heute kommerziell verfügbar. Auch wenn dabei heute mit konventioneller Motortechnik gearbeitet wird, gehen Fachleute davon aus, dass der Betrieb dieser Anlagen bis zu 90 % der Anforderungen und Qualifikationen voraussetzt, die bei der BSZ-Technologie erforderlich sind.

Bereits mit dem BHKW werden herkömmliche technische Grenzen überschritten und vom Handwerker neue Qualifikationen für Beratung, Planung, Installation, Wartung, Finanzierung und Service erwartet. Der Schritt zur BHKW-Heiztechnik kann somit einen wichtigen Impuls für die zukunftsgerechte Energienutzung und ein neues Selbstverständnis des Handwerks darstellen.

d) Telekommunikation zum Nutzen von Kunden und Dienstleistern

Die Ausstattung der BZH mit intelligenten Kommunikationsstellen (Leitsysteme) wird eine Ferndiagnose, -steuerung und -wartung der Anlagen ermöglichen (siehe Bild 9, Energiemanagement unter Einbindung virtueller Kraftwerke). Die automatisierte Telekommunikation zwischen Leitzentrale und BZH wird z. B. die Einstellung der Steuerparameter, die Sendung von Störmeldungen und den Empfang von Fahrplänen für das virtuelle Kraftwerk ermöglichen. Der Datenlage entsprechend können dann sofort die erforderlichen Ersatzteile und Werkzeuge aus dem Lager mitgenommen werden. Reparatur und Stillstandszeiten sind auf diese Weise deutlich reduzierbar. Bei einfachen Einstellarbeiten (vom Schreibtisch aus) kann der Einsatz vor Ort sogar ganz entfallen. Auch entfällt eine Fehlermeldung seitens der Kunden; eine Störungsmeldung wird automatisch an den Servicedienst übermittelt. Evtl. zusätzlich benötigte Gebäudeinformationen sind per Software über den 'Energiemanager' jederzeit abrufbar.

e) Contracting als Partnerschaftsmodell für das Handwerk

Die Bereitstellung und Lieferung von Nutzenergie ist traditionell Aufgabe der EVU, die Unabhängigkeitsbestreben von zentraler Versorgung kritisch gegenüber stehen. Vor diesem

¹¹⁸ Adolph, G., 2006, S. 13

Hintergrund ist die Markteinführung von BSZ in der Haustechnik für das Handwerk Herausforderung und Chance zugleich. In Synergie mit Energieversorgern und BZH-Herstellern kann vom Handwerk durch BZH Strom und Wärme angeboten werden. Hierbei sind insbesondere gesetzliche Rahmenbedingungen zu beachten und ggf. Förderanträge zu stellen (siehe Handbuch Kapitel 4.8, Rechtlicher Rahmen). Bei der Kopplung mehrerer BSZ-Anlagen zu einem virtuellen Kraftwerk eröffnet sich eine weitere Perspektive im Bereich der Effizienzsteigerung. Dabei treten Energieversorger in Partnerschaft mit dem Handwerk als 'Kontraktoren' auf. Gemeinsam bieten sie dem Kunden eine neue Dienstleistung an, die das Potenzial der Anlagen technisch, ökonomisch und ökologisch voll ausschöpft. Das Service-Modell des Contracting steht für eine 'All-inclusiv' Dienstleistung des Handwerksbetriebs.

5.1.2 Entwicklung von multimedialen Bildungskonzepten

Multimedia-Lernmodule werden inzwischen von Lernmedienentwicklern und Weiterbildungsanbietern bedarfs- und zielorientiert eingesetzt. Reine Selbstlernangebote haben sich in der Praxis nicht bewährt, denn sie lassen außer Acht, dass lernen nicht nur Wissensaufnahme, sondern auch durch Wechselwirkungen zwischen Mensch und Sache, Theorie und Praxis gekennzeichnet ist. Ebenso spielt die soziale Interaktion zwischen Lehrenden und Lernenden eine Rolle. Gerade diese Wechselwirkungen veranlassen das Gehirn zur Bildung von Assoziationen und damit zur vertieften Verarbeitung von Informationen. Hierbei werden Verbindungen zwischen Inhalten erzeugt und es bilden sich 'Anker' in Form von zentralen Wissens-elementen, anhand derer zugehörige Informationsbausteine abgerufen und abgeleitet werden.¹¹⁹

Bei der Erstellung von Lernmodulen muss im Vorhinein auch auf das Bildungsniveau, bisherige Lernerfahrungen sowie die Weiterbildungsmotivation der angesprochenen Teilnehmer berücksichtigt werden. Dann werden diese Bedingungen mit den Weiterbildungszielen abgeglichen. In einem weiteren Schritt ist zu überprüfen, ob und wie die Lehrmedien in den vorhandenen Rahmen passen.

Die neue Schlüssel- und Querschnittstechnologie der Brennstoffzelle kann im Bereich der Energieversorgung zukünftig eine bedeutende Rolle spielen. Bei der Markteinführung der BSZ werden deshalb qualifizierte Mitarbeiter benötigt, um die Wahrnehmung von Inbetriebnahme, Wartungs-, Reparatur- und Servicearbeiten sicherzustellen.

Zusammen mit dem EAZ (Elektroausbildungszentrum Aalen) und dem IAO (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation Stuttgart) ist ein Projekt in Angriff genommen worden, um eine zeitnahe Qualifizierung von Handwerkern und Facharbeitern zu gewährleisten. Innerhalb des 'H₂-Profi'-Projekts soll ein zielgruppenspezifisches und dynamisches Weiterbildungskonzept erstellt werden. Die Weiterbildungs-module wenden vor allem an Gesellen, Facharbeiter, Meister sowie Inhaber kleiner und mittelgroßer Betriebe des Kfz-, des SHK- und des Elektrohandwerks. Auch Anlagenbetreiber, z. B. aus der Energiewirtschaft werden angesprochen. Die Inhalte sind auch für die Weiterbildung von Facharbeitern bei Herstellern und Zulieferern zu nutzen.¹²⁰

Insbesondere für Praktiker sind Weiterbildungsangebote geeignet, die eine unmittelbare und lebendige Begegnung mit dem Lerngegenstand ermöglichen. Zum einen verbessern konkrete Erfahrungen das Lernen, zum anderen erleichtert eine hohe Übereinstimmung

¹¹⁹ Lernen und Lehren, S. 25

¹²⁰ www.pm.iao.fraunhofer.de

zwischen Lern- und Transfersituation den späteren Abruf des relevanten Fachwissens im Betrieb und beim Kunden vor Ort.¹²¹

Zentrales Element der Weiterbildungskonzepte sind daher Seminare mit praktischen Demonstrationen und Übungen an BSZ-Anlagen. Die Kombination aus Präsenz und mediengestütztem Lernen ermöglicht die Nutzung der Vorteile beider Methoden und gehört zum Prinzip der didaktischen Methode. Nach kurzem theoretischem Input zur Vermittlung von relevantem Fachwissen erfolgen Übungen, um die praktische Anwendung vor Augen zu führen und das Erlernte zu festigen. Zusätzliche multimediale Lernmodule zur Vor- und Nachbereitung der Präsenzeinheiten unterstützen die Verankerung der Lerninhalte. Bei der Modulgestaltung ist eine angemessene und möglichst einheitliche Art der Darbietung empfehlenswert. So ist sichergestellt, dass sich die Lernenden zügig auf die zu vermittelnden Inhalte konzentrieren und wenig Zeit für wiederholtes Durchdringen der Modulstruktur aufbringen müssen.

Die Lerninhalte sollen vor allem die Prinzipien der BSZ-Technologie darstellen. Für Facharbeiter und Handwerker hat Theoriewissen nur dann eine Bedeutung, wenn sie es in ihre praktische Arbeit integrieren können. Die Funktion der BSZ auf mikrochemischer Ebene (Atome, Ione) ist für das Technologieverständnis des BZH zwar wichtig, nicht aber unmittelbar relevant für die praktische Anwendung. Bei Wartungen oder Installationen (z. B.) reicht ein Gesamtverständnis der Anlagenfunktion aus. Die Heizgeräte sind modular aufgebaut, und auf Eingriffe in den chemischen Ablauf kann verzichtet werden. Dies ist Aufgabe von Forschung und Entwicklung.

Nach dem beschriebenen Muster und den gleichen didaktischen Prinzipien kann auch in anderen, durch basistechnologische Veränderungen gekennzeichneten Bereichen vorgegangen werden, vor allem bei innovativen Produktentwicklungen. Die rechtzeitige Erstellung eines geeigneten Weiterbildungskonzepts ermöglicht eine Punktlandung: Praktiker sind zum Zeitpunkt der breiten Markteinführung für die technologische Neuerung qualifiziert und vorbereitet. Dadurch werden unnötige Kosten durch 'Lernen an Fehlern' vermieden. Außerdem wird der Verbreitung von neuen Technologien, in diesem Fall von BSZ-Anwendungen der Weg geebnet.

5.2 Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt

Bei Volls-service am Privatkunden (Installation, Wartung, Reparatur, Strom-/Wärmehandel) gewinnt das Handwerk über die Geschäftsform des Contracting ein großes Beschäftigungsfeld dazu.¹²² Wenn Contracting nur vom Energieversorger oder Stadtwerk geboten und das Handwerk nur noch für die Installation, die Wartung und Reparatur des Heizgerätes herangezogen wird (Teilservice), geht ein Großteil der positiven Effekte verloren.

Im Falle des Volls-service würde allerdings eine höhere Personalintensität anfallen. Kleinstbetriebe, bei denen die Personalkosten wegen hoher Eigenbeteiligung am wenigsten zu Buche schlagen, oder Großbetriebe, die Tätigkeitsbereiche verlagern können, werden diese Verschiebung eher verkraften. Am härtesten wird es Kleinbetriebe zwischen 3 und 10 Mitarbeitern treffen. Sie haben laut Statistischen Bundesamt anteilmäßig die höchsten Personalkosten und stellen über die Hälfte aller Betriebe im SHK-Bereich (56 bis 60 %).¹²³

¹²¹ Lernen und Lehren, S. 26

¹²² Koschorke, W., et al., 2005, S. 144

¹²³ Koschorke, W., et al., 2005, S. 144

5.2.1 Verlagerung von Beschäftigungsschwerpunkten

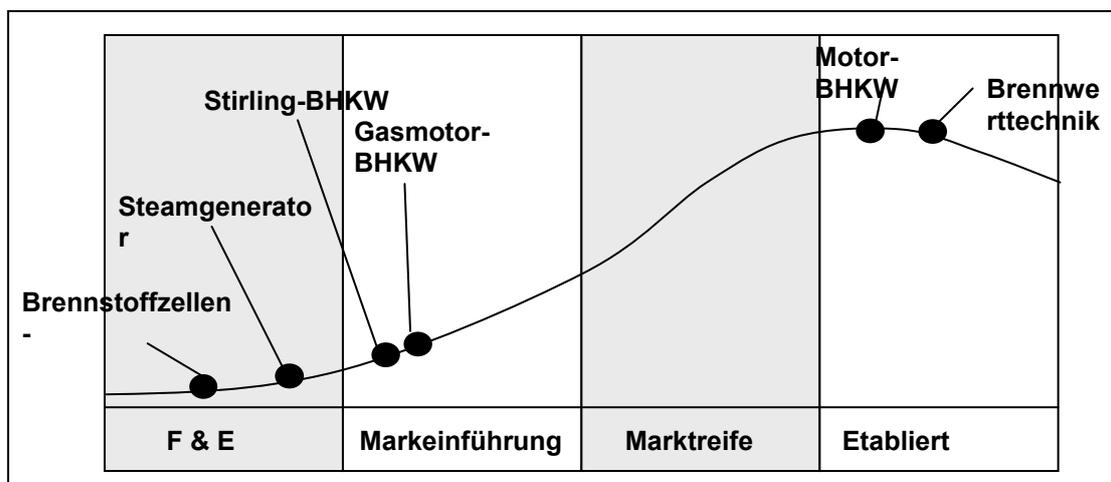
Aufgrund der Umstellung auf die neue Technologie werden auch indirekte Auswirkungen auf die Branche des SHK- und Elektrohandwerk erwartet. So ist z. B. im Maschinenbausektor ein deutlicher Zuwachs an Arbeitsplätzen zu erwarten, ebenso in der chemischen Industrie, der Metallindustrie und der Regelungstechnik.¹²⁴

Über alle Branchen hinweg wird die höhere Wertschöpfung zu einer insgesamt höheren Beschäftigungszahl. An erster Stelle steht dabei die Investitionsgüterindustrie (der Verlust im Maschinenbau wird überkompensiert), gefolgt vom Dienstleistungssektor und der Grundstoffgüterindustrie (insbesondere der Chemischen Industrie).

Die erhöhten Kosten einer BSZ führen zunächst zu einer Verringerung der Kaufkraft und der Nachfrage im privaten Konsum. Den Mehrangaben für die BSZ wird durch die Strom-Eigenerzeugung jedoch entgegengewirkt. Somit kann die verringerte Nachfrage abgepuffert werden. Zum anderen führt die teilweise Eigenversorgung mit Strom zu einer reduzierten Nachfrage auf dem Strommarkt, was wiederum zu Umsatzeinbußen und damit zu negativen Beschäftigungseffekten bei den Elektrizitätsunternehmen führt. Daher rührt unter anderen das Interesse der Energieversorger, vermehrt in das Contracting-Geschäft einzusteigen.

Bei Berücksichtigung aller Effekte auf die Beschäftigungszahlen, kompensieren einander die Änderungen.¹²⁵ Insgesamt fallen demnach die indirekten Beschäftigungseffekte eher moderat aus. Grund dafür ist wesentlich, dass die Nachfrage nach Heizungsanlagen nicht mit der BSZ-Technologie steigt, sondern im Neubaubereich durch den Zuwachs an neuen Wohnungen bestimmt und im Altbaubereich von den Sanierungs- und Substitutionszyklen der Anlagen abhängt. In diesem Bereich, der etwa 80 % der Heizungsbautätigkeit umfasst, können durch gesetzgeberische Maßnahmen (Energieeffizienz, Abgasreduktion etc.) positive Impulse gegeben werden.

Anders sieht es aus, wenn Deutschland als Marktführer innerhalb Europas auftritt. In diesem Falle würde die hohe Zahl an Exporten von BZH zu deutlich positiven Beschäftigungseffekten führen, da die Mehrkosten der Anlagen nicht zu einem Rückgang der Konsumnachfrage in Deutschland führen würde. Voraussetzung dafür sind allerdings marktreife Geräte und eine effektive Markteinführungsstrategie.



¹²⁴ Koschorke, W., et al., 2005, S. 148

¹²⁵ Koschorke, W., et al., 2005, S. 148

Bild 16: Handwerksrelevanz von Energieversorgungs-Technologien (Quelle: HPI, WOM-Projekt, Koschorke)

Tabelle 18: Betroffene Gewerke im Überblick (Quelle: Koschorke, 2004/II, Kap. 4)

Handwerksberufe	Zahl der Betriebe	Zahl der Lehrlinge	Zahl der Ausbildungsstätten	Zahl der Beschäftigten
Elektrotechniker	62.933			350.000
Elektroniker/in Automatisierungstechnik		837	371	
Elektroniker/in Energie- und Gebäudetechnik		39.193	18.364	
Elektroniker/in Informations- und Telekommunikationstechnik		949	424	
Systemelektroniker		109	77	
Elektromaschinenbauer	1.337			
Elektroniker/in für Maschinen und Antriebstechnik		1.160	564	
Informationstechniker	12.640			
Informationselektroniker, Schwerpunkt Bürosystemtechnik, Schwerpunkt Geräte- und Systemtechnik		4.929	2.634	
Installateur und Heizungsbauer	49.542			470.000
Anlagenmechaniker/in SHK		36.915	23.203	
Schornsteinfeger/in	8.085	1.692	1.658	25.000
Kraftfahrzeugtechnikerhandwerk	58.266	75.146	35.071	490.000
Landmaschinenmechaniker/in	5.512	1.336	1.017	
Zweiradmechaniker/in	3.385	2.088	1.118	
Mechatroniker/in		471	214	

5.2.2 Neue Berufsfelder im Handwerk

5.2.2.1 Elektroberufe

Technologische und organisatorische Veränderungen machten eine Umstrukturierung des Berufsfeldes Elektrotechnik notwendig. In der Elektroindustrie und in vielen Anwenderbranchen wie der Automobilindustrie, dem Maschinenbau oder der chemischen Industrie sind tief greifende Veränderungen in den unternehmensinternen und übergreifenden Prozessen zu beobachten. Moderne Arbeitsorganisationsformen mit ausgeprägter Prozessorientierung verlagern Zuständig- und Verantwortlichkeiten auf die unmittelbar Wertschöpfende Produktions- und Dienstleistungsebene.

Facharbeit zeichnet sich heute durch eine breite Aufgabenintegration und weit reichende Selbstorganisation der Arbeit aus. Informationstechnologien und die Mikroelektronik durchdringen fast alle Systeme.¹²⁶ Das Zusammenwachsen von Computern, Netzen und Medien zu einer integrierten und zunehmend internetbasierten Informations- und (Tele-) Kommunikationsstruktur führt zu einer drastischen Veränderung der Arbeitsprozesse in ihrer Struktur.

Die Neuordnung des Berufsfeldes soll diesem ökonomischen, technologischen und organisatorischen Wandel Rechnung tragen. Neben dem Bedarf an inhaltlicher Aktualisierung werden auch neue Berufe für neue Geschäftsfelder erforderlich.¹²⁷

Unter 'Elektrohandwerk' wurden ursprünglich die Berufe Elektroinstallateur, Radio- und Fernsehtechnik, Elektromaschinenbau, Elektromechanik sowie Fernmeldeanlagen elektronik subsumiert. Inzwischen gilt eine Umverteilung in folgenden Bereichen:¹²⁸

Elektroniker:

- *Fachrichtung Energie- und Gebäudetechnik*
- *Fachrichtung Informations- und Telekommunikationstechnik*
- *Fachrichtung Automatisierungstechnik*
- *Systemelektroniker*

Elektromaschinenbautechniker:

- *Elektroniker für Maschinen und Antriebstechnik*

Informationselektroniker

- *Gerätesystemtechnik*
- *Bürosystemtechnik*

Im Wesentlichen sind der BSZ die Elektrohandwerker aus dem Bereich Energie- und Gebäudetechnik fachlich zugeordnet. Betroffen sind allerdings auch die Elektroniker für Maschinen und Antriebstechnik sowie die Systemelektroniker. Für den Bereich Informationselektroniker ist der Bereich der BSZ allerdings weniger relevant.

¹²⁶ BIBB, 2003 a

¹²⁷ lernen und lehren, S. 30

¹²⁸ Koschorke, W., 2005, S. 27

Bei Einführung der BSZ-Technik in der Hausenergieversorgung wird die Elektroinstallation insgesamt aufwändiger (z. B. durch einen Strom-Rückspeisezähler), sowie ein zentrales Energiemanagement erforderlich sein wird.¹²⁹

Laut ZVEH (Zentral-Verband Elektro-Handwerk) ist eine entsprechende fachliche Einbindung der BSZ-Technologie bereits vorgenommen worden. Die neue Meisterprüfungsverordnung wurde angepasst. Nach Einschätzung des ZVEH werden etwa 10 bis 20 % der Elektrobetriebe von der BSZ-Technik betroffen sein.¹³⁰

5.2.2.2 Schornsteinfeger

Aufgrund der in den letzten Jahren in Deutschland vollzogenen Umstellung der Hausheizungen von Kohle auf Heizöl, und noch mehr auf Erdgas (in ländlichen Regionen auch Flüssiggas), zu einem geringen Anteil auf Elektroheizungen, hat das Schornsteinfeger-Handwerk sein Berufsfeld nachhaltig neuen Gegebenheiten anpassen müssen.

Gemessen in Vollzeitäquivalenten sind im Jahr 2004 in etwa 8.000 Betrieben rund 14.500 Menschen im Bereich der Schornsteinreinigung beschäftigt gewesen.¹³¹

Bei gleicher Brennstoffart erzeugen BSZ-Geräte vergleichbares Abgas wie Feuerstätten und Verbrennungsmotoren, das über Abgasanlagen ins Freie geführt werden muss. Somit sind auch die gleichen Anlagenteile und Gefährdungspotenziale vorhanden, weshalb ein ähnlicher Überprüfungsumfang sinnvoll ist wie bei konventionellen Heizungsanlagen. Ergänzend hat sich für den Schornsteinfeger das Betätigungsfeld des Energie- und Umweltberaters aufgetan. Die Energieberatung beinhaltet dabei sowohl den Vollzug der Energieeinsparverordnung (EnEV) als auch die sog. Anstoßenergieberatung und die weitere Beratung der Kunden hinsichtlich energetischer Fragen. Neben den vorgeschriebenen Tätigkeiten im Umweltbereich (1. BImSchV) sind die Schornsteinfegerbetriebe noch nicht als weiterführende 'Umweltberater' im staatlichen Auftrag abgesichert tätig.

In Zukunft wird das Schornsteinfeger-Handwerk sich neben der Überprüfung von 'Feuerstätten' verstärkt mit sicherheitstechnischen Erfordernissen (bzgl. Der Themen Kohlenmonoxid, Lüftung und Gas) im Zusammenhang mit den Heizungsanlagen beschäftigen müssen. Kundenberatungen z. B. hinsichtlich Heizöllagerstätten und/oder Brennstoffauswahl, Umgang mit Gefahrenstoffen, Behandlung von Asbestproblemen werden regelmäßig ausgeführt. Der Umweltschutzgedanke spiegelt sich auch in eingeführten Qualitäts- und Umweltmanagementsystemen (QM/UM, z. B. nach DIN EN ISO 9000ff) wieder. Die Wahrnehmung dieser Aufgaben erfolgt im staatlichen Auftrag und im öffentlichen Interesse.

5.2.2.3 Installateur- und Heizungsbauer Handwerk

Im Gewerk 'Installateur und Heizungsbauer' sind die beiden früheren Berufe Gas- und Wasserinstallateur zusammengefasst. Im Jahr 2002 waren etwa 500.000 Beschäftigte in rund 57.000 Betrieben für das Gewerk tätig.¹³²

Von der Brennstoffzellentechnologie sind in erster Linie die Heizungsbauer betroffen. Da über das BSZ-Gerät allerdings auch die Warmwasserbereitung erfolgt, ist die Technologie auch für das Wasserfach relevant. Unabhängig davon wird in der Ausbildung auch in dem jeweils

¹²⁹ Einzelfallregelungen hängen von jeweiligem Hersteller/Fachbetrieb ab.

¹³⁰ Koschorke, W., 2005, S. 27

¹³¹ DIW Berlin, 2006, S. 47

¹³² BMWI, Tagesnachrichten 31.07.2002

anderen Gewerk unterrichtet. Seit 2002 ist die Meisterprüfungsverordnung für das Installateur- und Heizungsbauerhandwerk aktualisiert und modernisiert. Seit August 2003 ist außerdem eine neue Verordnung über die Berufsausbildung zum Anlagenmechaniker/in für SHK-Technik in Kraft.

Bei Extrapolation der sich heute abzeichnenden Entwicklung könnte ein völlig neues Handwerksverständnis entstehen. Anzunehmen ist in einer viel stärkeren Anbindung des SHK-Handwerks an die Heizgeräteindustrie, ähnlich dem Verhältnis Kfz-Handwerk/Automobilhersteller und –zulieferer. Das Handwerk würde hier den gestalterischen und planenden Einfluss auf die Hausenergieversorgung gänzlich verlieren. Damit werden auch geräte- und systemspezifische Aus- und Weiterbildungsinhalte von der Industrie vorgegeben.¹³³

Für das SHK-Handwerk ist es somit wichtig, den Wandel bei der Heizungstechnik aktiv mit zu vollziehen, damit die Beschäftigung weiterhin sichergestellt ist. Zu diesem Zweck hat sich das SHK-Handwerk innerhalb der Initiative BSZ (IBZ) engagiert. Die IBZ ist ein Verbund der vier großen Gasversorgungsunternehmen, der führenden Heizsystemhersteller und verschiedener forschender Unternehmen.¹³⁴ Der Installateur- und Heizungsbau ist aufgerufen, seine Interessen deutlich zu vertreten und den Anschluss sowohl an die neue Technologie der BSZ als auch an neue Energieversorgungsmodelle zu wahren.

¹³³ Koschorke, W., et al., 2005, Anlage 2; Thesenpapier

¹³⁴ EWE AG, Oldenburg, MVV Energie AG, Mannheim, VNG Verbundnetz Gas AG, Leipzig und Ruhrgas AG, Essen mit den Herstellern Vaillant, Viessmann, Sulzer Hexis und Buderus mit der Deutschen Energie-Agentur dena, der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., mit der Universität Duisburg und dem SHK-Handwerk

6 ZUSAMMENFASSUNG/ABSTRACT

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein Handbuch als Grundstein für die Aus- und Weiterbildung im Handwerk für das Themengebiet 'Brennstoffzelle' entwickelt. Dieses Handbuch soll u. a. in Lehrgängen zu Umweltschutzthemen oder in Weiterbildungsveranstaltungen zu dem Themen 'Wasserstoff' und 'Brennstoffzelle' verwendet werden.

Um einen Einblick in die Möglichkeiten der Energieversorgung mittels des regenerativen Brennstoffs Wasserstoff zu erhalten, ist hierzu ein erläuterndes Kapitel vorangestellt. Dieses gibt den Stand der Forschung wieder und zeigt, in welcher Weise eine Nutzung von Wasserstoff möglich ist. Nach Darlegung der Eigenschaften von Wasserstoff und Beschreibung des Entwicklungsstands bei Erzeugung sowie Speicherung und Transport werden die Einsatzfelder und die Wirtschaftlichkeit erörtert.

Das Handbuch befasst sich zunächst mit der historischen Entwicklung. Danach wird das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle dargestellt. Im Folgenden werden die Anwendungsbereiche unter besonderer Berücksichtigung des Privathaushalts diskutiert. Ausführlich wird auf den Stand der Technik bei der Brennstoffzellen-Technologie eingegangen. Gerade im stationären Bereich und bei niedrigen Leistungen findet die Brennstoffzelle optimale Einsatzmöglichkeiten. Herkömmliche Energieversorgungssysteme können durch die neue Technologie umweltgerecht ersetzt. Die Umweltaspekte werden in dem Handbuch detailliert erläutert.

Künftige Energieversorgungsstrukturen werden von dezentraler Kraft-Wärme-Kopplung geprägt sein. Die Brennstoffzelle bietet sich dafür als optimales System an. Ihre Markteinführung kann in absehbarer Zeit erfolgen, ist aber auf staatliche Maßnahmen zur Förderung angewiesen, damit durch Subventionen das Kostenproblem bei anfänglich geringer Stückzahl reduziert wird.

Die Einbindung des Fachwissens zum Thema 'Brennstoffzelle' in Handwerk und Gewerbe stellt eine Herausforderung dar, der sich das Handbuch stellt. Die Gestaltung der Aus- und Weiterbildung auf diesem Gebiet, sowie die Entwicklung der betroffenen Berufsfelder ist Gegenstand der abschließenden Betrachtung.

Abstract

In this diploma thesis a compendium on fuel cells has been developed as a basis for education and further training. This guide will be used in courses on environment protection and in advanced education at training seminars concerning hydrogen and fuel cells.

In order to give an insight into the possibilities of power supply by hydrogen as a regenerative form of energy an introductory chapter on this topic is included. The state of the art is presented and it is shown by which techniques hydrogen may be used in the future.

After characterizing the properties of hydrogen and describing the methods of generation, storage and transport the applications as well as the economics are discussed.

The compendium starts with a depiction of fuel cell history. Subsequently the functional principle of fuel cells is elucidated. Then the fields of application are presented taking into account private households particularly. The progress in fuel cell technology is explained in detail and it will be presented, that esp. in stationary applications and in the low power range favourable the use of fuel cells. The benefits of replacing conventional power supply systems by the new technology concerning environmental aspects as well as the impact on the structure of energy supply are discussed.

Outstanding features of fuel cells are their extremely low emissions. Future power supply structures will be ruled by power-heat-coupling. Fuel cells are an ideal device for this technique. Market launch may be coming soon and must be encouraged by government aid to eliminate the financial problems due to initially small series.

Integrating expert knowledge on fuel cells in craft and commerce means a challenge met by the compendium. The final treatment deals with the suitable structures in education and further training, and with the development of occupational fields concerned.

LITERATURVERZEICHNIS

- 1) Antony, F., Dipl.-Ing., et al.: Solarthermische Anlagen, Berlin (DGS, Landesverband Berlin Brandenburg e.V. , VWEW Energieverlag GmbH), 2005
- 2) ASUE; Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: Stationäre Brennstoffzellen, Kaiserslautern (Rationeller Energieeinsatz), 2000
- 3) ASUE, Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: Brennstoffzellen und Mikro -KWK, Essen (Vulkan-Verlag), 2001
- 4) Beck Texte/ Storm, P.-C., Prof. Dr.: Umweltrecht, München (Deutscher Taschenbuch Verlag), 1995
- 5) Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU): Lust auf Sonne, Hamburg (Behörde für Umwelt und Gesundheit), 2002
- 6) Berthold, D., et al.: Wettlauf oder gemeinsamer Vormarsch, in: IBZ Nachrichten, Ausg. September 2003
- 7) Berthold, D. : Rahmenbedingungen stärken, in: IBZ Nachrichten, Ausg. März 2005
- 8) Bundesgesetzblatt (BGBl), Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge, 1974
- 9) Bundesgesetzblatt Jahrgang 2004, Teil1, Nr. 64, Erste Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung, 2004
- 10) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung/Bildung und Forschung/Wirtschaft und Technologie (Hrsg.): Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Berlin, 2006
- 11) Bundesgesetzblatt, Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, 2001
- 12) Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (Hrsg.): Forschungsbericht 546/Strategiekreis Wasserstoff, Berlin, 2005
- 13) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.), Energieforschung – Investition in die Zukunft, 2001
- 14) Bünger, U., Dr.: Anforderungen an das Handwerk durch die Innovation Brennstoffzelle, Hannover (Heinz-Piest-Institut für Handwerkstechnik), 2005
- 15) Dehli, M., Prof. Dr.-Ing.: Marktaussichten für Gasmotor-Wärmepumpen zur Wärmeversorgung sowie zur Teilklimatisierung in Deutschland (Studie), Esslingen, 2005
- 16) Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA/Hrsg.), Energieeinsparverordnung 2002
- 17) Dietrich, B., Dr.-Ing.: RWE Bau-Handbuch, Frankfurt am Main (VWEW Energieverlag GmbH), 13. Aufl., 2004

- 18) Dorsch, M. , et al., Integration elektrischer Gebäudesysteme, Georg-Simon-Ohm Fachhochschule Nürnberg, 2004
- 19) Forum Wissenschaft/Verpackungs-Rundschau, Technisch-Wissenschaftliche Beilage, 3/1999,
- 20) Geitmann, S.: Wasserstoff und Brennstoffzellen, Kremmen (Hydrogeit Verlag), 2002
- 21) Gottfried, A. (Hrsg.), et al.: Brennstoffzelle in beruflichen Anwendungsfeldern, in: lernen und lehren, Heft 81 (2006)
- 22) Göricke, P., Dipl.-Ing.: Stand der Elektro-Wärmepumpe zur Raumheizung (Hrsg.: IWP e.V.), 2005
- 23) Grebe, A.: Heizen mit Holz, in: quadriga 6 (2001) 13
- 24) Gummert, G./ Suttor, W.: Stationäre Brennstoffzellen, Heidelberg (C.F. Müller Verlag), 2006
- 25) Hackstette, K. et al.: Starthilfe für den Innovationsprozess, in: IBZ (Initiative Brennstoffzelle) Nachrichten, Ausg. Oktober 2002
- 26) Haselhuhn, R., et al.: Photovoltaische Anlagen, Berlin (DGS Landesverband Berlin Brandenburg e.V./VWEW Energieverlag GmbH), 2005, S. 9-33
- 27) Heidelck, R./Laue, H.J., Untersuchung von Praxisdaten zum Energiebedarf und den Treibhausemissionen von modernen Wärmepumpen; Endbericht, Fachinformationszentrum Karlsruhe (IZW e.V.), 1999, S. 10
- 28) Hauser, G., Dr.-Ing., Univ.-Prof., et al.: Energieeinsparungen im Gebäudebestand, Böhl-Iggelheim (BAUCOM Verlag für Marketing und Kommunikation), 4.Aufl., 2002
- 29) Heinloth, K., Prof.-Dr.: Energie und Umwelt, Stuttgart (Teubner Verlag), 1993
- 30) Hess, W.: Die Power Generation, in: Bild der Wissenschaft (plus), 1/2002
- 31) Hess, W.: Leben und Energie, in: Bild der Wissenschaft (plus), 2/2004
- 32) Hoppe, M., Prof. Dr.: Brennstoffzellen in der Haustechnik, Berlin (BIBB, Forschungsgruppe Praxisnahe Berufsbildung), 2004
- 33) Hübner, G., Dr. phil., Dipl.-Psych./Felser, G., Dr. phil., Dr. -Psych.: Für Solarenergie, Heidelberg (Asanger Verlag GmbH), 2001
- 34) Koschorke, W., Dipl.-Ing.: Kraft-Wärme-Kopplung mit Brennstoffzellen, Hannover (Druck-Team GmbH), 2004/I
- 35) Koschorke, W., Dipl.-Ing., et al.: Brennstoffzellen und das Handwerk: Zum aktuellen Stand der Dinge, Hannover (HPI, Heinz-Priest-Institut für Handwerkstechnik), 2004/II
- 36) Körnig, C./ Remmers, K.-H.: Solarindustrie-Neue Wirtschaftskraft für Deutschland, Berlin (UVS, Unternehmensvereinigung Solarwirtschaft e.V.), 2002
- 37) Krewitt, W., Dr.: Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung, Berlin (Erich Schmidt Verlag GmbH & Co.), 2004, S. 63
- 38) Lang, J., BINE Informationsdienst (Hrsg.), Projektinfo 06/2004

- 39) Linde AG, Werksgruppe Technische Gase: Katalog Spezialgase (Höllriegelskreuth-Verlag), 2000
- 40) Mink, H.: Brennstoffzellentechnik auf Erdgasbasis, in: Energie/Wasser-Praxis 5 (2004)
- 41) Nitsch, J., Dr.-Ing., Winter, C.J., Prof. Dr.-Ing.: Wasserstoff als Energieträger, Berlin (Springer Verlag Berlin), 1986
- 42) Pehnt, M., Langniß, O.: Energie im Wandel, Berlin (Springer Verlag Berlin Heidelberg New York), 2001
- 43) Pehnt, M., Dr./Traube, K.: Stand und mittelfristige Perspektiven stationärer Brennstoffzellen, Berlin (Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V.), 2004
- 44) Peuser, F.-A., Dr./ Remmers, K.-H./Schnauss, M.: Langzeiterfahrung Solarthermie, Berlin (Solarpraxis Supernova AG), 2001
- 45) Physik Journal (Hoogers, G.): Brennstoffzellen – Motoren der Zukunft?, 5/2000
- 46) Physik Journal (Einzel, D.): Suprafluidität in Wasserstoff, 11/2000
- 47) Physik Journal (Weinfurter, H.): Der Beugung ein Schnippchen schlagen, 7/2004
- 48) Physik Journal (Jorda, S.): Fusionsstrom: konkurrenzfähig und sicher?, 3/2006
- 49) Pichler, H., et al.: Herstellung flüssiger Kraftstoffe aus Kohle, Carl Engler und Hans-Bunte Institut für Mineralöl- und Kohleforschung der Universität Karlsruhe, 1970
- 50) Recknagel, H., Dipl.-Ing./ Sprenger, E., Dipl.-Ing./ Schramek, E.-R., Dr.-Ing.: Taschenbuch für Heizung- und Klimatechnik, München (R. Oldenburg Verlag München Wien), 68. Aufl., 1997/1998, S. 517/1690
- 51) Richter, W. Prof. Dr., et al.: Handbuch für Heizungstechnik, Berlin (Beuth Verlag GmbH), 34. Aufl., 2002
- 52) Schaub, G., Prof. Dr.-Ing.: Synthetic Hydrocarbon Fuels and CO₂ Control, Karlsruhe (Universität Karlsruhe), 2004
- 53) Schmidtchen, U.: DWV-Information (Deutscher Wasserstoff Verband): Häufig gestellte Fragen zu Wasserstoff, Berlin, 2000
- 54) Seltmann, T.: Fotovoltaik: Strom ohne Ende, Berlin (Solarpraxis Supernova AG), 2000, S. 116
- 55) Solarpraxis AG (Hrsg.), 1. Forum Wärmepumpe, Berlin (Solarpraxis AG), 2003
- 56) Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.), Umweltnutzung und Wirtschaft –Bericht zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2005
- 57) Staiß, F., Dr., Jahrbuch Erneuerbare Energien, Radebeul (Bieberstein-Fachbuchverlag), 1.Aufl., 2003
- 58) Umweltbundesamt: Behandlung von Reststoffen und Abfällen in der Eisen- und Stahlindustrie, Wien (Federal Environment Agency), 1998
- 59) VDI-Gesellschaft: Fortschrittliche Energiewandlung und –anwendung/VDI-Bericht 1594, Düsseldorf (VDI-Verlag GmbH), 2001

- 60) Verbraucher Zentrale Niedersachsen e.V.(Hrsg.): Heizung und Warmwasser, Hannover (Sponholtz Druckerei), 7.Aufl., 2001
- 61) Volger, K./Laasch E.: Haustechnik, Stuttgart (B.G. Teubner), 1994
- 62) Winkler, W., Prof. Dr. -techn.: Tendenzen und Perspektiven der internationalen Brennstoffzellenentwicklung, (HAW) Hamburg, 2005
- 63) Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.): Windfibel, Stuttgart (W.E. Weinmann Druck), 4.Aufl., 2003
- 64) WWF (Hrsg.), Fuel cells for distributed power: benefits, barriers and perspectives (Brüssel), 2003
- 65) Zittel, W., Wurster, R.; Wasserstoff: Der Energieberater, Band 2, Köln (Deutscher Wirtschaftsverlag), 1998

Internetquellen

- 1) <http://dc2.uni-bielefeld.de>
- 2) <http://www.bauzentrale.com>
- 3) <http://www.bg-bahnen.de>
- 4) <http://www.bine.fiz-karlsruhe.de>
- 5) <http://www.bmwi.de>
- 6) <http://www.chemienet.info>
- 7) <http://www.destatis.de>
- 8) <http://www.deutsche-energie-agentur.de>
- 9) <http://www.diebrennstoffzelle.de>
- 10) <http://www.dtienergy.com>
- 11) <http://www.elektroauto-tipp.de>
- 12) <http://www.energieinfo.de>
- 13) <http://www.energieportal24.de>
- 14) <http://www.ffe.de>
- 15) <http://www.forum-brennstoffzelle.de>
- 16) <http://www.fuelcelltoday.com>
- 17) <http://www.furmatech.com>
- 18) <http://www.fz-juelich.de>
- 19) <http://www.global2000.at>
- 20) <http://www.glossar.de>
- 21) <http://www.handwerk-agenda21plus.de>
- 22) <http://www.heliocentris.com>
- 23) <http://www,hydrogeit.de>
- 24) <http://www.initiative-brennstoffzelle.de>
- 25) <http://www.innovation-brennstoffzelle.de>
- 26) <http://www.juris.de>
- 27) <http://www.panda.org>
- 28) <http://www.serious-technology.de>
- 29) <http://www.staxon.com>
- 30) <http://www.umwelt-online.de>
- 31) <http://www.wbzu.de>
- 32) <http://de.wikipedia.org>
- 33) <http://www.zebotec.de>

BILDVERZEICHNIS

	Seite
Bild 1: Hauptverursacher energiebedingter CO ₂ -Emissionen	8
Bild 2: Elektrolyse von Wasser	14
Bild 3: Übersicht der Elektrolyseverfahren	16
Bild 4: Wasserstoff-Anwendung in zukünftiger Infrastruktur	24
Bild 5: Aufbau einer BSZ	36
Bild 6: Funktionsschema einer BSZ	36
Bild 7: Funktionsprinzip einer Niedertemperatur-BSZ	37
Bild 8: Vereinfachtes Fließschema einer PEM-BSZ	40
Bild 9: Energiemanagement unter Einbindung virtueller Kraftwerke	44
Bild 10: Umwandlungsstufen einer Kraft-Wärme-Maschine und einer BSZ	45
Bild 11: Wirkungsgrad von Stromerzeugungstechniken	49
Bild 12: Emissionen von KWK-Optionen	57
Bild 13: Einflussfaktoren und Wechselwirkungen beim Launch von stationären BSZ	59
Bild 14: Marktentwicklung und Qualifizierungsbedarf im Handwerk	61
Bild 15: Angebot und Nachfrage BSZ-Bildung	75
Bild 16: Handwerksrelevanz von Energieversorgungs-Technologien	81

TABELLENVERZEICHNIS

	Seite
Tabelle 1: Vorräte an Primärenergieträgern (Quelle: BMWI, 2001, S. 7).....	7
Tabelle 2: CO ₂ -Emissionen und Steinkohleeinsatz bei 1 kWh _{el} (Quelle: BMWI, 2001, S. 36)	8
Tabelle 3: Physikal. und chem. Kennzahlen (Quelle Nr.: 39, 53, www.hyweb.de)	9
Tabelle 4: Energiedichten von Energieträgern u. Speicherformen (Quelle: www.hyweb.de, www.udomi.de)	10
Tabelle 5: Kosten der H ₂ -Herstellung (Quelle: www.energieportal24.de, www.ewariss.de, Stand 2001)	28
Tabelle 6: Berufe mit Ausbildungsverknüpfung zur BSZ (Quelle: lernen & lehren, Heft 81)	30
Tabelle 7: Klassifizierung der BSZ-Typen (Quelle: ASUE, 2000, S. 10)	38
Tabelle 8: BSZ-Typen im Vergleich (Quelle: ASUE, 2000, S. 10).....	38
Tabelle 9: Teilabschnitte der Erdgasreformierung	39
Tabelle 10: Anwendungsbeispiele der BSZ-Technologie (nach Koschorke, W./Bünger, U., 2005, S. 6)	41
Tabelle 11: Charakterisierung von Konkurrenztechnologien (Quelle Nr.: 1, 5, 27, 37, 50, 54).....	52
Tabelle 12: BSZ-Perspektiven in Deutschland (Quelle: Koschorke, W./Pirk, W., et al., 2004, S. 2).....	54
Tabelle 13: Feldtest von BSZ-Anlagen (Quelle: Koschorke, W./Pirk, W., et al., 2004, S. 3).....	54
Tabelle 14: Kenndaten von Entwicklungslinien (Quelle: BINE Informationsdienst, Projektinfo 06/04).....	56
Tabelle 15: Emissionsüberblick (nach Gummert/Suttor, 2006, S. 76, www.sperber.lih.rwth-aachen.de).....	57
Tabelle 16: Herstellerangaben zu aktuellen BZH; Prototypen/Kosten (Quelle: Krewitt 2004, S. 110).....	63
Tabelle 17: Umsetzung der BSZ-Technologie im Handwerk (Quelle: BSZ-Bündnis Deutschland).....	76
Tabelle 18: Betroffene Gewerke im Überblick (Quelle: Koschorke, 2004/II, Kap. 4).82	82

Danksagung

Für die Unterstützung während der Erstellung der vorliegenden Arbeit möchte ich gerne folgenden Personen danken:

Prof. Dr. Wolfhart Lichtenberg für die freundliche, aktive und engagierte Mithilfe bei der grafischen Gestaltung und der literarischen Ausformulierung

Dipl. oec. troph. (FH) Karin Maring für die freundliche, aktive und engagierte Informationsbereitstellung und die Mithilfe bei der grafischen Gestaltung, sowie die herzliche Aufnahme in das ZEWU/Solarzentrum Team

Herr Dieter Fuhrmann für die freundliche, aktive und engagierte Informationsbereitstellung und –weitergabe zu dem Thema Brennstoffzelle und Wasserstoff, sowie die herzliche Aufnahme in das ZEWU/HWK-Team

Frau Wiltrude Beck für ihr offenes Ohr, ihre Hilfsbereitschaft und die herzliche Aufnahme in das ZEWU-Team

Dipl.-Meteorologe Bernhard Weyres-Borchert für seine aktive Hilfsbereitschaft und die freundliche Aufnahme in das Solarzentrum-Team

Auch der Fa. European fuel cell (efc) möchte ich für ihre Hilfsbereitschaft danken

Und der Person, ohne deren Mithilfe die Erstellung dieser Arbeit gar nicht möglich gewesen wäre: Frau Gerlinde Schmekal, meiner lieben Mutter; dir möchte ich besonders danken. Du hast mich motiviert und in vielerlei Hinsicht unterstützt.

Erklärung nach § 22 (6) Prüfungsordnung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe, sowie selbstständig verfasst wurde. Die als Hilfsmittel verwendeten Quellen wurden vollständig aufgeführt.

Unterschrift der Studentin

Datum

INHALT DES ANHANGS

Abschnitt 1, Internetauszüge:

- Wissen-Wasserstoff (www.hydrogeit.de)
- Wasserstoff-Energie der Zukunft (www.aves-zh.ch)
- Wasserstoff-Kennwerte (www.energieportal24.de)
- Wasserstoffenergiewirtschaft (www.diebrennstoffzelle.de)
- Kosten von Wasserstoff (www.hyweb.de)
- Die BSZ (www.wbzu.de)
- Technologie BSZ (www.staxon.com)
- Miniaturisierung der BSZ (www.elektroauto-tipp.de)
- Marktstudie Wirtschaftsfaktor BSZ (www.initiative-brennstoffzelle.de)
- BSZ-Newsletter 04-2004
- Projekt Info BSZ 06-2004
- Optimierter Teillastbetrieb von Gasturbinen (www.priosartdatabase.com)
- CO₂ sparen ist leicht (www.global2000.at)

Abschnitt 2, Gesetze:

- EnWG
- Gesetz zum Einstieg in die ökologische Steuerrreform
- Das KWK-Gesetz und seine Wirkung
- EEG
- EnEG

ABSCHNITT 1

ABSCHNITT 2