ASUE
Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.

Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung

Funktionsweise, Entwicklung und Marktübersicht

www.asue.de

Inhalt

1 | Einführung **2**

2 | Grundlagen **4**
Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle 6
Die Brennstoffzellenanlage 8
Komponenten 9
Von der Zelle über den Stapel bis zur Anlage 10

3 | Brennstoffzellensysteme im Überblick **11**
Polymermembran Brennstoffzelle – PEMFC 12
Oxidkeramische Brennstoffzelle – SOFC 14

4 | Vorteile der Brennstoffzellentechnik **16**
Wirkungsgrad 16
Teillastverhalten 17
Emissionen und Umwelt 17

5 | Perspektiven für Brennstoffzellen im Energiemarkt **18**
Interview mit Dr. Klaus Bonhoff 18
Übersicht verfügbarer stationärer BZ-Geräte 20

6 | Fördermöglichkeiten **22**

Informationsmaterial **23**

Abbildungsverzeichnis (Seite)

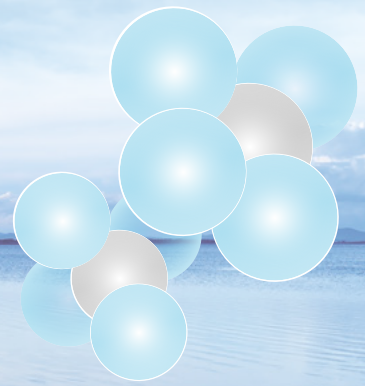
4 Umwandlungsstufen bei der Strom- und Wärmeerzeugung
5 Übersichtschema Mini-/Mikro-KWK
6 Funktionsprinzip Brennstoffzelle
8 Schematische Darstellung einer Brennstoffzellenanlage
12 Schematische Darstellung einer PEMFC Brennstoffzelle
14 Schematische Darstellung einer SOFC Brennstoffzelle (Planar und Tubular)

Tabellenverzeichnis (Seite)

5 Unterscheidung der Basistechnologien
11 Gesamtüberblick einer PEMFC / SOFC Brennstoffzellenanlage
20 Produktübersicht über stationäre Brennstoffsellen-Geräte
22 KWK-Zuschuss, Förderbeträge

1 Einführung

Seit der Erkenntnis des Zusammenhangs zwischen CO_2-Emissionen und Klimawandel in den achtziger Jahren wurde der Einsatz von effizienten, klimafreundlichen, umweltschonenden Energieerzeugern eine signifikante Rolle zugeordnet. Insbesondere der Brennstoffzellentechnologie wird auf dem Gebiet der effizienten Energiebereitstellung ein großes Potential vorhergesagt. Den ersten funktionsfähigen Brennstoffzellen-Prototypen konstruierte der Jurist und Physiker Sir William Robert Grove im Jahre 1839. Grove konnte die Umkehrung der Elektrolyse nachweisen und hatte somit das Prinzip der kalten Verbrennung entdeckt. Damals wurden allerdings nur sehr geringe Spannungen gemessen und der Stromfluss war zu niedrig, als dass sich die Brennstoffzelle gegen die Erfindungen des elektrischen Generators zur Energiebereitstellung in der damaligen Zeit hätte durchsetzen können. Erst in der Zeit des Kalten Krieges wurde die Brennstoffzelle für das Militär und die Raum-



fahrt wieder attraktiv. So setzte die amerikanische Raumfahrt seit den 1960er-Jahren Brennstoffzellen in ihren Raumschiffen zur autarken elektrischen Energiegewinnung ein. Das derzeit modernste U-Boot der deutschen Marine setzt ebenfalls auf Brennstoffzellentechnologie, denn durch den Einsatz einer Brennstoffzelle ist das U-Boot nahezu geräuschlos und abgasfrei.

Trotz der Verwendung in der Raumfahrt oder beim Militär rückte die Brennstoffzelle erst in den 1990er-Jahren wieder in den Mittelpunkt der Forschungsaktivitäten zur Bereitstellung von Energie für den kommerziellen Gebrauch. Die immer größer werdende Diskussion um eine nachhaltige Entwicklung und die Debatte über die Endlichkeit der fossilen Energieträger seitens der Politik und der Öffentlichkeit sorgen dafür, dass das Interesse an der Brennstoffzellentechnologie wieder steigt.

In Deutschland wurden erhebliche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Bezug auf die Brennstoffzelle betrieben. Hier ist insbesondere auf deutscher Ebene das „Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP)“ zu nennen. Das wachsende Energie- und Umweltbewusstsein gab der Technologie neuen Auftrieb. Dennoch ist Japan zurzeit im internationalen Vergleich das führende Land in der Brennstoffzellentechnologie. Seit dem Jahre 2009 kann der japanische Endverbraucher über seinen Gasversorger Brennstoffzellen-Heizgeräte für die häusliche Energieversorgung erwerben. Das Ziel der japanischen Regierung und der beteiligten Unternehmen ist es, 1,4 Millionen Geräte bis zum Jahr 2020 und 5,3 Millionen Geräte bis zum Jahr 2030 zu installieren.

Da der Brennstoffzellentechnik ein großes Potenzial sowohl im Automobilbereich als auch in der stationären Strom- und Wärmeerzeugung zugestanden wird und sich bereits mehrere Brennstoffzellenhersteller mit ihren Geräten am Markt etabliert haben, soll diese Broschüre einen ersten Einblick in die Technik und die Funktionsweise der verschiedenen Brennstoffzellensysteme geben.

Den Schwerpunkt der Broschüre bildet die Brennstoffzellentechnik für den stationären häuslichen Bereich. Der Leser wird über den Stand der Technik und die Anwendungsmöglichkeiten informiert, da diese Technologie für den häuslichen Bereich bei den Endkunden noch eine neue Technologie darstellt. Darüber hinaus wird ein Marktüberblick über die Brennstoffzellengeräte, die am deutschen Markt erhältlich sind, gegeben.

2 Grundlagen

Eine Brennstoffzelle für die stationäre Anwendung in einem Wohn- oder Gewerbegebäude erzeugt Strom und Wärme in einem Gerät, damit gehört die Brennstoffzelle zu den **Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen**.

Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen – kurz auch KWK-Anlagen genannt – erzeugen in einem gekoppelten Prozess unter Zuführung eines Brennstoffs (zumeist Erdgas) thermische und elektrische Energie. Bei KWK-Anlagen handelt es sich um eine attraktive Möglichkeit, ein dauerhaft umweltgerechtes und flexibles Energiesystem zu gewährleisten und einen Teil des Energiebedarfs sicher und hocheffizient bereitzustellen. Es gibt KWK-Anlagen in sehr großen Leistungsklassen von mehreren Megawatt bis hin zu sehr kleinen Anlagen von unter 1 Kilowatt. Dezentrale KWK-Anlagen werden auch Blockheizkraftwerke genannt. Gegenüber der Stromerzeugung in zentralen Kraftwerken und der Wärmeerzeugung, die in der Regel an das Wohnobjekt gebunden ist, findet eine über 30 % bessere Ausnutzung des eingesetzten Brennstoffes statt.

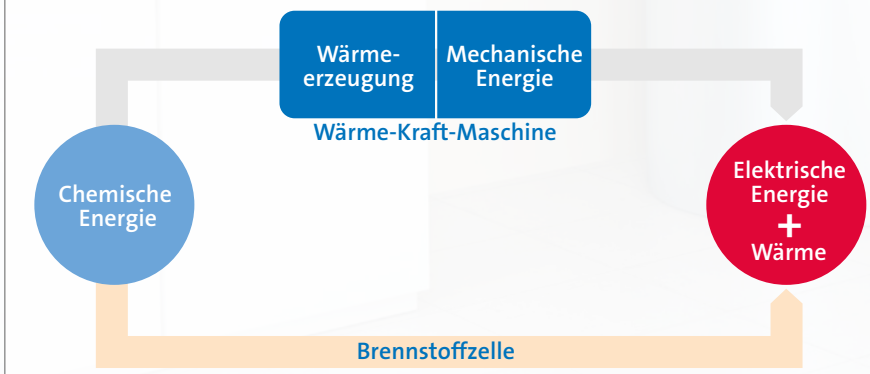
Bei der Umwandlung von chemischer Energie (z. B. Erdgas) in elektrische Energie entsteht immer auch Wärme. Durch die gekoppelte Erzeugung von Wärme und Strom wird der eingesetzte Brennstoff effizient genutzt. Für den kleinen Leistungsbereich, der typisch für Wohngebäude ist, gibt es derzeit am Markt verschiedene KWK-Technologien, die für den Endkunden verfügbar sind. Dabei lassen sich bereits heute auch Ein- und Zweifamilienhäuser mit geeigneten Anlagen ausrüsten.

Die am Markt derzeit häufigsten Technologien im kleinen Leistungsbereich stellen die motorischen Konzepte dar. Es handelt sich dabei um BHKW, die mit einem Verbrennungsmotor betrieben werden. Dies ist entweder ein Otto-Motor (interne Verbrennung) oder ein Stirling-Motor (externe Verbrennung).

Im Gegensatz zu den eben beschriebenen KWK-Anlagen weist die Brennstoffzelle aufgrund ihrer direkten elektrochemischen Umwandlung weniger Umwandlungsstufen bei der Strom- und Wärmeerzeugung auf (s. Abb. unten).

Die bisher am Markt erhältlichen Brennstoffzellen-Geräte sind vor allem für Ein- und Zweifamilienhäuser konzipiert. Für größere Gebäude, Mehrfamilienhäuser, Gewerbe und Quartiere sind entsprechende Geräte bei den Herstellern in Vorbereitung. In diesen Anwendungsfällen sind aber motorische Blockheizkraftwerke hervorragend geeignet, so dass für alle Größenordnungen entsprechende KWK-Lösungen verfügbar sind.

Umwandlungsstufen bei der Strom- und Wärmeerzeugung



Grundlegend lassen sich bei BHKW-Anlagen folgende zwei Basistechnologien unterscheiden:

Verbrennungsanlagen
Interne Verbrennungsmotoren (z. B. Otto-Motor)
Externe Verbrennungsmotoren (z. B. Stirling)
Mikrogasturbinen
Dampfmaschinen

Brennstoffzellen

Brennstoffzelle	Elektrolyt	Arbeitstemperatur	Reaktionsgase
AFC* Alkalische	Alkalilauge	70 – 100 °C	$H_2 + O_2$ (hochrein)
PEMFC Membran	Polymembran	50 – 100 °C	H_2 (reformiert aus Erdgas) Luftsauerstoff
PAFC* Phosphorsäure	Stabilisierte Phosphorsäure	160 – 210 °C	H_2 (reformiert aus Erdgas) Luftsauerstoff
MCFC* Schmelzkarbonat	Schmelz-karbonatlösung	650 °C	H_2 (interne Reformierung von Erdgas) Luftsauerstoff
SOFC Festoxid	Festkeramischer Elektrolyt	800 – 1.000 °C	H_2 (interne Reformierung von Erdgas oder LPG) Luftsauerstoff

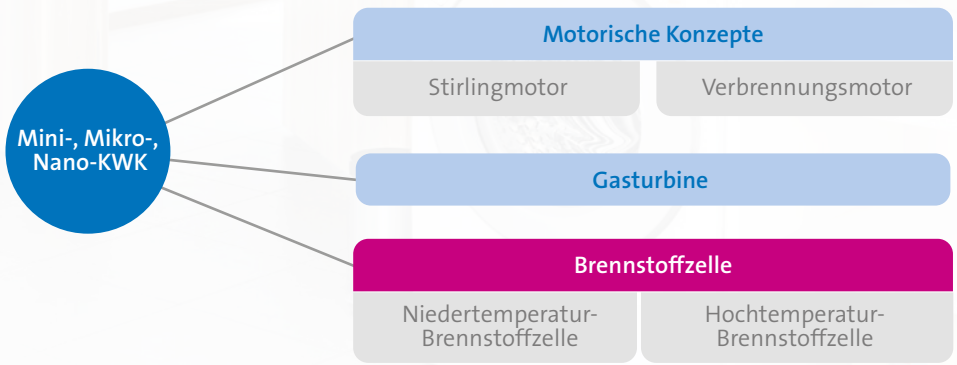
Vertiefende Informationen zum Thema Kraft-Wärme-Kopplung bietet die ASUE-Broschüre „BHKW- Grundlagen“.

asue.de
> BHKW
> broschueren

Vertiefende Informationen zum Thema KWK in Ein- und Zweifamilienhäusern bietet die ASUE-Broschüre „Strom erzeugende Heizung“.

asue.de
> BHKW
> broschueren

Übersichtsschema Mini- / Mikro-KWK



* nicht für den Einfamilienhausbereich

Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle (vereinfachte Darstellung am Beispiel der PEMFC-Brennstoffzelle)

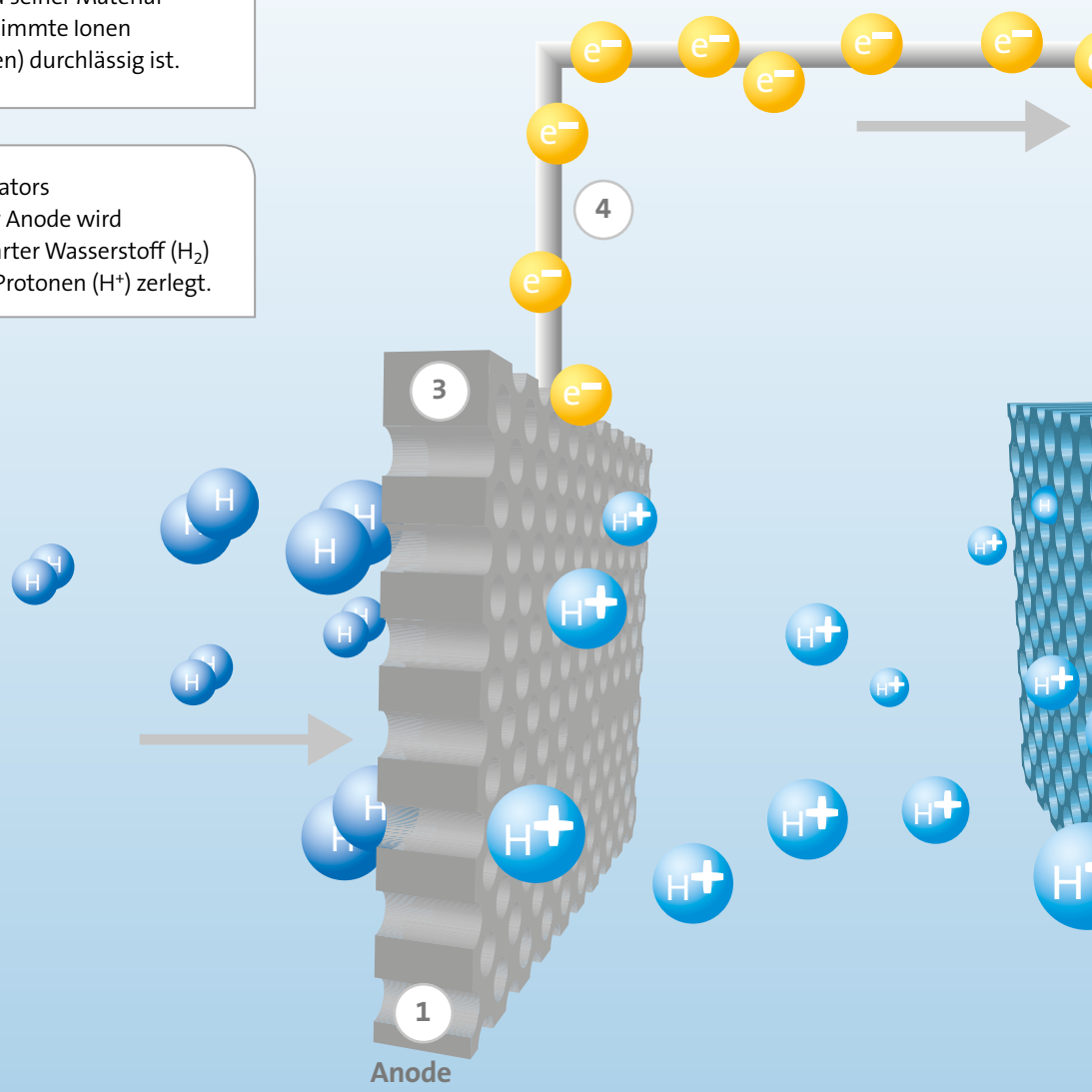
Das elektrochemische Funktionsprinzip der reinen Brennstoffzelle (ohne Peripherie) basiert im Wesentlichen auf der Umwandlung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser. Es ist im Grunde die Umkehrung des Elektrolyse-Prozesses.

1 Die einzelne Brennstoffzelle besteht aus zwei Elektroden: der Anode und der Kathode

2 Die Elektronen werden von einem Elektrolyt getrennt, der aufgrund seiner Materialeigenschaften für bestimmte Ionen (in diesem Fall H+-Ionen) durchlässig ist.

3 Mit Hilfe eines Katalysators auf der Oberfläche der Anode wird kontinuierlich zugeführter Wasserstoff (H_2) in Elektronen (e^-) und Protonen (H^+) zerlegt.

4 Die Protonen durchdringen die Elektrolytmembrane und wandern weiter zur Kathode. Die Elektronen können den Protonen nicht folgen. Auf der Anodenseite entsteht ein Elektronenüberschuss. Spannung entsteht.

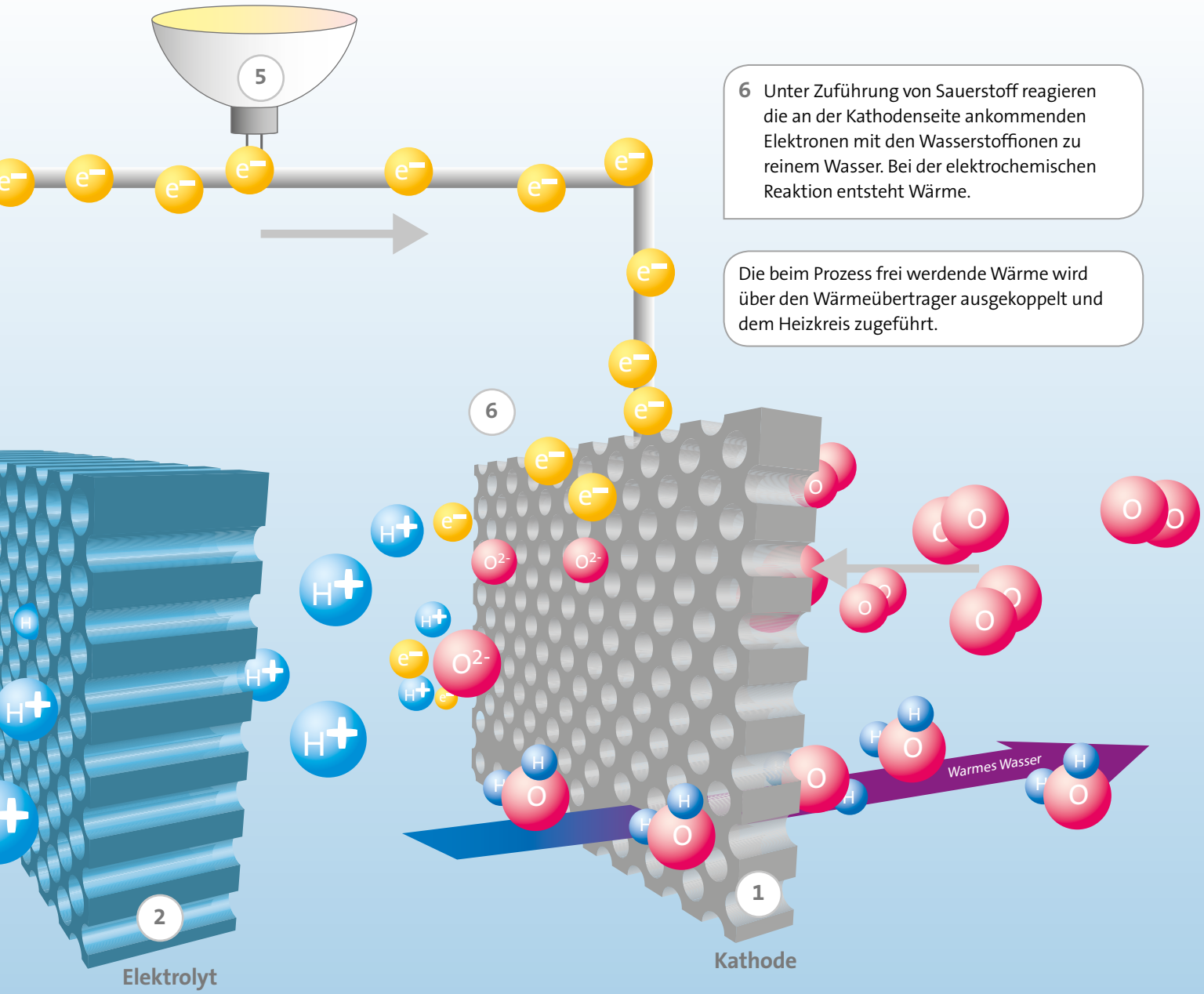


Viele solcher einzelnen Brennstoffzellen werden zu einem Stapel (engl. Stack) aufgebaut. Dadurch addiert sich, wie in einem Batteriesatz, die Spannung. Ein Wechselrichter wandelt den erzeugten Gleichstrom in 230 V/50 Hz-Wechselstrom um.

5 Durch verbinden der Anode und der Kathode, mittels elektrischem Leiter, strömen die Elektronen zur Kathode und erzeugen Gleichstrom.

6 Unter Zuführung von Sauerstoff reagieren die an der Kathodenseite ankommenden Elektronen mit den Wasserstoffionen zu reinem Wasser. Bei der elektrochemischen Reaktion entsteht Wärme.

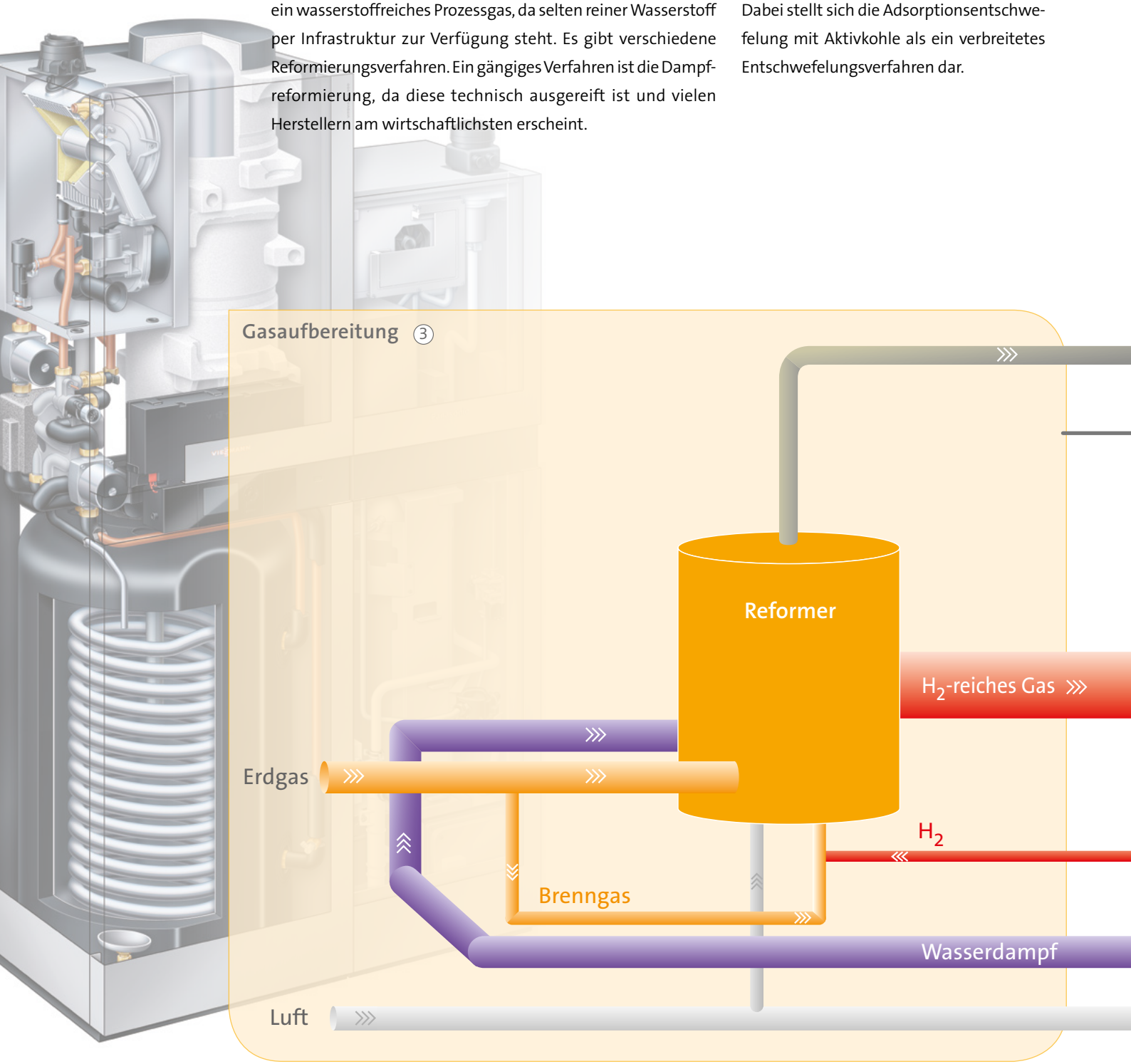
Die beim Prozess frei werdende Wärme wird über den Wärmeübertrager ausgekoppelt und dem Heizkreis zugeführt.



Die Brennstoffzellenanlage

Wird von der Brennstoffzelle im allgemeinen Sprachgebrauch geredet, so ist zumeist die gesamte Anlage einschließlich der dazugehörigen Peripherie gemeint. In der Abbildung unten wird der schematische Aufbau eines Brennstoffzellenheizgerätes dargestellt. Ein Reformer wandelt das eingesetzte Erdgas in ein wasserstoffreiches Prozessgas, da selten reiner Wasserstoff per Infrastruktur zur Verfügung steht. Es gibt verschiedene Reformierungsverfahren. Ein gängiges Verfahren ist die Dampfreformierung, da diese technisch ausgereift ist und vielen Herstellern am wirtschaftlichsten erscheint.

Bevor jedoch mit der Reformierung begonnen werden kann, müssen die Schwefelverbindungen aus den Odorierungsmitteln*, die im deutschen Erdgas aus Sicherheitsgründen enthalten sind, entfernt werden. Dabei stellt sich die Adsorptionsentschwefelung mit Aktivkohle als ein verbreitetes Entschwefelungsverfahren dar.

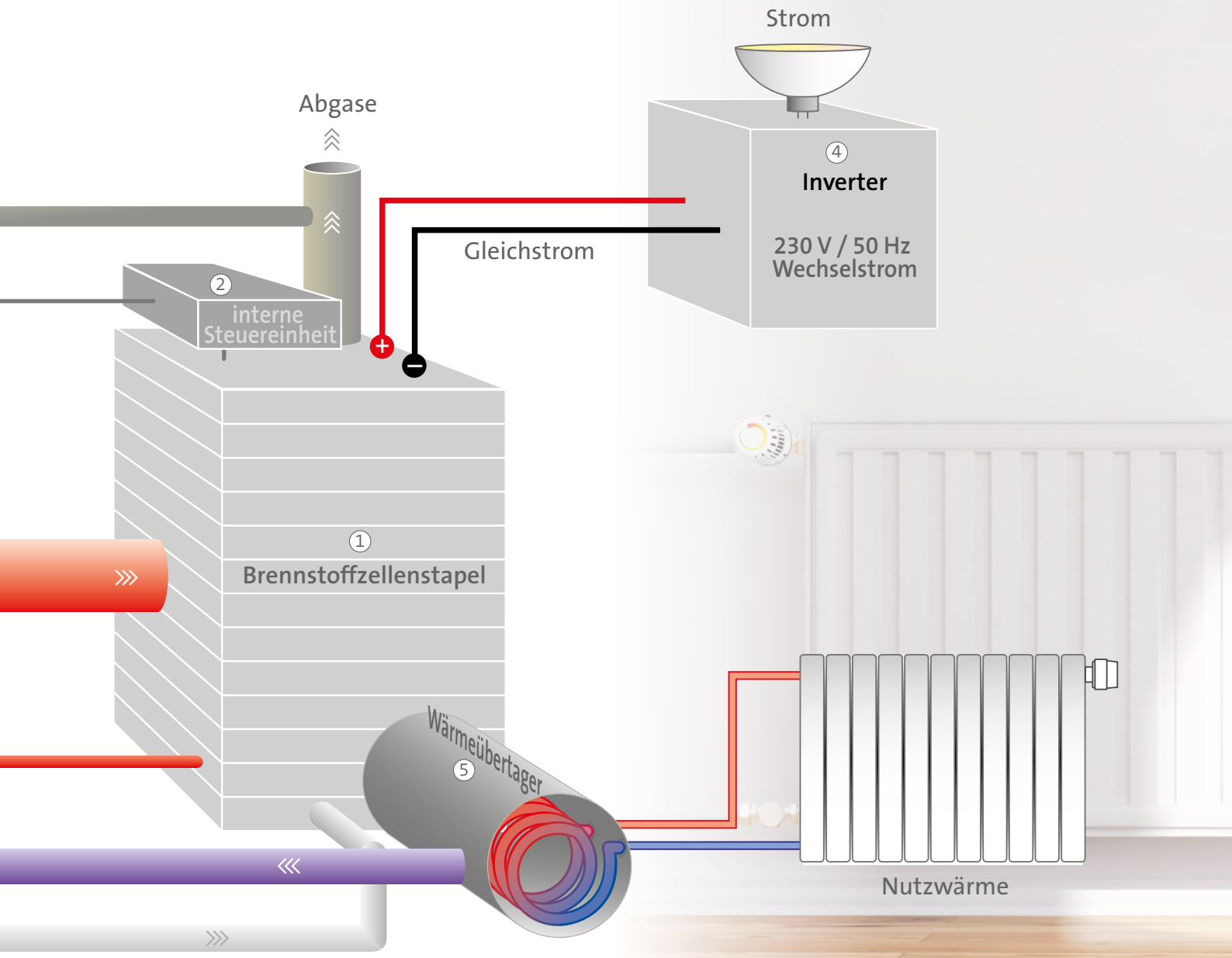


Komponenten

Ein Brennstoffzellenheizgerät besteht aus mehreren Komponenten, die zusammen das Gesamtsystem bilden. Die wichtigsten Komponenten eines stationären Brennstoffzellenheizgerätes sind:

① Brennstoffzellenstapel (engl. Stack)
② Interne Steuereinheit
③ Gasaufbereitung
④ Wechselrichter (Inverter)
⑤ Wärmeübertrager

* Odorierungsmittel sind Stoffe, die Gasen oder Flüssigkeiten zur Erzielung eines spezifischen Geruchs beigemengt werden. Die Einbringung des Odorierungsmittels in das Erdgasnetz erfolgt mittels Odorierungsanlagen und hilft, Gasleckagen schnell zu ermitteln.



Von der Zelle über den Stapel bis zur Anlage

Die theoretische, elektrische Gleichspannung – beim Betrieb mit reinem Wasserstoff – einer einzelnen Brennstoffzelle liegt bei ca. 1,24 V (bei 25 °C). Allerdings werden diese Spannungen in der Praxis nicht erreicht, hier liegen die Werte zwischen 0,8 bis 0,9 V. Ursache dafür sind beispielsweise ohmsche Widerstände, Polarisation und Legierungen am Elektrolyt. Die Zellspannung ist auch abhängig von der Temperatur, dem Druck und der Gaszusammensetzung. Um eine höhere Spannung zu erreichen, müssen daher einzelne Zellen zu einem Brennstoffzellenstapel verbunden werden. Das heißt, einzelne Brennstoffzellen werden jeweils übereinander gestapelt und die zuvor beschriebene chemische Reaktion läuft in jeder einzelnen Zelle ab, demzufolge werden höhere Anlagenleistungen erreicht. Die Zusammenschaltung erfolgt überwiegend in Sandwich-Bauweise, d. h. die einzelnen Zellen werden aufeinander gestapelt und in Reihe geschaltet. Zwischen den einzelnen Zellen werden sogenannte bipolare Platten eingefügt, die sowohl die Zufuhr der Reaktanden (Luft und Wasserstoff) zu den Elektroden als auch die Stromableitung in der Stapelachse gewährleisten.

Die Brennstoffzelle für die stationäre Energieversorgung weist wesentliche Vorteile gegenüber konventionellen KWK-Anlagen auf. Aufgrund der direkten Umwandlung des Brennstoffs in elektrische und thermische Energie lassen sich sehr viel höhere Wirkungsgrade als bei konventionellen KWK-Anlagen erzielen. Durch das gute Teillastverhalten lassen sich Brennstoffzellen gut modulieren und somit dem jeweiligen Energiebedarf des Hauses anpassen. Aufgrund des geräuscharmen Betriebs entstehen im Gegensatz zu konventionellen KWK-Anlagen kaum Lärmemissionen, und auch dem Klima wird geholfen: Bei Verwendung von reinem Wasserstoff als Brennstoff lässt sich der Ausstoß klimawirksamer Gase auf null reduzieren (Weitere Informationen in Kapitel 4).

Die einzelnen Brennstoffzellen, gebündelt im Brennstoffzellenstapel, benötigen keine Wartung, da sie auf dem elektrochemischen Funktionsprinzip basieren und somit keine beweglichen Teile aufweisen. Wartungsaufwand verursachen die Peripherie-Komponenten. Hier müssen z. B. in regelmäßigen Abständen die Filterkartuschen sowie die Entschwefelungspatronen ausgetauscht werden.

3 Brennstoffzellensysteme im Überblick / Bauarten

Nachdem die Entwicklung, die Einsatzmöglichkeiten und die Funktionsweise der Brennstoffzelle kurz skizziert wurden, soll im Folgenden näher auf die derzeit zwei aussichtsreichsten Technologien der stationären Brennstoffzellenheizgeräte eingegangen werden.

Im Wesentlichen ist die Art des Elektrolyten für die Benennung der Brennstoffzelle ausschlaggebend. Des Weiteren werden Brennstoffzellen in zwei Gruppen nach ihrem Temperaturniveau klassifiziert, zum einen in die Niedertemperaturbrennstoffzellen und zum anderen in die Hochtemperaturbrennstoffzellen.

Bei den zwei für die Hausenergieversorgung gängigsten Typen handelt es sich um die PEMFC (engl. Proton Exchange Membrane Fuel Cell) und die SOFC (engl. Solid Oxide Fuel Cell) Brennstoffzellen.

Darüber hinaus gibt es noch eine Vielzahl anderer Brennstoffzellentypen wie z. B. die AFC (alkalische Brennstoffzelle) und die PAFC (Phosphorsäure Brennstoffzelle), die hier aber nicht näher betrachtet werden sollen, da sie für die stationäre Anwendung unter 10 kW elektrisch keine signifikante Rolle spielen.

Für die stationäre Brennstoffzellentechnik bis 10 kW elektrisch sind die PEMFC und SOFC am weitesten entwickelt. Die untenstehende Tabelle zeigt die wesentlichen Unterschiede zwischen der PEMFC- und der SOFC-Technologie. Diese Unterschiede sind gekennzeichnet vor allem durch die Ausbildung des Elektrolyten und die Höhe der Betriebstemperatur.

Im Folgenden wird für diese zwei Typen jeweils ausführlich auf die Funktionsweise, den Entwicklungsstand und mögliche Einsatzgebiete eingegangen. Unter dem Kapitel „Weitere Informationen“ findet der Leser einen kleinen Einblick über einen dritten Brennstoffzellentyp, MCFC (engl. Molten Carbonate Fuel Cell) Brennstoffzelle, die eher im größeren Leistungsbereich zur Anwendung kommt.

Gesamtüberblick einer PEMFC / SOFC Brennstoffzellenanlage

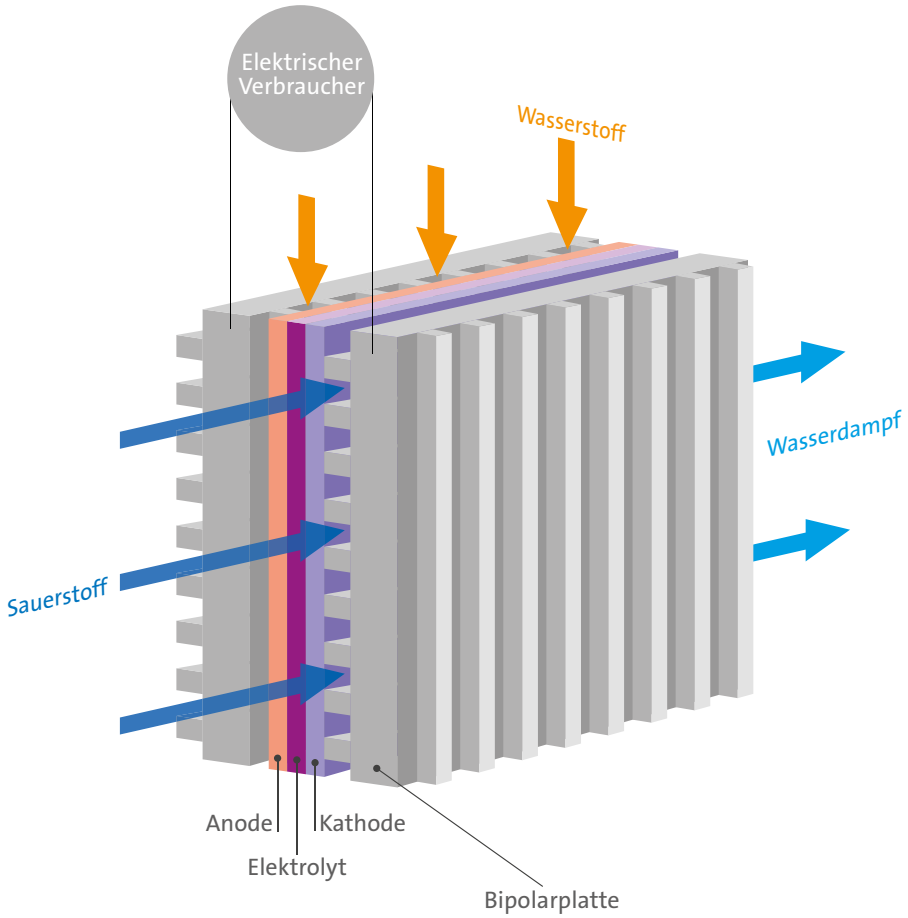
	PEMFC Proton Exchange Membran	**SOFC** Oxidkeramik
Elektrolyt	Polymer-Membran	Festkeramischer-Elektrolyt
Arbeitstemperatur	70 – 90 °C	650 – 1000 °C
Brennstoff	· Wasserstoff · Erdgas · Methanol · Methan	· Wasserstoff · Erdgas · Methan · LPG
Entwicklungsstand	kommerziell verfügbar	kommerziell verfügbar
Einsatzbereich	· KFZ-Antrieb · BHKW · Mikro-KWK	· Kraftwerk · BHKW · Mikro-KWK
Anlagenwirkungsgrad (elektrisch)	~ 32 – 37 %	~ 33 – 60 %

Quelle: VNG

Polymermembran Brennstoffzelle – PEMFC

Die Polymermembran-Brennstoffzelle (PEMFC – engl. Proton Exchange Membrane Fuel Cell) ist eine Niedertemperaturbrennstoffzelle. Für die chemische Reaktion braucht die PEMFC reinen Wasserstoff (H_2) oder ein wasserstoffreiches Prozessgas. Der Elektrolyt der PEMFC besteht aus einer Kunststofffolie und ist durchlässig für Protonen (H+-Ionen), bzw. besteht aus einer protonenleitenden Polymermembran (Nafion und Nachfolgeprodukte). Ladungsträger ist das Proton H+ bzw. Hydroniumion H_3O+. Hierfür werden z. B. sulfonierte Teflon-Membranen verwendet. Die Membran ist an beiden Flächen mit katalytisch reagierendem Elektrodenmaterial beschichtet. Als Katalysator wird zumeist Platin, Gemische aus Platin und Ruthenium, Nickel oder Kobalt verwendet. Da die PEMFC-Brennstoffzelle empfindlich gegen Kohlenmonoxid ist, sind die Elektroden mit Platin legiert. Eine zusätzliche Legierung aus Ruthenium verbessert den Schutz gegen Kohlenmonoxid. Jedoch bewirkt die Legierung eine leichte Absenkung der Umsetzungsgeschwindigkeit des Wasserstoffs und führt somit auch zu einer niedrigeren Zellspannung und damit zu einem geringfügig niedrigeren elektrischen Wirkungsgrad.

Über die Anode werden die Elektronen abgeführt. Dabei dissoziieren H_2-Moleküle an der Anodenseite und es werden zwei Elektronen abgeben, die zu je zwei Protonen oxidieren. Die H+-Ionen wandern weiter durch die Membran auf die Kathodenseite. Die freigewordenen Elektronen fließen durch einen externen Stromleiter und erzeugen eine



elektrische Spannung (siehe Seite 7). Unter Zuführung von O_2 reagieren an der Kathodenseite die Elektronen mit den Protonen. Bei der elektrochemischen Reaktion entsteht Wärme und H_2O. Zum Nutzen der elektrischen Arbeit werden die Anode und Kathode an einen elektrischen Verbraucher angeschlossen. Auf der Anodenseite wird bei der Reaktion auch Wasser benötigt. Dieses wird anschließend auf der Kathodenseite wieder abgegeben. Zum Decken dieses Wasserbedarfes ist entsprechend ein zusätzliches Wassermanagement notwendig.

Vorteile

- einfacher Zellaufbau
- schnelle Reaktion auf wechselnde Lasten
- kurze Startphasen
- hohe Leistungsdichte
- Elektrolyt ist korrosionsbeständig
- Zelle einfach herstellbar ggü. SOFC-Zelle

Nachteile

- anfällig gegen verunreinigtes Gas
- hohe Anforderung an das Elektrolyt
- Wasser- und Wärmemanagement notwendig
- komplexere Systemtechnik ggü. SOFC
- Geringe Temperatur ist nachteilhaft für die Brauchwassererzeugung

Reaktionsgleichung

anodenseitig

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$$

kathodenseitig

$$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$$

$$2O^{2-} + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$$

Gesamtreaktion

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

Bei der beschriebenen Reaktion entsteht auch Abwärme bei einer PEMFC-Brennstoffzelle, typischerweise bei einer Temperatur von 60 bis 80 °C. Diese niedrige Temperatur weist den Vorteil auf, dass die PEMFC über ein gutes Kaltstartverhalten verfügt. Jedoch hat die PEMFC auch Nachteile durch die aufwendige Systemtechnik. Die erforderliche Aufbereitung des eingesetzten Brenngases wird nötig, da der Katalysator der PEMFC sehr anfällig auf Kohlenmonoxid reagiert. Der Kohlenmonoxid-Gehalt muss unter 20 ppm (parts per million) betragen, um die Absorption von Kohlenmonoxid am anodischen Edelmetallkatalysator (z. B. Platin) zu verhindern. Dies könnte zum Abbruch der Reaktion führen. Auch eine schnelle Alterung der Membrane, verbunden mit einer abnehmenden Leistung des Brennstoffzellenstapels, kann durch einen zu hohen Kohlenmonoxid-Gehalt verursacht werden. Beim Einsatz von Erdgas als Brenngas sind bei der PEMFC-Brennstoffzelle daher Reformierungs- und Konvertierungsschritte des Erdgases unumgänglich.

Um die Empfindlichkeit gegen Kohlenmonoxid und die Verunreinigung des Gases zu verringern, ist die Hochtemperatur PEMFC Brennstoffzelle eine interessante Alternative zur herkömmlichen PEMFC Brennstoffzelle. Heutige Entwicklungen der HT-PEMFC können bei bis zu 200 °C arbeiten, dadurch bietet sich die Möglichkeit durch geeignete Wärmerückkopplungsverfahren die Abwärme zu nutzen.

Oxidkeramische Brennstoffzelle – SOFC

Die SOFC Brennstoffzelle ist eine Hochtemperaturbrennstoffzelle, die bei einer Betriebstemperatur von 650 °C bis 1.000 °C ihre Arbeit verrichtet. Zurzeit ist der meist verbreitete Elektrolyt Zirkondioxid. Zirkondioxid ist ein hochleistungs-keramisches Material, welches aus Silicatsanden gewonnen wird. Es hat die Eigenschaften, auch bei hohen Temperaturen wärme- und korrosionsbeständig zu sein. Das Zirkondioxid benötigt eine externe Beheizung zur Erreichung einer hohen Arbeitstemperatur, da das Material nur unter einer hohen Arbeitstemperatur sauerstoffionendurchlässig ist. Auf freie Elektronen wirkt es isolierend. Eine wesentliche Eigenschaft von Zirkondioxid ist seine Stabilität bei hohen Temperaturen und er zeigt eine hohe Lebensdauer im Vergleich zu anderen Elektrolyten. Die zusätzliche Dotierung mit Yttrium erhöht die Leistung und die Haltbarkeit der Membrane. Die Kathode ist wie der Elektrolyt ebenfalls aus einem keramischen Werkstoff (z. B. strontiumdotiertes Lanthanmanganat) gefertigt.

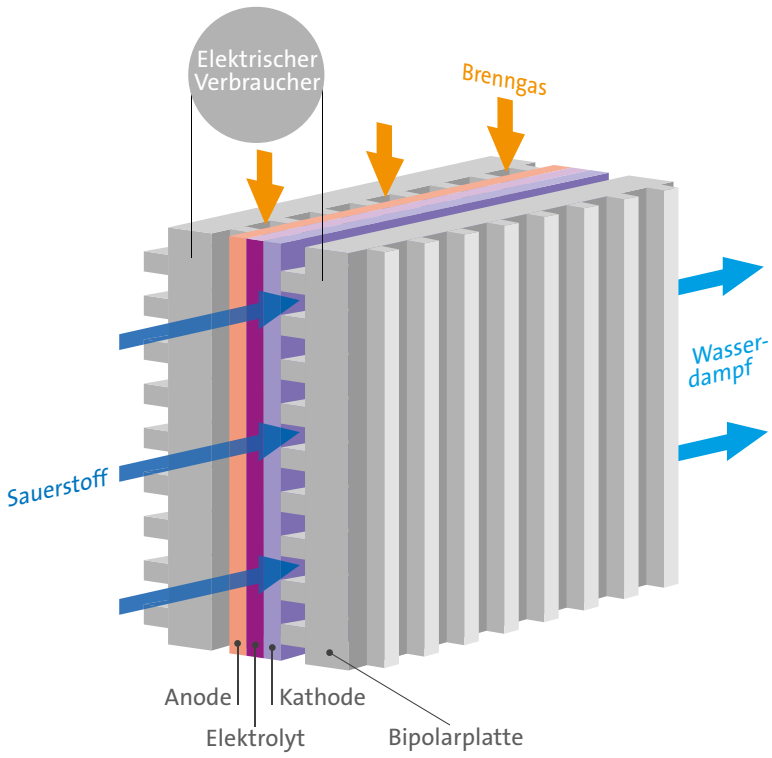
Die Kathode und die Anode sind gasdurchlässig und leitfähig. Negativ geladene Teilchen, in diesem Falle O_2-Ionen, wandern von der Kathodenseite zur Anodenseite. Somit verläuft der Prozess in der Oxidkeramischen Brennstoffzelle in umgekehrter Richtung zu den PEMFC-Brennstoffzellen. Aufgrund der hohen Arbeitstemperaturen kann die Reformierung zum größten Teil intern erfolgen und somit direkt ein kohlenwasserstoffhaltiger Energieträger, z. B. Erdgas, LPG oder Bioerdgas, eingesetzt werden. Gleichzeitig kann durch die hohe Betriebstemperatur eine gute Wärmeauskopplung mit bis zu 80 °C für Wärmeversorgung oder 120 °C für Kraft-Wärme-Kälte Kopplung realisiert werden.

Nachteilig bei der SOFC sind die hohen Anforderungen an die Werkstofftechnik, die aufgrund der hohen Betriebstemperaturen

Bei der SOFC werden zwei verschiedene Konzepte für den Zellstapel-Aufbau verfolgt:

1. Planarer Aufbau

Hier ist der Verbund aus Anode, Elektrolyt und Kathode als dünne, flache Scheibe ausgeführt. Zum Aufbau eines Stapels wird eine große Anzahl dieser Scheiben durch metallische oder keramische bipolare Platten getrennt und in Reihe geschaltet. Dieser Aufbau ist ebenfalls bei allen anderen Brennstoffzellentypen zu finden. Einerseits hat der planare Aufbau durch den niedrigeren ohmschen Widerstand eine hohe Energie- und Leistungsdichte, andererseits erwies sich die Abdichtung der einzelnen Zellen als problematisch, da die Flächen beim planaren Aufbau eine ungünstige Geometrie aufweisen.



erforderlich sind. Das Abschalten einer SOFC sollte aus diesem Grunde vermieden werden und nur in Störfällen sollte der Brennstoffzellenstapel abgekühlt werden, da die extremen Temperaturschwankungen die Zyklenfestigkeit begrenzen. Für Wartungsarbeiten muss der Brennstoffzellenstapel inzwischen allerdings vielfach nicht mehr abgekühlt werden und an einer höheren allgemeinen Zyklenfestigkeit wird seitens der Hersteller gearbeitet, um diesem Nachteil weiter entgegenzusteuern.

Reaktionsgleichung

anodenseitig

$$2H_2 + 2O^{2-} \rightarrow 2H_2O\,(g) + 4^{e-}$$
$$(O^{2-} + CO \rightarrow CO_2 + 2e^-)$$

kathodenseitig

$$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$$

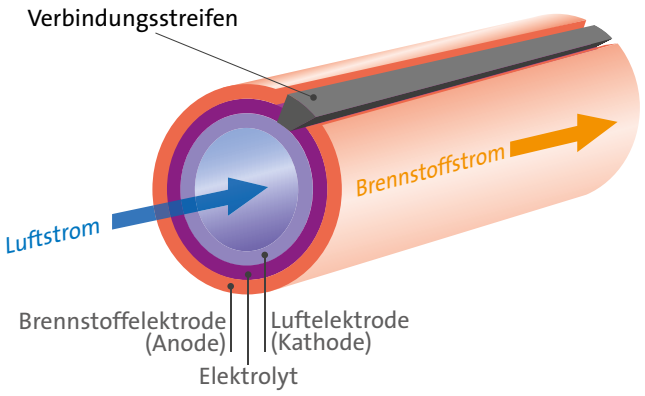
Gesamtreaktion

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

Sowohl im Hinblick auf eine Erhöhung der Lebensdauer der SOFC als auch zur Kostenminimierung der gesamten Anlage wird generell eine Absenkung der Betriebstemperatur auf ca. 650 °C angestrebt. Allerdings führt ein Temperaturrückgang auch zu einer Verschlechterung der Leitfähigkeit des Festkörperelektrolyten. In Anbetracht dessen könnte durch geschickte Verschaltung des Brennstoffzellen-Systems der Energieverlust minimiert werden. Zur Erreichung dieses Ziels werden z. Z. zwei Konzepte verfolgt, zum einen die Verringerung der Elektrolytdicke und zum anderen der Einsatz eines alternativen Festelektrolyten.

2. Tubularer Aufbau

Hierbei sind die elektrochemisch aktiven Elemente als lange, einseitig geschlossene Röhren ausgeführt. Dieses System erlaubt unterschiedliche Materialausdehnungskoeffizienten von Elektroden und Elektrolyt, ohne dass es zum Spannungsbruch im Brennstoffzellenstapel kommt, so dass eine hohe mechanische Stabilität gewährleistet wird. Nachteilig ist der hohe ohmsche Innenwiderstand.



Vorteile

- einfacher Zellaufbau
- hohe Wirkungsgrade
- Prozesswärme auskoppelbar
- CO-unempfindlich
- kein Elektrolytmanagement erforderlich
- keine Edelmetalle, bedeutet geringere Kosten
- kein reiner Wasserstoff erforderlich
- robuster und weniger wartungsintensiv im Vergleich zu anderen Brennstoffzellentypen

Nachteile

- hohe Betriebstemperaturen, d. h. lange Aufwärmphase nötig
- lange An- und Abfahrtzeiten
- Korrosion der Komponenten
- setzt hohe Temperaturbeständigkeit an das Material voraus
- dynamische Betriebsweise ist nur eingeschränkt möglich

4 Vorteile der Brennstoffzellentechnik

Die Brennstoffzelle für die stationäre Energieversorgung weist wesentliche Vorteile gegenüber konventionellen KWK-Anlagen auf. Durch die direkte Umwandlung des Brennstoffs in elektrische und thermische Energie lassen sich sehr viel höhere Wirkungsgrade als bei konventionellen KWK-Anlagen erzielen. Des Weiteren weisen Brennstoffzellen ein gutes Teillastverhalten auf und lassen sich somit gut modulieren. Darüber hinaus lässt sich unter Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff der Ausstoß der klimawirksamen Gase auf null reduzieren, wenn der Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen hergestellt wird. Die eigentliche Brennstoffzelle bedarf auch nur eines geringen Wartungsaufwands. Einen höheren Anteil an Wartungsarbeiten verursachen die Peripherie-Geräte.

Die genannten Brennstoffzellentypen (SOFC und PEMFC) mit den verschiedensten Leistungsgrößen ermöglichen unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten, wie z. B. in Ein- und Zweifamilienhäusern, Mehrfamilienhäusern oder Gewerbeeinrichtungen. Brennstoffzellen bieten im kleinen Leistungsbereich ein signifikantes Potenzial für die dezentrale Bereitstellung von Strom und Wärme. Sollten in Zukunft Wohngebäude bei verbesserter Dämmung einen geringeren Wärmebedarf aufweisen, erlauben Brennstoffzellen durch ihren guten elektrischen Wirkungsgrad und ihrer geringeren Wärmeauskopplung eine gute Anpassung an diese Bedarfssituation.

Wirkungsgrad

Im Gegensatz zu Wärme-Kraft-Maschinen ist der maximal erreichbare elektrische Wirkungsgrad von Brennstoffzellen nicht durch den Carnot-Faktor begrenzt, der sich aus der Temperaturdifferenz zwischen der oberen und unteren Prozesstemperatur ergibt (siehe Gleichung 1). Daher können Brennstoffzellen erheblich höhere elektrische Wirkungsgrade als konventionelle KWK-Aggregate erzielen. Der Gleichung 2 kann die Formel für den Gesamtwirkungsgrad einer Brennstoffzellenanlage entnommen werden.

Gleichung 1: Carnot- Wirkungsgrad einer Wärme-Kraft-Maschine

$$\eta_{mech} = \frac{T_h - T_n}{T_h}$$

T_h die höchste Temperatur
T_n die niedrigste Temperatur

Gleichung 2: Systemwirkungsgrad eines Brennstoffzellenheizgerätes ohne Zusatzheizgerät

$$\eta_{el} = \frac{\text{nutzbare elektrische Energie}}{\text{Brennwert von Erdgas (vor dem Reformer)}}$$

Je nach Betriebstemperatur können theoretische Wirkungsgrade von 70 bis 80 % erzielt werden, bei der direkten Methan-Oxidation sogar nahezu 100 %. Im Betrieb ist der Wirkungsgrad aufgrund ohmscher Verluste am Elektrolyten, Stofftransporthemmungen und Verlusten aufgrund des Ladungsdurchgangs an der Grenzfläche Elektrolyt/Elektrode niedriger. Der elektrische Gesamtwirkungsgrad einer Brennstoffzellen-Anlage ist die Multiplikation aus verschiedenen Einzelwirkungsgraden. Ein wesentlicher Vorteil von Brennstoffzellen liegt im unvermindert hohen elektrischen Wirkungsgrad von 30 – 60 % auch bei kleinen Leistungsklassen für den häuslichen Gebrauch. Bei motorischen Blockheizkraftwerken dagegen sinkt dieser, bei diesen kleinen Leistungen, meist auf unter 30 %.

Teillastverhalten

In der Praxis können elektrische Wirkungsgrade über 60 % erreicht werden. Äußerst vorteilhaft ist die Konstanz dieser hohen Effizienz über einen weiten Lastbereich. Der maximale elektrische Wirkungsgrad wird – je nach Brennstoffzellentyp – in der Regel im Bereich zwischen 30 % und 50 % der Volllast erreicht. In Richtung niedrigerer Leistungen fällt von diesem Punkt aus der elektrische Wirkungsgrad ab, in Richtung höherer Leistungen dagegen kaum, so dass in einem weiten Teillastbereich nur geringfügige Leistungsänderungen auftreten. In Verbindung mit ihrem guten dynamischen Verhalten sind Brennstoffzellen daher für die Versorgung von Verbrauchern mit wechselndem Lastverhalten sehr gut geeignet.

Emissionen und Umwelt

Ein weiterer entscheidender Vorteil von Brennstoffzellen-Anlagen sind die äußerst geringen Schadstoffemissionen. Diese werden im Wesentlichen durch die Beheizung des Reformers verursacht. Aufgrund des hohen elektrischen Wirkungsgrades von Brennstoffzellen-Anlagen verringern sich naturgemäß die spezifischen Kohlendioxid-Emissionen.

Im Vergleich zu konventionellen Energieumwandlungsaggregaten auf Basis fossiler Brennstoffe sind die Emissionswerte für Kohlenwasserstoffe und Schwefeldioxid ebenso wie die Ruß- und Staubemissionen zu vernachlässigen. Darüber hinaus wird durch die Vermeidung einer offenen Verbrennung die Bildung von Stickoxiden nahezu vollständig unterdrückt. Auch der Betrieb oxidkeramischer Brennstoffzellen-Anlagen mit einer Arbeitstemperatur von ca. 650 bis 1000 °C führt nur zu einer vernachlässigbaren NO_x-Produktion. Die Stickoxide werden wesentlich durch den Reformer verursacht.

Neben einem niedrigen Schadstoffausstoß zeichnen sich Brennstoffzellen-Anlagen durch einen geringen Schallpegel aus, so dass diese Anlagen auch verbrauchernah in Wohngebäuden ohne weiteren Lärmschutz installiert werden können. Die Geräuscharmut ist auf das weitestgehende Fehlen beweglicher Teile, die sich auf kleine Pumpen, Lüfter und Wechselrichter beschränken, zurückzuführen. Dies hat den Vorteil, dass die Geräte vollkommen ohne Lärmkapseln auskommen.

Der mögliche modulare Aufbau von Brennstoffzellen-Anlagen gewährleistet eine optimale Anpassung der erzeugten Leistung an die Verbraucheranforderungen, was speziell im Hinblick auf den dezentralen Einsatz von großer Bedeutung ist.

5 Perspektiven für Brennstoffzellen im Energiemarkt

Die nähere Zukunft der Brennstoffzellentechnik wird einerseits bestimmt von der technischen Weiterentwicklung, vor allem aber durch die wirtschaftlichen und gesetzlichen Rahmenbedingungen. Nach über einem Jahrzehnt Entwicklungsarbeit befinden sich seit 2015 Brennstoffzellen-Systeme für die Hausenergieversorgung und wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Fahrzeuge in der Phase der Markteinführung. Für einen erfolgreichen Start sind allerdings weitere gemeinsame Anstrengungen von Politik und Industrie nötig.

Interview mit Dr. Klaus Bonhoff

1. Welchen Stand haben Brennstoffzellen erreicht, können wir bereits von einer Marktreife sprechen?

Ja, die Markreife ist bereits erreicht. Zurzeit befindet sich die Brennstoffzelle in der Markteinführungsphase. Die technische Reife des Produkts konnte in Feldtests nachgewiesen werden. Allerdings müssen die Kosten reduziert werden, damit das Produkt für den normalen Haushalt attraktiver wird.

2. Wird es noch weitere Hersteller geben und wird es unter den Herstellern zu Wettbewerb kommen?

Neben den großen Herstellern wie Viessmann, Vaillant und Bosch erwarte ich vor allem viele Startup-Unternehmen, wobei viele Großinvestoren sich möglicherweise daran beteiligen könnten. Solid Power ehemals Ceramic Fuel Cells, Elcore und RBZ (Riesaer Brennstoff Zellen GmbH) geben gute Beispiele, dass sich aus anderen Unternehmen Startups bilden, die wiederum interessante Lösungen anbieten. Und dabei gibt es nicht nur eine einzige Lösung, sondern differenzierte Angebote für Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser und Gewerbebetriebe.

Ich rechne auch in naher Zukunft mit weiteren Wettbewerbern aus dem Ausland und Kooperationen von ausländischen und deutschen Unternehmen. Ein Beispiel zeigt die Zusammenarbeit von Panasonic mit Viessmann, welche gemeinsam das erste KWK-System mit PEMFC-Brennstoffzelle für Eigenheime auf den deutschen Markt bringen. Da die Voraussetzungen in Japan grundsätzlich verschieden sind, sind die ausländischen Mitbewerber eher geneigt eine Korporation mit deutschen Herstellern einzugehen, als zu versuchen, selbst ein Produkt auf dem deutschen Markt zu etablieren. Schon allein der Unterschied der Beschaffenheit des Erdgases zwischen Deutschland und Japan führt zu einer technischen Änderung im Gasreformer, die mit Aufwand und Kosten für die japanischen Hersteller verbunden ist. Japanisches Erdgas hat einen höheren Methananteil und stellt somit aus technischer Sicht eine geringere Anforderung an den Reformer als in Deutschland.

Zur Person: Seit 2008 ist Dr. Klaus Bonhoff Sprecher der Geschäftsführung der NOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Außerdem ist er ehrenamtlich tätig als Mitglied in den Kuratorien des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme (Freiburg) und des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (Stuttgart) sowie in den Beiräten von erdgas mobil (Berlin) und NEXT ENERGY EWE-Forschungszentrum für Energietechnologie e. V. (Oldenburg).

3. Wie weit ist die Konkurrenz voraus?

Aus technischer Sicht liegen die deutschen Unternehmen mit ausländischen Herstellern gleich auf, wobei beispielsweise die Japaner den Vorsprung in der Produktionstechnologie haben, da sie durch eine massive staatliche Förderung mit der Markteinführung früher begonnen haben und somit mehr Erfahrung hinsichtlich der Produktionszyklen sammeln konnten.

4. Wäre eine konzentrierte Forschung nach dem Vorbild von Japan eine Verbesserung, um den wissenschaftlichen und technologischen Vorsprung auszubauen?

Eine konzentrierte Forschung kann Vorteile mit sich bringen. Jedoch haben wir in Deutschland ganz andere politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen als in Japan. Die öffentliche Hand sollte grundsätzlich einen offenen Ansatz in der Technologieförderung verfolgen.

5. Welchen Stand wollen wir 2020 hinsichtlich der Forschung erreicht haben?

Die in der Initiative Brennstoffzelle zusammengeschlossenen Hersteller geben das Ziel 175.000 Geräte bis zum Jahr 2020 aus. Um dieses Ziel erreichen zu können, müssen wir aber heute die richtigen Entscheidungen treffen: Nicht zuletzt aufgrund der Förderung aus dem NIP (Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie) ist es gelungen, stationäre Brennstoffzellensysteme für die Strom- und Wärmeversorgung von Einfamilienhäusern technisch zur Marktreife zu entwickeln. 2016 endet das als Forschungs- und Entwicklungsprogramm mit Fokus auf Alltagsdemonstration aufgesetzte NIP. Das bedeutet mit Blick auf 2020, dass Politik und Industrie jetzt gemeinsam einen Rahmen schaffen müssen, um auf den Erfolgen des NIP eine erfolgreiche Markteinführung aufzubauen. In Ergänzung zu einem Markteinführungsprogramm müssen wir natürlich weiterhin Forschung und Entwicklung (FuE) ermöglichen, um die technologische Basis zu sichern.

6. Welcher Brennstoffzellentyp soll sich durchsetzen, die SOFC oder die PEMFC?

Die Hersteller, die mit japanischen Unternehmen kooperieren, setzen auf die PEMFC. Die SOFC spielt in den FuE-Projekten des NIP mit einheimischen Unternehmen eine Rolle. Was sich durchsetzt, wird letztlich der Markt zeigen. Grundsätzlich hat die SOFC gewisse Vorteile hinsichtlich des elektrischen Wirkungsgrades. Vor allem die Verwendung von keramischen Werkstoffen trägt zur Kostenreduktion bei. Allerdings findet die PEMFC im Automobilbereich eine hohe Anwendung. Durch die Erhöhung der Stückzahl werden die hohen Fertigungskosten der PEMFC dadurch perspektivisch gesenkt.

7. Wie groß ist das Potenzial, zu einem verbraucherfreundlichen Preis zu kommen? Welche wesentlichen Faktoren spielen hierbei eine Rolle? (Massenproduktion, neue Einsatzstoffe, reiner Wasserstoffbetrieb)

Ein wichtiger Aspekt ist der Skaleneffekt: Die Erhöhung der Produktionsmenge wird eine Reduzierung des Preises bewirken. Einsparungen erwarten wir auch durch weitere Systemvereinfachungen. Zunächst muss aber ein neuer Rahmen gesetzt werden. Neben der Fortsetzung von FuE im Bereich Brennstoffzelle wird für die Unternehmen, die heute ein technisch reifes Produkt haben, ein Programm benötigt, welches Anreize für diesen Markt schafft.

8. Sind die derzeitigen staatlichen Hilfen ausreichend, wird die derzeitige Markteinführung von der Europäischen Kommission mitgetragen?

Wir haben bereits jetzt attraktive Förderprogramme in NRW, Hessen und Sachsen. Die Förderbeträge belaufen sich auf bis zu 13.000 Euro für kleine KWK-Systeme mit stationärer Brennstoffzelle. Auf nationaler Ebene besteht weiterhin die Förderung aus dem Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Hinzu kommen wird ein Technologieeinführungsprogramm für Brennstoffzellen in der Hausenergieversorgung für die Geräte, die heute schon kommerziell verfügbar sind.

9. Würden Werbemaßnahmen die Markteinführung stützen können, welche Vorbildfunktion könnte die öffentliche Hand übernehmen?

Die öffentliche Hand kann Vorbild sein, indem sie als erstes die neue Technologie nutzt. Das geschieht auch bereits: Die Polizei in Brandenburg hat circa 120 Brennstoffzellensysteme installiert. Sie dienen als Notstromaggregate für den Behördenfunk und sollen zukünftig die wartungsintensiveren Dieselgeneratoren ersetzen. Die Verwendung von Brennstoffzellen zur Strom- und Wärmeversorgung in öffentlichen Einrichtungen wie zum Beispiel Kindergär-

ten erzeugt gute Sichtbarkeit für die Technologie. Im Verbundvorhaben Callux geschieht das. Wir müssen aber gemeinsam noch mehr tun, damit die Technologie noch sichtbarer und bekannter wird. Unsere Erfahrungen zeigen, dass die Akzeptanz nahezu bei hundert Prozent liegt, sobald Leute einmal die Gelegenheit hatten, mehr über Brennstoffzelle und Wasserstoff zu erfahren.

10. Welche wesentlichen Umwelt-Vorteile können wir der Brennstoffzelle zurechnen?

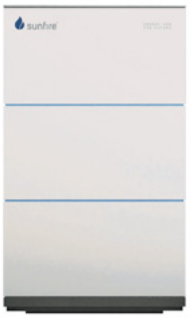
Ein wichtiger Aspekt ist die Senkung des Energieverbrauchs und der Emissionen. Der CO_2 Ausstoß kann bis zu 40 Prozent gesenkt werden. Das heißt, der Verbraucher spart Energiekosten und die Umwelt profitiert.

11. Welche weiteren Einsatzgebiete für Brennstoffzellen sind vorstellbar? (Mobilität, Notstromversorgung, Inselversorgungen)

Ich sehe die Backup-Brennstoffzellensysteme auch als ein zukünftiges Exportgut. In den ländlichen Gebieten der Schwellenländer, wie z. B. Indien oder China, sind Strom- und Warmwasserversorgung unzureichend bzw. instabil. Backup-Brennstoffzellensysteme von 2 kW bis 5 kW können im Falle eines Netzausfalls den Verbrauchern einen konstanten Strom liefern, dabei würden zusätzlich neue Arbeitsfelder in den Bereich Energieversorgung entstehen. Ein anderes interessantes Thema, was in Deutschland zu wenig diskutiert wird, ist die Nutzung von Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) als BHKW im MW-Bereich. Hier sind Länder wie die USA oder Südkorea schon einen Schritt voraus. Zum Beispiel baut Südkorea ein Brennstoffzellenkraftwerk mit einer Kapazität von 60 MW und das ist erst der Anfang. Weitere Kraftwerke mit Brennstoffzellen sind ebenfalls in Planung. Auf jeden Fall ist es ein spannendes Feld, welches ein hohes Entwicklungspotenzial verspricht.

Übersicht über die auf dem deutschen Markt verfügbaren stationären BZ-Geräte.

Hersteller	Freudenberg
Typ	HT-PEMFC
Leistung (el / th)	0,3 / 0,7 kW
Thermische Leistung des Zusatzbrenners	Paketlösungen: 2,8 – 21 kW oder extern, individuell wählbar
Speicher in Liter	Paketlösungen: 560 oder extern, individuell wählbar
Warmwasserspeicher	
Pufferspeicher	
Elektrischer Wirkungsgrad	32 %
Gesamt-wirkungsgrad	105 %
Abmessungen in mm (B x T x H)	600 x 550 x 1050
Gewicht in kg	115
in Modulbauweise, max. Modulgewicht	
Markteinführung	2014
Kontakt	elcore.fst.com

SenerTec	SOLIDpower	Viessmann	inhouse engineering	sunfire
				
NT-PEMFC	SOFC	NT-PEMFC	NT-PEMFC	SOFC
0,7 / 0,96 kW (modulierend)	0,5 – 0,85 kW	0,75 / 1 kW	5 / 7,5 kW	0,75 / 1,25 kW
5,2 – 21,8 kW	extern, individuell wählbar	5,5 – 19 kW	extern, individuell wählbar	extern
	extern, individuell wählbar		extern, individuell wählbar	extern
		46		
300 (mit Frischwasserstation)		170		
bis zu 37 %	bis zu 55 %	37 %	34 %	33 %
91 %	bis zu 88 %	90 %	92 %	88 %
Brennstoffzelleneinheit: 1200 x 1050 x 1800	550 x 800 x 1200	1085 x 600 x 1998	740 x 1550 x 1159	670 x 670 x 1150
245	230	290	ca. 380	150
125 (Brennstoffzellenmodul) 120		125 (Brennstoffzellenmodul) 165 (Spitzenlastmodul)		
2016	2012	2014	2015	Q4/2019
derdachs.de	bluegen.de	viessmann.com	inhouse-engineering.de	sunfire.de

6 Fördermöglichkeiten

Soll in Zukunft ein großer Teil der Energieversorgung mittels dezentraler Energieerzeugung bereitgestellt werden, so müssen die notwendigen wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen dafür gegeben sein, um in innovative, umweltschonende und hocheffiziente Energietechniken zu investieren.

KWK-Gesetz

KWK-Anlagen, zu denen auch die Brennstoffzellen zur stationären Hausversorgung zählen, können in Bezug auf den Klimaschutz einen erheblichen Beitrag leisten. Daher fördert die Bundesregierung die Erhöhung des Anteils der KWK an der Stromerzeugung in Deutschland. Derzeit liegt der Anteil mit etwa 96 Terawattstunden pro Jahr zwar nur bei circa 16 %, dieser soll aber bis zum Jahr 2020 auf 110 Terawattstunden pro Jahr ansteigen. Das Förderinstrument der Bundesregierung ist hierfür das Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK-Gesetz). Das KWK-Gesetz fördert unter anderem die Modernisierung und den Neubau von KWK-Anlagen. Anlagenbetreiber erhalten auf die erzeugte Kilowattstunde Strom einen Zuschuss. Die Höhe des Zuschusses variiert mit der elektrischen Leistung der Anlage und hängt zusätzlich davon ab, ob der produzierte Strom im Haus selbst verbraucht wird oder ob dieser in das öffentliche Netz zur allgemeinen Versorgung eingespeist wird. Im Falle des Eigenverbrauchs erhalten nur Anlagen bis 100 kW_{el} einen Zuschuss. Betreibern von Brennstoffzellen mit einer elektrischen Leistung von bis zu 50 kW stehen nach dem KWK-Gesetz ein Zuschlag in Höhe von derzeit 8 Cent pro Kilowattstunde bei Netzeinspeisung und 4 Cent pro Kilowattstunde bei Selbstverbrauch für die Dauer von 60.000 Vollbenutzungsstunden ab Aufnahme des Dauerbetriebs der Anlage zu.

Eine genaue Übersicht der KWK-Zuschläge sowie eine detaillierte Darstellung des KWK-Gesetzes bieten die ASUE-Broschüren „Das KWK-Gesetz 2012“ (für Anlagen, für die die Übergangsregelungen gelten) und „KWKG 2016 in Zahlen“.

Zum 01.01.2016 ist die neue Fassung des KWK-Gesetzes mit geänderten Zuschlagszahlungen in Kraft getreten. Allerdings existiert eine Anzahl Übergangsbestimmungen, nach denen einige Anlagen weiterhin die teilweise günstigeren Konditionen der vorherigen Fassung genießen: Für Brennstoffzellen, die bis zum 31.12.2016 verbindlich bestellt und bis 31.12.2017 in Betrieb gehen, kann somit auch die vorherige Zuschlagszahlung in Höhe von 5,41 Cent pro Kilowattstunde wahlweise für einen Zeitraum von zehn Jahren oder für die Dauer von 30.000 Vollbenutzungsstunden in Anspruch genommen werden, und zwar unabhängig davon, ob der erzeugte Strom selbst verbraucht oder in das Netz eingespeist wird.

KWK-Zuschuss nach dem KWK-Gesetz ab 2016 (in ct/kWh)

Zahlungen für die jeweiligen Leistungsanteile (kW_{el})	< 50	51 – 100	101 – 250	251 – 2.000	> 2.000
Netzeinspeisung (§7 I+II)	8	6	5	4,4	3,1
Nicht-Netzeinspeisung (Eigenverbrauch o.ä.) (§7 III 1)	4	3	-	-	-
Einspeisung in Kundenanlagen o.ä. (Contracting) (§7 III 2)*	4	3	2	1,5	1

Informationen

KfW-Förderprogramm

Neben dem KWK-Gesetz gibt es zusätzlich die Möglichkeit, einen Investitionszuschuss der KfW in Anspruch zu nehmen. Mit dem Förderprogramm 433 – Energieeffizient Bauen und Sanieren, Zuschuss Brennstoffzelle – werden Brennstoffzellen bis 5 kW elektrischer Leistung mit 7.050 bis maximal 28.200 Euro bezuschusst. Die Höhe des Zuschusses ist abhängig von der elektrischen Leistung der Anlage. Für ein marktübliches Gerät mit einer elektrischen Leistung von 0,75 kW beträgt der Zuschuss 9.300 Euro.

Die Förderung gilt für den Einbau einer Brennstoffzelle sowohl in Neubauten als auch in bestehende Gebäude. Dabei ist es unerheblich, ob die Gebäude zum Wohnen oder für gewerbliche Zwecke genutzt werden. Neben Privatpersonen können auch gewerbliche Unternehmen, Kommunen, kommunale Unternehmen und Wohnungseigentümergemeinschaften die Förderung in Anspruch nehmen.

Möglicher Investitionszuschuss der KfW

elektr. Leistung (kW_{el})	Zuschuss (Euro)
≤ 0,25	7.050
> 0,25 ≤ 0,50	7.950
> 0,50 ≤ 1,00	10.200
> 1,00 ≤ 1,50	12.450
> 1,50 ≤ 2,00	14.700
> 2,00 ≤ 2,50	16.950
> 2,50 ≤ 3,00	19.200
> 3,00 ≤ 3,50	21.450
> 3,50 ≤ 4,00	23.700
> 4,00 ≤ 4,50	25.950
> 4,50 ≤ 5,00	28.200

www.kfw.de
> Privatpersonen
> Neubau
> Förderprodukte
Energieeffizient Bauen und Sanieren - Zuschuss Brennstoffzelle

Broschüren

Das KWK-Gesetz 2017
Bestellnummer
309860

Leitfaden zur Anmeldung und steuerlichen Behandlung von kleinen Blockheizkraftwerken
Bestellnummer
309887

Wirtschaftliches Sanieren mit Brennstoffzelle
Bestellnummer
310183

Fotos: stevanzz - Fotolia (Titel, 1); Andrey Volokhatiuk - Fotolia (Titel o. li.); magann - Fotolia (Titel o.re.); tunedin - Fotolia (Titel u. li.); by-studio - Fotolia (Titel u.re.); Viessmann Werke (4, 8); Fabian Schmidt - Fotolia (9); wajan - Fotolia (17)

Herausgeber
ASUE Arbeitsgemeinschaft für
sparsamen und umweltfreundlichen
Energieverbrauch e. V.
Robert-Koch-Platz 4
10115 Berlin

Telefon 0 30 / 22 19 1349-0
info@asue.de
www.asue.de

Bearbeitung
ASUE-Arbeitskreis
Blockheizkraftwerke/Brennstoffzelle

Grafik
Kristina Weddeling, Essen

Verlag
wvgw Wirtschafts- und
Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH
Josef-Wirmer-Straße 3
53123 Bonn
Telefon 0228/9191-40
info@wvgw.de
www.wvgw.de

Brennstoffzellen
für die Hausenergieversorgung
Bestellnummer: 309619
Stand: 2., aktualisierte Auflage
Mai 2019

Überreicht durch:

FSC
www.fsc.org
RECYCLED
Papier aus
Recyclingmaterial
FSC® C106855