



# Regenerative Energiequellen, Brennstoffzellen und Wasserstofftechnologie

## **INHALT**

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>1.</b> | <b>Technologien für die zukünftige Energieversorgung.....</b> | <b>3</b>  |
| <b>2.</b> | <b>Regenerative Energiequellen.....</b>                       | <b>3</b>  |
| 2.1       | Wärmeerzeugung aus regenerativen Energiequellen .....         | 5         |
| 2.2       | Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen .....         | 6         |
| 2.3       | Fluktuierendes Energieangebot .....                           | 6         |
| <b>3.</b> | <b>Brennstoffzellen.....</b>                                  | <b>7</b>  |
| 3.1       | Stromerzeugung in Brennstoffzellen.....                       | 8         |
| 3.2       | Vorteile der Brennstoffzelle.....                             | 9         |
| 3.3       | Portable Anwendungen.....                                     | 9         |
| 3.4       | Mobile Anwendungen .....                                      | 10        |
| 3.5       | Stationäre Anwendungen .....                                  | 11        |
| <b>4.</b> | <b>Virtuelle Kraftwerke .....</b>                             | <b>13</b> |
| <b>5.</b> | <b>Wasserstoff als Sekundärenergieträger</b>                  | <b>14</b> |
| 5.1       | Heutige Marktpräsenz.....                                     | 15        |
| 5.2       | Perspektiven einer Wasserstoffwirtschaft .....                | 15        |
| <b>6.</b> | <b>Zusammenfassung .....</b>                                  | <b>16</b> |
| <b>7.</b> | <b>Informationsquellen .....</b>                              | <b>18</b> |

## 1. Technologien für die zukünftige Energieversorgung

Bei der Diskussion um eine zukünftige Energieversorgung, die auf eine drastische Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und auf einen zunehmenden Ersatz fossiler und nuklearer Energiequellen setzt, wird als Vision oft eine Energieversorgung auf der Basis regenerativer Energiequellen aufgezeigt, in der Wasserstoff als Sekundärenergieträger eingesetzt wird. Dieses Konzept würde sowohl eine Energiespeicherung ermöglichen, die ein fluktuierendes Energieangebot aus regenerativen Energiequellen ausgleichen kann, als auch den Import von erneuerbarer Energie in Form des Sekundärenergieträgers Wasserstoff aus sonnen- oder windenergiereichen Weltregionen. Genutzt werden soll der Wasserstoff nach diesem Konzept überwiegend in Brennstoffzellen, in denen mit hohem elektrischen Wirkungsgrad und geringen Schadstoffemissionen dezentral Strom erzeugt und in ortsnahe Versorgungsnetze eingespeist wird. Im Verkehrssektor sollen fahrzeuggebundene Brennstoffzellen verwendet werden, aus denen elektrische Antriebe mit Strom versorgt werden.

Die zentralen Elemente dieses Versorgungskonzepts sind jedoch auch unabhängig voneinander einsetzbar. So trägt die Stromerzeugung aus Wasserkraft und Windenergie bereits heute nicht unerheblich zur Stromversorgung bei. Im Jahr 2002 betrug ihr Anteil an der deutschen Stromversorgung etwa 8 %. Brennstoffzellen zum stationären wie auch zum mobilen Einsatz befinden sich zurzeit in Entwicklung bzw. Erprobung. Dabei ist bei den stationären Brennstoffzellen auf absehbare Zeit überwiegend eine Nutzung von Erdgas vorgesehen, aus dem erst vor Ort mittels eines Reformers Wasserstoff erzeugt wird. Wasserstoff wird zwar seit langem als Grundstoff in großtechnischem Maßstab verwendet, dient zurzeit aber noch nicht in nennenswertem Umfang als Sekundärenergieträger.

Regenerative Energiequellen, Brennstoffzellen und die Wasserstofftechnologie weisen demnach heute einen unterschiedlichen technischen und ökonomischen Entwicklungsstand auf. Im vorliegenden Themenpapier werden die einzelnen Komponenten des Gesamtkonzepts in ihrer technischen Funktionsweise charakterisiert, ihr derzeitiger technischer Entwicklungsstand wird dargestellt und ihre ökonomischen Perspektiven werden erörtert. Die Grundlage hierfür bilden aktuelle Veröffentlichungen zu diesen Themenbereichen. Im Interesse einer besseren Lesbarkeit wird jedoch auf einen Einzelnachweis der jeweils herangezogenen Quellen verzichtet.

## 2. Regenerative Energiequellen

Als regenerativ werden solche Energiequellen bezeichnet, die nicht auf der Nutzung erschöpfbarer Ressourcen beruhen. Überwiegend basieren die regenerativen Energiequellen auf einer direkten oder indirekten Nutzung der eingestrahelten Solarenergie. Ausnahmen bilden die Geothermie und

Gezeitenenergie, wobei letztere in Deutschland auch perspektivisch keine nennenswerte Rolle für die Energieversorgung spielen kann.

Regenerative Energien können sowohl zur Wärmeversorgung als auch zur Stromversorgung eingesetzt werden. Die folgende Tabelle bietet eine Übersicht zu den heute in Deutschland genutzten regenerativen Energiequellen.

| Energiequelle  | Wärmeerzeugung   | Stromerzeugung   |
|--|--|--|
| Solare Einstrahlung  | Solarkollektoren zur Trinkwassererwärmung<br><br>Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit saisonalem Speicher | Direkte Stromerzeugung durch Photovoltaik  |
| Windenergie  | -  | Direkte Stromerzeugung an windreichen Standorten<br><br>Zukünftig: Offshore-Windkraftanlagen |
| Wasserkraft  | -  | Wasserkraftwerke an Flüssen und Stauseen   |
| Feste Biomasse   | Direkte Verfeuerung als Scheitholz, Holz-Hackschnitzel oder Holz-Pellets                                       | Thermische Kraftwerke bzw. Heizkraftwerke mit Biomasse-Feuerung                              |
| Biogas (biogenes Methan)   | Biogas-Feuerung oder Wärme aus Biogas-KWK  | Stromerzeugung in Biogas-Motoren und -Turbinen   |
| Biomassenutzung zukünftig auch auf der Basis speziell angebauter nachwachsender Rohstoffe. |  |  |
| Oberflächennahe Geothermie   | Heizwärme über Wärmepumpen   | -  |
| Tiefengeothermie   | Fernwärmeversorgung  | Thermische Kraftwerke bzw. Heizkraftwerke  |

Nicht explizit aufgeführt sind in der Aufstellung Sonderfälle wie die Klärgasnutzung oder die energetische Verwertung von Siedlungsabfällen oder Altholz, die eine Sekundärnutzung von Biomasse-Rohstoffen darstellen.

Insgesamt wurden in Deutschland im Jahr 2003 etwa 3 % des Primärenergiebedarfs aus regenerativen Energiequellen bereitgestellt.

Bei Stromerzeugung auf der Basis von Holz oder nachwachsenden Rohstoffen sowie bei der Nutzung der Tiefengeothermie zur Wärme- und Stromerzeugung gibt es zur Zeit in Deutschland erst wenige Pilotanlagen. In beiden Bereichen ist aber in den kommenden Jahren mit einem deutlichen Ausbau zu rechnen.

Weitere Technologien zur Nutzung regenerativer Energien, die aber in Deutschland keine Bedeutung erlangen können, sind z.B. solarthermische Kraftwerke oder solare Aufwindkraftwerke an Standorten mit einem hohen Direktstrahlungsanteil sowie Wasserkraftwerke auf der Basis von Meeresströmungen oder Gezeiten.

Zu einer Erhöhung des prozentualen Anteils regenerativer Energien am gesamten Primärenergieverbrauch kann sowohl der Ausbau regenerativer Energiequellen als auch die Senkung des Energiebedarfs durch die Steigerung der Energieeffizienz beitragen. Auf längere Sicht werden beide Wege für die Schaffung einer nachhaltigen Energieversorgung auf der Basis regenerativer Energien notwendig sein. Kurzfristig hängt die Entscheidung, in welchem Ausmaß in eine Erhöhung der Energieeffizienz oder in einen Ausbau der regenerativen Energieerzeugung investiert wird, vom wirtschaftlich-technischen Entwicklungsstand der jeweiligen Technologien, aber auch von den politisch gestaltbaren Rahmenbedingungen ab.

Über die generelle Notwendigkeit zum weiteren Ausbau regenerativer Energiequellen besteht weitgehend Einigkeit. So verfolgt die Europäische Union das Ziel, den Anteil der erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2010 auf 12 % zu steigern. Die hessische Landesregierung strebt in ihrem aktuellen Regierungsprogramm an, den Anteil erneuerbarer Energien bei der Energieerzeugung in Hessen bis zum Jahr 2015 auf 15 % zu erhöhen.

## **2.1 Wärmeerzeugung aus regenerativen Energiequellen**

Den größten Anteil an der Wärmeerzeugung aus regenerativen Energiequellen besitzt zurzeit die Nutzung von Holz. Neben der traditionellen Verfeuerung von Scheitholz werden hier aktuell durch die Verfeuerung von Holzhackschnitzeln und von Holzpellets neue Märkte erschlossen.

Die Nutzung von Klär- bzw. Biogas aus Abwasser, Siedlungsabfällen und landwirtschaftlichen Abfällen wird an einzelnen Standorten bereits praktiziert, kann aber noch ausgeweitet werden.

Weitere regenerative Energien, die noch ein großes ausbaufähiges Potenzial aufweisen, sind die thermische Solarenergienutzung durch Solarkollektoren, die bisher vorwiegend im Bereich von Einfamilienhäusern eingesetzt werden, oder die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme mit Hilfe von Wärmepumpen. Beides sind dezentrale Konzepte, die nur in geringem Maße standortabhängig sind. Für die genannten Bereiche stehen entwickelte technische Verfahren zur Verfügung, die in Teilbereichen bereits heute wirtschaftlich konkurrenzfähig zu konventionellen Verfahren der Wärme-

erzeugung sind. Eine weitere Verbesserung der wirtschaftlichen Perspektive ergibt sich im Fall nachhaltiger Preissteigerungen für fossile Brennstoffe.

## **2.2 Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen**

Der technische Entwicklungsstand wie auch die derzeitige Bedeutung für die Elektrizitätsversorgung sind für die einzelnen regenerativen Energien sehr unterschiedlich. Am weitesten technisch entwickelt ist die Nutzung der Wasserkraft zur Stromerzeugung. An den größeren Fließgewässern wird das wirtschaftlich erschließbare Potenzial in Deutschland bereits seit langem weitgehend genutzt und trägt mit einem Anteil von derzeit etwa 4 % zur Stromversorgung bei.

Die Stromerzeugung aus Windkraft hat in Deutschland, von Null ausgehend, im vergangenen Jahrzehnt sprunghaft zugenommen und übertrifft inzwischen die Stromerzeugung aus Wasserkraft. In den kommenden Jahren ist eine weitere Expansion vor allem durch den Bau von Offshore-Windparks im Bereich der Nord- und Ostsee und durch den Ersatz kleiner, älterer Windkraftanlagen durch leistungsstärkere Anlagen (Repowering) zu erwarten.

Die direkte Stromerzeugung aus Solarenergie durch Photovoltaik hat in den vergangenen Jahren trotz der vergleichsweise hohen Kosten erheblich zugenommen, liegt aber bisher und für eine absehbare Zukunft mit einem Anteil im Promillebereich deutlich unter der Stromerzeugung aus Wind- oder Wasserkraft.

Der Einsatz erneuerbarer Energiequellen (insbesondere Windenergie) zur Stromerzeugung ist in den vergangenen 10 Jahren stark angestiegen und hat sich gegenüber dem Anteil in 1990 etwa verdoppelt. In der Richtlinie der Europäischen Union zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt von 2001 wird für Deutschland als nationales Richtziel ein weiterer Anstieg auf 12,5 % des gesamten Strombedarfs im Jahr 2010 festgelegt.

## **2.3 Fluktuierendes Energieangebot**

Im Vergleich zur Nutzung konventioneller Energieträger auf fossiler Basis ist die Nutzung regenerativer Energiequellen stärker von dem durch natürliche Zyklen bestimmten Angebot abhängig. Dies ist aber nicht in gleichem Maße bei allen regenerativen Energien der Fall. So ergeben sich bei der Nutzung fester Biomasse kaum Unterschiede zum Einsatz fossiler Festbrennstoffe und auch die Nutzung der Wasserkraft aus Laufwasserkraftwerken ist relativ gut planbar.

Hingegen ist die Stromerzeugung aus Windenergie oder Solarenergie stärkeren Schwankungen unterworfen. Um hier das fluktuierende Stromangebot aus regenerativen Energiequellen und die ebenfalls schwankende Stromnachfrage auszugleichen, kann entweder durch gut regelbare konventionelle Kraftwerke Reservekapazität bereitgestellt werden, oder es müssen Möglichkeiten zu Energiespeicherung vorgesehen werden. Dies wäre z.B. durch den Einsatz von Pumpspeicher-Kraftwerken oder zukünftig auch durch Wasserstoff als Sekundärenergie möglich. In einem solchen Szenario würde Wasserstoff in Zeiten erzeugt werden, in denen die

mögliche Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen die Stromnachfrage übersteigt.

Bei dem aktuellen und mittelfristig absehbaren Anteil regenerativer Energien an der gesamten Stromerzeugung kann der zeitliche Ausgleich durch die wegen der schwankenden Stromnachfrage ohnehin erforderlichen Kraftwerksreserven kostengünstiger erfolgen als durch den Einsatz zusätzlicher Speichersysteme. Erst bei einem deutlich höheren Anteil fluktuierender regenerativer Energiequellen an der Stromversorgung kann die Integration zusätzlicher Speicherkapazitäten erforderlich werden, die zusätzliche Kosten verursachen.

### 3. Brennstoffzellen

Von entscheidender Bedeutung für die Höhe des zukünftigen Primärenergiebedarfs sind die zur Stromerzeugung eingesetzten Technologien. Denn elektrische Energie wird als vielseitig nutzbare Sekundärenergie in sehr vielen Anwendungsfeldern und in wachsendem Umfang verwandt. Der Anteil elektrischer Energie am gesamten Endenergieverbrauch beträgt in Deutschland zurzeit etwa 18 %. Bezogen auf den gesamten Primärenergieverbrauch machen die zur Stromerzeugung eingesetzten Primärenergieträger aber aufgrund der vergleichsweise geringen Wirkungsgrade bei der Stromerzeugung einen Anteil von ca. 37 % aus.

Die geringe Ausnutzung der eingesetzten Primärenergie von im Mittel nur etwa 33 % ist überwiegend durch die heute vorherrschende Stromerzeugung in großen Kondensationskraftwerken bedingt. Prinzipiell kann aufgrund des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik in einer Wärmekraftmaschine nur ein Teil der thermischen Energie in mechanische oder elektrische Energie umgewandelt werden, während der Rest als Abwärme abgegeben werden muss. Innerhalb der dadurch vorgegebenen physikalischen Grenzen kann jedoch zur besseren Primärenergieausnutzung bei der Stromerzeugung der Wirkungsgrad der Kraftwerke durch technische Maßnahmen wie eine Steigerung der Prozesstemperatur erhöht werden. So können heute errichtete moderne GUD-Kraftwerke, durch eine hohe Prozesstemperatur in der Gasturbine sowie eine nachgeschaltete Dampfturbine einen elektrischen Wirkungsgrad bis etwa 60 % erreichen.

Die Energieausnutzung kann zudem durch die Anwendung des Prinzips der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) verbessert werden: Dazu muss die bei zentralen Großkraftwerken meist nicht genutzte Abwärme, die bei der Stromerzeugung anfällt, als nutzbare Wärme zur Deckung des Bedarfs an Prozess- und Heizwärme eingesetzt werden. Möglich ist dies bei einer Stromerzeugung in verbrauchsnahe Heizkraftwerken, die Fernwärme bereitstellen. Eine gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung mit einer Gesamt-Brennstoffausnutzung von 85 % oder mehr lässt sich auch durch Blockheizkraftwerke (BHKW) erreichen, die z.B. zur Versorgung einzelner größerer Objekte oder kleiner Nahwärmeinseln erfolgreich eingesetzt werden.

### 3.1 Stromerzeugung in Brennstoffzellen

Eine grundlegend andere Möglichkeit zur Steigerung des Wirkungsgrades bei der Stromerzeugung bietet der Einsatz von Brennstoffzellen (BZ). In Brennstoffzellen wird der Strom nicht in einem thermodynamischen Prozess sondern elektrochemisch erzeugt. Damit entfällt die Begrenzung des erreichbaren Wirkungsgrades durch den Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik; es lässt sich prinzipiell eine höhere Effizienz bei Umwandlung von Primärenergie in elektrische Energie erreichen. Theoretisch sind dabei je nach Brennstoffzellentyp und Anlagengröße elektrische Wirkungsgrade bis zu 60 % und sogar darüber möglich.

In einer Brennstoffzelle werden Wasserstoff und Sauerstoff in einem Reaktionsraum zusammengebracht, in dem die Elektroden durch einen Elektrolyten getrennt sind, der für Ionen durchlässig ist. Infolge des Transports von Ionen durch die Elektrolytschicht bildet sich zwischen den Elektroden eine elektrische Gleichspannung von knapp 1 V (Zellspannung), die zur Stromerzeugung genutzt werden kann. Die Stromabgabe aus der Brennstoffzelle kann dabei durch die Gaszufuhr bis zu einem vom Aufbau der Brennstoffzelle abhängigen Maximalwert gesteigert werden. Im Unterschied zu Batterien oder Akkumulatoren, in denen die Energieabgabe durch die in einem abgeschlossenen Reaktionsraum chemisch gespeicherte Energie begrenzt ist, bildet die Brennstoffzelle einen offenen elektrochemischen Energiewandler, dessen Kapazität durch die externe Brennstoffzufuhr bestimmt wird.

Um die zur Versorgung elektrischer Verbraucher benötigten höheren Spannungen zu erzeugen, werden mehrere Brennstoffzellen zu einem Zellenstapel bzw. Stack zusammengefügt, der zunächst wie eine Batterie eine Gleichspannung erzeugt. Ein zusätzlicher Wechselrichter ist erforderlich, wenn Wechselspannung benötigt wird oder die Brennstoffzelle im Parallelbetrieb zum Netz der allgemeinen Versorgung eingesetzt werden soll.

Für den Einsatz in Brennstoffzellen können unterschiedliche Elektrolytmaterialien eingesetzt werden, die bei unterschiedlichen Betriebsparametern einen Ionentransport zulassen. Die bisher entwickelten Brennstoffzellentypen werden nach der Art der Zellmembran benannt, wobei sich die häufig verwendeten Abkürzungen aus der jeweiligen englischen Bezeichnung ableiten. Die verschiedenen Zelltypen mit ihren jeweiligen charakteristischen Betriebsparametern sind in der nachstehenden Übersicht zusammengestellt.



| Zelltyp                       | Abkürzung | Elektrolyt       | Betriebs-temperatur |
|-------------------------------|-----------|------------------|---------------------|
| Polymer-Elektrolyt-Membran BZ | PEMFC     | Polymermembran   | 60 – 80 °C          |
| Alkalische BZ                 | AFC       | Kalilauge        | 60 – 90 °C          |
| Direktmethanol BZ             | DMFC      | Polymermembran   | 80 – 110 °C         |
| Phosphorsäure BZ              | PAFC      | Phosphorsäure    | 160 – 220 °C        |
| Schmelzkarbonat BZ            | MCFC      | Karbonatschmelze | 600 – 650 °C        |
| Oxidkeramische BZ             | SOFC      | Keramik          | 800 – 1.000 °C      |

Bei allen Brennstoffzellentypen bildet die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff die Grundlage der Stromerzeugung. Als Brennstoff können aber auch Erdgas oder andere wasserstoffhaltige Gase eingesetzt werden, aus denen dann aber in vorgelagerten Reaktionen Wasserstoff erzeugt werden muss.

Zur Aufbereitung des Brennstoffs sind abhängig vom gewählten Brennstoffzellentyp verschiedene weitere Subsysteme notwendig, in denen das Gas z.B. entschwefelt oder befeuchtet wird. Während bei den Niedertemperatur-Brennstoffzellen (mit Ausnahme der DMFC) in einem separaten vorgelagerten Reformier Wasserstoff erzeugt wird, können Hochtemperaturbrennstoffzellen direkt mit Erdgas betrieben werden. Das Erdgas wird hier durch die hohe Temperatur im Reaktionsraum der Brennstoffzelle mit Hilfe von zugesetztem Wasserdampf katalytisch in Wasserstoff umgesetzt (interne Reformierung).

### 3.2 Vorteile der Brennstoffzelle

Im Vergleich zu den konkurrierenden Verbrennungskraftmaschinen bieten Brennstoffzellen für die Stromerzeugung grundsätzlich eine Reihe von technischen Vorteilen. So sind die prinzipiell erreichbaren elektrischen Wirkungsgrade höher. Außerdem können Brennstoffzellen modular in einem sehr breiten Leistungsspektrum eingesetzt werden, und sie können grundsätzlich auch im Teillastbetrieb noch gute Wirkungsgrade erreichen. Bedingt durch die geringeren Reaktionstemperaturen sind die Emissionen von NO<sub>x</sub> und CO gering, und aufgrund der Notwendigkeit, den Brennstoff für den Betrieb der Brennstoffzelle zu entschwefeln, entstehen keine SO<sub>2</sub>-Emissionen.

Für Brennstoffzellen bietet sich ein breites Anwendungsspektrum in einem weiten Leistungsbereich. Dabei wird in der Regel zwischen portablen, mobilen und stationären Anwendungen unterschieden.

### 3.3 Portable Anwendungen

Brennstoffzellen können zur netzunabhängigen Stromversorgung portabler Kleingeräte wie z.B. Laptops, Mobiltelefone oder Messgeräte eingesetzt werden. Gegenüber der heute üblichen Versorgung durch Batterien oder

Akkumulatoren kann eine höhere Kapazität und dadurch eine längere autarke Betriebszeit erreicht werden. Prototypen dieser Geräte sind bereits entwickelt und wurden verschiedentlich vorgestellt.

Die Entwicklung konzentriert sich hier auf den Einsatz von Direktmethanol-Brennstoffzellen wegen der problemloseren Handhabung des Brennstoffs im Vergleich zur Wasserstoffversorgung von Kleingeräten. Es werden aber auch portable Geräte mit PEM-Brennstoffzellen entwickelt.

Portable Anwendungen werden häufig als der Bereich angesehen, in dem Brennstoffzellen zuerst vermarktet werden können. Begünstigt wird dies durch die vergleichsweise geringe erforderliche Systemleistung, wodurch die Kosten für die benötigte elektrische Arbeit in den Hintergrund treten. Zudem könnten portable Kleingeräte, die durch eine Brennstoffzelle versorgt werden, gegenüber batterieversorgten Systemen Gewichtsvorteile aufweisen und das bei Akkumulatoren auftretende Problem der Selbstentladung vermeiden. Bei moderaten absoluten Zusatzkosten für portable Geräte mit Brennstoffzelle könnte dies zusammen mit dem technischen Neuigkeitswert eine entsprechende Nachfrage mobilisieren. Von einigen Herstellern wurde der Markteintritt entsprechender Geräte noch für 2004 angekündigt; bisher sind aber noch keine Serienprodukte am Markt verfügbar.

### **3.4 Mobile Anwendungen**

Bis auf wenige Ausnahmen basiert heute die Energieversorgung des Verkehrssektors auf Erdölprodukten. Langfristig ist hier die Einführung alternativer Treibstoffe und Antriebskonzepte notwendig, um das Mineralöl als dominanten Energieträger abzulösen und um auch im Verkehrssektor regenerative Energien einsetzen zu können.

Eine vieldiskutierte Strategie sieht hierbei den Einsatz eines elektrischen Fahrzeugantriebs vor, der durch eine bordeigene Brennstoffzelle mit Strom versorgt wird. Mehrere große Fahrzeughersteller entwickeln und erproben zurzeit Prototypen von solchen Brennstoffzellen-Fahrzeugen. Für die Versorgung der Brennstoffzelle mit Wasserstoff wird dabei der Einsatz von Druckgasspeichern, Flüssigwasserstofftanks und auch Metallhydridspeichern untersucht.

Ein Fahrzeugbetrieb mit Wasserstoff setzt allerdings in der Regel eine flächendeckende Wasserstoffversorgung mit entsprechenden Betankungseinrichtungen voraus, die als neues Infrastruktursystem einen hohen Investitionsaufwand erfordert. Als Übergangslösung ist auch die Verwendung von Erdgas als Treibstoff denkbar, wobei dann zusätzlich Reformier im Kraftfahrzeug vorhanden sein müssten. In Nischenmärkten mit geringen Anforderungen an die Fahrzeugreichweite wie z.B. im ÖPNV oder im Güternahverkehr sind Insellösungen möglich, bei denen der benötigte Wasserstoff lokal an einem oder wenigen Stützpunkten bereitgestellt wird.

Durch den Einsatz von Fahrzeugantrieben auf der Basis von Brennstoffzellen und Elektromotoren könnten - mit Hilfe von Wasserstoff als Sekundärenergieträger - auch regenerative Energiequellen für den Einsatz im Verkehrsbereich erschlossen werden. Darüber hinaus besitzt diese

Antriebsart den Vorteil sehr geringer lokaler Schadstoffemissionen, was insbesondere für Ballungsgebiete von erheblicher Bedeutung wäre.

Abgesehen von PKW-Prototypen der Automobilhersteller konzentriert sich die Entwicklung derzeit auf Spezialanwendungen, bei denen besonders günstige Randbedingungen für den Einsatz von Brennstoffzellen im Fahrzeugbereich vorliegen. So werden zurzeit in einem von der EU geförderten und auf zwei Jahre angelegten Feldversuch in neun europäischen Großstädten, unter anderem in Hamburg und Stuttgart, Nahverkehrsbusse mit Brennstoffzellenantrieben getestet. Im ebenfalls von der EU geförderten Entwicklungsprojekt "Zero Regio" sollen im Zeitraum bis 2008 im Rhein-Main-Gebiet sowie in der Lombardei Wasserstoffversorgungssysteme aufgebaut und Brennstoffzellen-Fahrzeuge auf ihre Alltagstauglichkeit getestet werden.

In Prototypen werden Brennstoffzellenantriebe auch in Bereichen getestet, in denen bisher bereits Elektroantriebe eingesetzt werden wie z.B. bei Gabelstaplern oder Elektrofahrrädern. Gegenüber der Speicherung der elektrischen Energie in Akkumulatoren ergibt sich ein Vorteil durch eine Erhöhung der Reichweite und durch eine Beschleunigung der Lade- bzw. Tankvorgänge.

Von einzelnen Fahrzeugherstellern wird die Einführung von Brennstoffzellen-PKW bereits ab dem Jahr 2010 angestrebt. Verbindliche Ankündigungen zur Markteinführung seriengefertigter Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb gibt es aber zurzeit noch nicht, entsprechende früher veröffentlichte Meldungen erwiesen sich als wenig belastbar. Nach Angaben der Initiative Brennstoffzelle rechnen Experten führender Hersteller mit einer Marktreife entsprechender Fahrzeuge erst deutlich nach dem Jahr 2010. Zurzeit gibt es auch noch keine einheitliche Systementscheidung, ob die zukünftige Treibstoffversorgung der Fahrzeuge mit flüssigem oder mit gasförmigen Wasserstoff erfolgen soll.

### **3.5 Stationäre Anwendungen**

Die dezentrale Stromerzeugung in stationären Anlagen bildet ein weiteres mögliches Einsatzfeld für Brennstoffzellen. Eine Anwendung ist die Insel- bzw. Notstromversorgung für Rechenzentren oder EDV-Anlagen, wo Brennstoffzellen gegenüber den heute üblichen batterieversorgten Anlagen zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV-Anlagen) eine längere Standzeit ermöglichen könnten.

Das potenziell größte und vielversprechendste Anwendungsgebiet bildet der Einsatz von stationären Brennstoffzellen zur gekoppelten Strom- und Wärmeenergieerzeugung. Denn trotz eines potenziell hohen elektrischen Wirkungsgrades fällt auch bei der Stromerzeugung durch Brennstoffzellen Wärme an, die wie bei jeder KWK-Technik genutzt werden kann. Hierbei könnten Brennstoffzellen in Zukunft durch einen gegenüber Verbrennungskraftmaschinen höheren elektrischen Wirkungsgrad und zusätzliche Wärmenutzung zur effektiven Primärenergieausnutzung und zur Emissionsminderung bei Luftschadstoffen und Treibhausgasen beitragen.

Entwickelt werden derzeit für diesen Einsatzbereich sowohl Niedertemperatur-Brennstoffzellen (PEMFC, PAFC) als auch Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC, MCFC) im Leistungsbereich von  $1 \text{ kW}_{\text{el}}$  bis zu einigen hundert  $\text{kW}_{\text{el}}$ . Mit diesen Leistungsgrößen zielen die Anlagen auf den unterschiedlichen Wärmebedarf der jeweiligen Objekte, die von Ein- und Zweifamilienhäusern bis zu größeren Dienstleistungs- und Gewerbebetrieben reichen. Überwiegend ist derzeit vorgesehen, diese Anlagen mit Erdgas als Brennstoff zu betreiben, um auf die bereits vorhandene Versorgungs-Infrastruktur zurückgreifen zu können. Dazu muss das Erdgas bei den Niedertemperatur-Brennstoffzellen in einem vorgeschalteten Reformier in Wasserstoff und  $\text{CO}_2$  aufgespalten werden. Bei Hochtemperatur-Brennstoffzellen kann die Reformierung wegen der hohen Betriebstemperatur direkt im Reaktionsraum der Brennstoffzelle ablaufen. Notwendig ist aber auch hier eine vorgeschaltete Reinigung des Erdgases, da die Brennstoffzellen sehr empfindlich auf Verunreinigungen des Brennstoffs reagieren.

Aktuell werden in Deutschland einige hundert kleinere stationäre Brennstoffzellen-Anlagen in Feldtests erprobt. Dabei steht zunächst die technische Optimierung im Vordergrund. Zurzeit erreichen die Zellen im Feldversuch elektrische Wirkungsgrade von 25 – 30 % (1 kW-Anlage) bis zu etwa 50 % (250 kW-Anlage). Diese Werte können und sollen im Zuge der technischen Weiterentwicklung der Brennstoffzellen noch gesteigert werden. Im Labor werden bereits höhere elektrische Wirkungsgrade erreicht. Durch die zusätzliche Wärmenutzung kann ein Gesamtwirkungsgrad von ca. 85 % erreicht werden.

Außer zur Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades besteht auch bei der Verbesserung der Standzeit der Brennstoffzellen-Stacks und bei den Reformern für Niedertemperatur-Brennstoffzellen noch erheblicher Entwicklungsbedarf. Für einen erfolgreichen Markteintritt der Anlagen ist zusätzlich zur technischen Optimierung auch eine drastische Senkung der Herstellungskosten erforderlich, um mit den bereits am Markt eingeführten motorischen Blockheizkraftwerken konkurrieren zu können.

Nach Aussagen der Hersteller ist mit einer wirklichen Markteinführung kleiner Brennstoffzellen-Heizgeräte, die zur Versorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern eingesetzt werden können, etwa ab dem Jahr 2010 zu rechnen. Etwas früher können voraussichtlich größere stationäre Brennstoffzellen verfügbar sein, die in der Industrie und im Dienstleistungsbereich eingesetzt werden können.

Wenn die erwarteten und prognostizierten technischen und ökonomischen Ziele bei der Brennstoffzellenentwicklung erreicht werden, können Brennstoffzellen effiziente und vielseitige Energiewandler für die zukünftige Energieversorgung darstellen. Zurzeit müssen die als Prototypen und Kleinserien verfügbaren Brennstoffzellen in den jeweils vorgesehenen Anwendungsfeldern in ihrem Betriebsverhalten untersucht werden, und die Ergebnisse müssen in die technische Weiterentwicklung einfließen. Erst wenn die Entwicklungsziele erreicht sind, ist ein Breitereinsatz dieser Technologie erfolversprechend.

## 4. Virtuelle Kraftwerke

Nachdem in der Vergangenheit bei der Stromerzeugung ein Zentralisierungsprozess stattgefunden hat, der zu immer größeren Kraftwerken geführt hat, könnte in der Zukunft durch neue Technologien ein gegenläufiger Trend zur Dezentralisierung der Stromerzeugung begünstigt werden. Impulse in diese Richtung gehen derzeit schon von der Nutzung der Windenergie aus, wo Ende 2003 bundesweit etwa 15.000 Anlagen Strom in das Versorgungsnetz einspeisen, oder im kleineren Leistungsbereich von der noch größeren Anzahl netzgekoppelter Photovoltaikanlagen. Zur Dezentralisierung der Stromerzeugung trägt auch der Betrieb von zurzeit etwa 25.000 netzgekoppelten motorischen Blockheizkraftwerken in Deutschland bei.

Die Stromerzeugung aus Windkraftanlagen und Solaranlagen ist letztlich nicht steuerbar, sondern nur mehr oder weniger gut prognostizierbar. Hingegen können Anlagen der dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung prinzipiell aktiv in das Lastmanagement eines ausgedehnten Netzes einbezogen werden, weil ihre Stromerzeugung relativ gut planbar und steuerbar ist. Mit dem Schlagwort "Virtuelles Kraftwerk" wird dabei die zentrale Steuerung dezentral verteilter kleinerer Stromerzeuger bezeichnet. Die von diesen Anlagen abgegebene Gesamtleistung soll ähnlich wie bei einem realen Kraftwerk von einer zentralen Leitwarte gesteuert werden, um dadurch längerfristig den Bau von neuen zentralen Großkraftwerken teilweise zu ersetzen. Aktuell wird daher in Feldversuchen die steuerungstechnische Bündelung mehrerer Brennstoffzellen-Heizgeräte untersucht, die von Energieversorgungsunternehmen an verteilten Standorten betrieben werden. Bei einer Umsetzung dieses Konzeptes mit Anlagen unterschiedlicher Eigentümer sind über die technische Realisierung hinaus auch energiewirtschaftliche Modelle für die vertragliche Gestaltung der Beziehungen zwischen den beteiligten Parteien bei einem solchen virtuellen Kraftwerk erforderlich.

Aktuelle Bedeutung bekommt das Konzept eines virtuellen Kraftwerks durch den in den kommenden Jahren anstehenden Ersatz von Großkraftwerken. So ist nach Angaben des VDEW bis zum Jahr 2020 mit einem Bedarf an neu zu errichtender Kraftwerksleistung von 40.000 – 50.000 MW zu rechnen. Der Einsatz einer Vielzahl von dezentralen stationären Brennstoffzellen, um einen Teil dieser Kraftwerksleistung in Form "Virtueller Kraftwerke" zu errichten, würde eine sehr schnelle Markteinführung dieser Technologie erfordern, die voraussichtlich in diesem Zeithorizont nicht realisierbar ist. Als Alternative bietet es sich hier an, heute bereits verfügbare motorische Blockheizkraftwerke einzusetzen und diese Anlagen im Zuge einer Modernisierung nach und nach durch die zu einem späteren Zeitpunkt in größerer Stückzahl verfügbaren Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerke zu ersetzen. Wird hingegen die erforderliche Kraftwerksleistung ausschließlich in Form neuer Großkraftwerke realisiert, wäre ein späterer Einsatz von Brennstoffzellen wegen der längeren technisch-wirtschaftlichen Lebensdauer der Großkraftwerke erst zu einem weit späteren Zeitpunkt möglich. Zudem würde der für "virtuelle Kraftwerke" erforderliche Aufbau einer neuartigen Steuerungs-Infrastruktur verpasst.

## 5. Wasserstoff als Sekundärenergieträger

In der heutigen Energieversorgung hat elektrische Energie als Sekundärenergie aufgrund ihrer universalen Einsetzbarkeit eine zentrale Stellung. Die Stromerzeugung muss allerdings dem Zeitprofil des Bedarfs entsprechen, da elektrische Energie nicht gespeichert werden kann. Für eine zukünftige Energieversorgung mit einem hohen Anteil von zeitlich schwer plan- und steuerbaren regenerativen Energien wird deshalb der Einsatz von Wasserstoff als speicher- und transportfähiger Sekundärenergieträger diskutiert. Die Erzeugung von Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen, insbesondere aus Wind- und Solarenergie, würde sowohl einen Ausgleich zwischen dem Energieangebot und der jeweiligen Energienachfrage ermöglichen, als auch einen gegenüber elektrischer Energie verlustärmeren Energietransport über längere Distanzen. Bedeutung hätte Wasserstoff zudem als Sekundärenergieträger im Verkehrssektor, wenn die bisherigen Treibstoffe auf Mineralölbasis abgelöst werden sollen.

Bei der Nutzung des Sekundärenergieträgers Wasserstoff zur Wärme- oder Stromerzeugung entsteht als Reaktionsprodukt Wasser. Insbesondere bei der Verwendung von Brennstoffzellen ist daher eine lokal weitgehend emissionsfreie Stromerzeugung möglich, was sicherlich zur Faszination einer Wasserstoffwirtschaft erheblich beiträgt. Beim Vergleich verschiedener Energieversorgungssysteme müssen allerdings die Emissionen und Umweltauswirkungen der gesamten Prozesskette von der Primärenergiegewinnung bis zur Nutzenergieanwendung berücksichtigt werden. Bei den für Wasserstoff in Frage kommenden Prozessketten entsteht dabei häufig - ähnlich wie bei elektrischer Energie - der weit überwiegende Anteil der Emissionen bei der Bereitstellung des Energieträgers und nicht bei seiner Nutzung.

Wasserstoff lässt sich durch Wasserdampfpreformierung, partielle Oxidation oder Kohlevergasung aus fossilen Primärenergieträgern oder aus Biomasse erzeugen. Darüber hinaus fällt Wasserstoff in begrenztem Umfang in der chemischen Industrie als Nebenprodukt an. Wasserstoff kann aber auch unter Verwendung elektrischer Energie durch die Elektrolyse von Wasser erzeugt werden. Im Zusammenhang mit dem Einsatz von Wasserstoff als Sekundärenergieträger ist hierbei in der Zukunft insbesondere eine Wasserstofferzeugung auf der Basis von Solar- oder Windenergie von Interesse.

Betrachtet man die möglichen Prozessketten zur Wasserstofferzeugung näher, dann kann dieser Sekundärenergieträger nur bei einer Wasserstofferzeugung aus regenerativen Energiequellen als nachhaltig und umweltfreundlich bewertet werden. Wird der Wasserstoff hingegen aus fossilen Energieträgern erzeugt, entstehen durch die zusätzlichen Prozessschritte höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen als bei einer direkten Verwendung des fossilen Brennstoffs in konventionellen Systemen, mit denen die gleichen Energiedienstleistungen bereitgestellt werden wie mit Wasserstoff. Auch die elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff auf der Basis der derzeitigen Stromerzeugung in Deutschland ist wegen der geringen Primärenergieausnutzung weder energetisch noch ökonomisch sinnvoll.

## 5.1 Heutige Marktpräsenz

Gegenwärtig wird Wasserstoff großtechnisch als Chemierohstoff eingesetzt, hat aber als Energieträger quantitativ keine Bedeutung. Der heute in Deutschland eingesetzte Wasserstoff entsteht entweder als Nebenprodukt bei chemischen Prozessen, oder er wird durch Dampfreformierung bzw. partielle Oxidation aus Kohlenwasserstoffen erzeugt. Die Menge des in Deutschland jährlich erzeugten Wasserstoffs wird mit ca. 20 Mrd. Nm<sup>3</sup> angegeben. Davon stehen nach Angaben des Deutschen Wasserstoff-Verbandes etwa 1 Mrd. Nm<sup>3</sup> als Nebenprodukt aus der chemischen Produktion für eine energetische Nutzung zur Verfügung. Diese Menge würde z.B. ausreichen, um etwa 1 % des deutschen PKW-Bestandes mit Kraftstoff zu versorgen.

Der Einsatz von Wasserstoff im Verbund mit regenerativen Energiequellen wurde bislang nur in Pilotprojekten untersucht. So wurde zum Beispiel bereits im vergangenen Jahrzehnt in Neuenburg vor dem Wald in Bayern die Erzeugung von Wasserstoff durch Strom aus einer 370 kW Photovoltaikanlage erprobt. Aktuell wird in Norwegen die Versorgung einiger Haushalte auf einer kleinen Insel durch Windkraftanlagen untersucht, bei der Wasserstoff zur Energiespeicherung eingesetzt wird. In Zeiten mit einem Stromüberschuss wird der Wasserstoff dabei durch die Elektrolyse von Wasser erzeugt und in einem Drucktank gespeichert. In Zeiten, in denen die Stromerzeugung aus Windkraft nicht ausreicht, kann er mit Hilfe eines wasserstoffbetriebenen Generators sowie einer Brennstoffzelle wieder verstromt werden.

Pläne zum Einsatz von Wasserstoff als Sekundärenergieträger in größerem Umfang gibt es zurzeit in Island, das mittelfristig die gesamte Treibstoffversorgung für den Verkehrssektor auf Wasserstoff umstellen will. Zur Erzeugung des Wasserstoffs sollen die dort reichlich verfügbaren regenerativen Energiequellen Wasserkraft und Geothermie eingesetzt werden.

## 5.2 Perspektiven einer Wasserstoffwirtschaft

Als Sekundärenergieträger ist Wasserstoff zwar technisch universell einsetzbar und er besitzt aufgrund seiner schadstoffarmen Umwandlung insbesondere in Brennstoffzellen am Ort der Nutzung lokale Emissionsvorteile. Wieweit er auch global vorteilhafte Umweltauswirkungen bietet, hängt dagegen vor allem von der Art der Wasserstofferzeugung ab.

Eine Nutzung von Wasserstoff als Sekundärenergieträger in großem Umfang ist unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes nur dann sinnvoll, wenn der Wasserstoff mit Hilfe CO<sub>2</sub>-freier Primärenergiequellen erzeugt wird. Beim derzeitigen Anteil regenerativer Energiequellen an der Energieversorgung in Deutschland ist es allerdings sowohl unter dem Gesichtspunkt der Emissionsminderung als auch wirtschaftlich sehr viel günstiger, regenerativ erzeugten Strom zur Substitution einer Elektrizitätserzeugung in fossil befeuerten Kondensationskraftwerken einzusetzen als zur Erzeugung des Sekundärenergieträgers Wasserstoff. Zudem wird Wasserstoff, der mit Hilfe von Strom aus regenerativen Energiequellen erzeugt wird, auf absehbare

Zeit weit teurer sein als Wasserstoff, der aus fossilen Primärenergieträgern gewonnen wird.

Aufgrund des bislang begrenzten Anteils regenerativer Energiequellen an der Stromerzeugung ist davon auszugehen, dass Wasserstoff in Deutschland zumindest für eine lange Übergangszeit aus fossilen Energien erzeugt werden müsste. Beim Betrieb stationärer Brennstoffzellen könnte dies durch eine dezentrale Reformierung von Erdgas geschehen, das über das vorhandene Erdgasnetz bereitgestellt werden kann.

In welchem Umfang sich Wasserstoff energiewirtschaftlich als Sekundärenergieträger durchsetzen kann, hängt auch von der Preisentwicklung alternativer speicherbarer Energieträger aus regenerativen Quellen ab. So ist z.B. im Wärmemarkt zu erwarten, dass aus Biomasse-Rohstoffen gewonnener Wasserstoff aufgrund der zusätzlichen Verarbeitungsprozesse nicht mit der direkten Verwendung von lagerfähiger Biomasse als Energieträger konkurrieren kann. Auch im Verkehrssektor müsste Wasserstoff gegen vergleichsweise einfach zu gewinnende und einfacher handhabbare flüssige Kraftstoffe aus wie z.B. Pflanzenöl, RME (Biodiesel) oder Methanol konkurrieren. Wenn - wie zu erwarten - wirtschaftliche und nicht überwiegend technische Kriterien für den Anteil von Sekundärenergieträgern an der zukünftigen Versorgungsstruktur ausschlaggebend sein werden, ist zu erwarten, dass der Anteil von Wasserstoff auf absehbare Zeit sehr begrenzt sein wird.

## **6. Zusammenfassung**

Die Kernaussagen des vorliegenden Themenpapiers zu den Bereichen Regenerative Energiequellen, Brennstoffzellen und Wasserstoff werden in den folgenden Absätzen noch einmal zusammenfassend dargestellt.

### **Regenerative Energiequellen**

- ◆ Wasserkraft, Windenergie und biogene Brennstoffe besitzen bereits heute einen zwar noch geringen, aber nennenswerten und rasch wachsenden Anteil an der Energieversorgung in Deutschland. Ihre Nutzung ist in Teilbereichen bereits heute wirtschaftlich gegenüber fossilen Energieträgern, oder die jeweiligen Technologien nähern sich der Wirtschaftlichkeitsschwelle.
- ◆ Die Erzeugung von Strom aus regenerativen Energiequellen ist über weite Strecken auf energiepolitische Rahmenbedingungen angewiesen, wie sie das Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (EEG) bietet, und wäre ohne eine solche Regelung heute nicht wirtschaftlich darstellbar.
- ◆ Sollen regenerative Energien in einer künftigen nachhaltigen Energieversorgung eine wichtige Rolle übernehmen, müssen sie zügig weiter ausgebaut werden.
- ◆ Eine Notwendigkeit, elektrische Energie aus regenerativen Quellen in großem Umfang zum Zweck der Speicherung in den



Sekundärenergieträger Wasserstoff umzuwandeln und die Endenergienutzung auf Systeme mit Wasserstoffnutzung umzustellen, ergibt sich auch bei einem sehr zügigen Ausbau der Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen erst zu einem deutlich späteren Zeitpunkt.

### **Brennstoffzellen**

- ◆ Brennstoffzellen befinden sich heute in einem fortgeschrittenen technischen Entwicklungsstand und werden in Feldversuchen im Bereich portabler, mobiler und stationärer Anwendungen getestet. Die weitere technische Entwicklung muß insbesondere das Ziel einer Steigerung der Wirkungsgrade und einer Erhöhung der technischen Lebensdauer verfolgen.
- ◆ Die heute eingesetzten Vorserienanlagen sind aufgrund ihrer noch sehr hohen spezifischen Kosten nicht konkurrenzfähig zu den am Markt verfügbaren konventionellen KWK-Technologien. Neben der technischen Weiterentwicklung muss daher auch eine deutliche Senkung der Anlagenkosten erreicht werden.

### **Wasserstoff**

- ◆ In der heutigen Energiewirtschaft spielt Wasserstoff als Sekundärenergieträger noch keine Rolle. Die derzeitige Energieversorgung in Deutschland beruht einschließlich der Stromerzeugung zu großen Teilen auf speicherbaren Energieträgern, so dass die Erzeugung eines speicherfähigen zusätzlichen Sekundärenergieträgers zurzeit nicht vordringlich ist.
- ◆ Die Umweltauswirkungen bei einer Wasserstoffnutzung werden weitestgehend durch die vorgelagerte Prozesskette bestimmt. Sein Einsatz in großem Maßstab daher nur dann vorteilhaft, wenn der Wasserstoff mit Hilfe regenerativer Energien erzeugt wird.
- ◆ Kurzfristig ist die Schaffung einer flächendeckenden Wasserstoffversorgung sowohl aufgrund der Investitions- und Vorhaltekosten für ein solches zunächst nicht auslastbares Versorgungsnetz als auch wegen des noch zu geringen Anteils regenerativer Energiequellen an der Energieversorgung nicht sinnvoll. Stattdessen können die verfügbaren regenerativen Energien vor allem in der Stromversorgung mit geringeren Verlusten direkt und ohne Speicherung eingesetzt werden und so einen größeren Beitrag zur Verringerung der Umweltbelastung durch die Energieversorgung leisten.
- ◆ Kurz- und mittelfristig dürfte daher zur Weiterentwicklung der Technologie ein Einsatz von Wasserstoff als Sekundärenergieträger zunächst nur in Form von Inselösungen an solchen Standorten interessant sein, an denen Wasserstoff als Nebenprodukt aus der Grundstoffchemie verfügbar ist, sowie in Nischenmärkten, wo die geringen lokalen Umweltauswirkungen von überragender Bedeutung sind.

## 7. Informationsquellen

Der überwiegende Teil der diesem Themenpapier zugrunde liegenden Informationen steht online zur Verfügung. In der folgenden Aufstellung sind Links sowohl zu wichtigen Organisationen zusammengestellt, als auch Links zu wichtigen Einzeldokumenten die herangezogen wurden. Angesichts der Vielzahl verfügbarer Informationen kann diese Zusammenstellung aber bei weitem nicht umfassend sein.

### Energiebilanz

- ◆ Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit: Energiedaten 2003  
Download unter: [www.bmwi.de](http://www.bmwi.de)
- ◆ Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen  
[www.ag-energiebilanzen.de](http://www.ag-energiebilanzen.de)

### Regenerative Energiequellen

- ◆ Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung  
[www.wirtschaft.hessen.de/Energieland/](http://www.wirtschaft.hessen.de/Energieland/)
- ◆ Bundesministerium für Umwelt  
[www.erneuerbare-Energien.de](http://www.erneuerbare-Energien.de), [www.bmu.de](http://www.bmu.de)
- ◆ Broschüre:  
Erneuerbare Energien in Zahlen  
[www.bmu.de/de/1024/js/download/b\\_erneuerbare\\_energien\\_zahlen](http://www.bmu.de/de/1024/js/download/b_erneuerbare_energien_zahlen)
- ◆ Richtlinie 2001/77/EG zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt  
[http://europa.eu.int/eur-lex/pri/de/oj/dat/2001/l\\_283/l\\_28320011027de00330040.pdf](http://europa.eu.int/eur-lex/pri/de/oj/dat/2001/l_283/l_28320011027de00330040.pdf)
- ◆ Bundesverband Deutscher Wasserkraftwerke (BDW)  
[www.wasserkraft.org](http://www.wasserkraft.org)
- ◆ Bundesverband Windenergie e.V. (BWE)  
[www.wind-energie.de](http://www.wind-energie.de)
- ◆ Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS)  
[www.dgs-solar.org](http://www.dgs-solar.org)
- ◆ Forschungsverbund Sonnenenergie (FVS)  
[www.fv-sonnenenergie.de](http://www.fv-sonnenenergie.de)
- ◆ Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR)  
[www.iwr.de](http://www.iwr.de)
- ◆ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)  
[www.fnr.de](http://www.fnr.de)
- ◆ Stoffstromanalysen zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse  
[www.oeko.de/service/bio](http://www.oeko.de/service/bio)

- ◆ Sachstandsbericht:  
Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland  
[www.tab.fzk.de/de/projekt/zusammenfassung/ab84.pdf](http://www.tab.fzk.de/de/projekt/zusammenfassung/ab84.pdf)

## Brennstoffzellen

- ◆ Brennstoffzellenforum Hessen  
Kompetenzatlas Brennstoffzelle Hessen  
Wasserstoff- und Brennstoffzelleninitiative Hessen e.V.  
[www.brennstoffzelle-hessen.de](http://www.brennstoffzelle-hessen.de)
- ◆ Initiative Brennstoffzelle  
[www.initiative-brennstoffzelle.de](http://www.initiative-brennstoffzelle.de)
- ◆ Forschungszentrum Jülich,  
Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik (IWV)  
[www.fuelcells.de](http://www.fuelcells.de)
- ◆ Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e.V.  
[www.wbzu.de](http://www.wbzu.de)
- ◆ Energieportal 24  
[www.energieportal24.de](http://www.energieportal24.de)
- ◆ Fuelcelltoday  
[www.fuelcelltoday.com](http://www.fuelcelltoday.com)
- ◆ Studie:  
Einsatz stationärer Brennstoffzellentechnologie als Beitrag zum  
Klimaschutzprogramm der Bundesregierung  
[http://www.bkww.de/download/studien/Gutachten\\_BA-Projekt\\_IZES\\_Maerz2004.pdf](http://www.bkww.de/download/studien/Gutachten_BA-Projekt_IZES_Maerz2004.pdf)

## Wasserstoff

- ◆ Deutscher Wasserstoff und Brennstoffzellenverband (DWV)  
[www.dwv-info.de](http://www.dwv-info.de)
- ◆ Wasserstoff und Brennstoffzellen Informationssystem  
[www.hyweb.de](http://www.hyweb.de)
- ◆ Wuppertal-Institut  
[www.wupperinst.org](http://www.wupperinst.org)
- ◆ Energieportal 24  
[www.energieportal24.de](http://www.energieportal24.de)
- ◆ Studie:  
Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie  
als wirtschaftliche Chance für Hamburg  
[www.lbst.de/h2hamburg/](http://www.lbst.de/h2hamburg/)
- ◆ Studie:  
Eine Vollständige regenerative Energieversorgung mit Wasserstoff –  
Illusion oder realistische Perspektive?  
<http://www2.dlr.de/TT/system/publications/epolitik>

# hessenENERGIE

hessenENERGIE  
Gesellschaft für rationelle  
Energienutzung mbH  
Mainzer Straße 98-102  
D-65189 Wiesbaden  
Telefon: 06 11 / 7 46 23 - 0  
Telefax: 06 11 / 71 82 24  
[kontakt@hessenENERGIE.de](mailto:kontakt@hessenENERGIE.de)  
<http://www.hessenENERGIE.de>