



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Oskar Lidtke

Stand der Technik stationärer Brennstoffzellen zur Gebäudeenergieversorgung mit energetischer Analyse einer gewerblich genutzten 100kW-Anlage

Oskar Lidtke

Stand der Technik stationärer Brennstoffzellen zur Gebäudeenergieversorgung mit energetischer Analyse einer gewerblich genutzten 100kW-Anlage

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau / Energie- und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Drees & Sommer Advanced Building Technologies GmbH
Ludwig-Erhard-Straße 1
20459 Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt
Zweitprüfer/in : Dipl.-Ing. (FH) Stefan Bauer

Abgabedatum: 06.10.2015

Zusammenfassung

Oskar Lidtke

Thema der Bachelorarbeit

Stand der Technik stationärer Brennstoffzellen zur Gebäudeenergieversorgung mit energetischer Analyse einer gewerblich genutzten 100kW-Anlage

Stichworte

Stationäre Brennstoffzellen, BHKW (Blockheizkraftwerke), Kraft-Wärme-Kopplung, Marktanalyse

Kurzzusammenfassung

Seit einigen Jahren werden stationäre Brennstoffzellen immer häufiger als Alternative zu konventionellen BHKW bzw. KWK-Anlagen gesehen. Insbesondere für den Leistungsbereich Gewerbe und Industrie wird hier in einer Marktanalyse der aktuelle Stand bzgl. Technik, Kosten, Förderung und bekannte Hersteller dargestellt. Ergänzend dazu liefert die Analyse einer seit 3 Jahren in Hamburg in Betrieb befindlichen 100 kW-Anlage und Auswertung von Messdaten aufschlussreiche Ergebnisse, u.a. über Leistungs- und Wirkungsgrad-Verhalten über den Verlauf eines Jahres.

Oskar Lidtke

Bachelor Thesis title

State of the art of stationary fuel cells for building energy supply with energy analysis of a commercially used 100 kW plant

Keywords

Stationary fuel cells, CHP (combined heat and power), market analysis

Abstract

For the last few years, stationary fuel cells are considered as an alternative to conventional CHP plants. For the power range commercial buildings and industry in particular, this thesis offers a market analysis with the latest state of the art including technology, costs, funding and known manufacturers. In addition there is an analysis of a 100 kW plant which has been in operation for 3 years in Hamburg, Germany. The analysis with evaluation of measured data reveals several results, including performance and efficiency behavior over one year.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	III
Symbolverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Brennstoffzellen-Technik	3
2.1 Vorteile stationärer Brennstoffzellen	4
2.2 Strom-Spannungs-Kurve	9
2.3 Wirkungsgrad und Stromkennzahl	10
2.4 Brennstoffzellen-Typen	12
3 Marktanalyse	14
3.1 Kosten	15
3.2 Förderungsmöglichkeiten	17
3.3 Aktuelle Hersteller	18
3.3.1 Marktverfügbare Brennstoffzellen	18
3.3.1.1 Ballard Power Systems	18
3.3.1.2 Doosan Fuel Cell America	19
3.3.1.3 FuelCell Energy	20
3.3.1.4 Bloom Energy	21
3.3.1.5 N2telligence / Fuji Electric	22
3.3.1.6 AFC Energy	23
3.3.1.7 Nedstack	24
3.3.2 In Entwicklung befindliche Brennstoffzellen	25
3.3.3 Eingestellte und übernommene Projekte	26
3.4 Zusammenfassende Darstellung	27
4 Brennstoffzellen-Projekt Autohaus Hamburg	29
4.1 Beschreibung der Anlage	30
4.1.1 Aufbau	30
4.1.2 Betriebserfahrungen bis heute	31
4.2 Auswertung von Messdaten	33
4.3 Vergleich mit Ballard-Projekt in Berlin	40
5 Zusammenfassung und Ausblick	42
Literaturverzeichnis	45
Anhang	A-1

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Vergleich des Carnot-Wirkungsgrades η_c mit dem idealen Brennstoffzellen-Wirkungsgrad $\eta_{ideal,u}$ [HEI, S. 6].....	5
Abbildung 2.2: Elektrische Wirkungsgrade unterschiedlicher Techniken der Stromerzeugung (nach [GUM, S.6])	6
Abbildung 2.3: Typisches Teillastverhalten des elektrischen Wirkungsgrades von Brennstoffzellen, Verbrennungsmotoren und Gasturbinen [GUM, S.50]	6
Abbildung 2.4: Vergleich der Schadstoffemissionen von thermischen Kraftwerken und Brennstoffzellen (Typ ONSI PC25C) [GUM, S. 7].....	8
Abbildung 2.5: Schematische Darstellung einer Strom/Spannungskennlinie (T1). Weitere Kurve (rot) für eine höhere Betriebstemperatur (T2 > T1) (nach [HEI, S.7])	10
Abbildung 2.6: Aufbereitung von Erdgas für die fünf Brennstoffzellen-Typen [GUM, S. 42].....	13
Abbildung 3.1: Richtwerte für Modulkosten in €/kW für Erdgas-BHKW (links) und Biogas-BHKW (rechts) [ASU, S. 11].....	15
Abbildung 3.2: Vergleich der Investitionskosten (nicht näher spezifiziert) unterschiedlicher Brennstoffzellen-Anlagentypen und BHKW auf Verbrennungsbasis (Quelle: eigene Darstellung, Daten aus [2], [ASU]).....	16
Abbildung 3.3: Ballard-Anlage ClearGen® (Quelle: www.ballard.com)	19
Abbildung 3.4: Doosan-Anlage PureCell® (Quelle: www.doosanfuelcell.com)	20
Abbildung 3.5: FuelCell Energy DFC®-Kraftwerk in einer Brauerei (Quelle: www.fces.de).....	21
Abbildung 3.6: Bloom Energy Server® (Quelle: www.bloomenergy.com)	22
Abbildung 3.7: N2telligence-Anlage QuattroGeneration (Quelle: www.n2telligence.com).....	23
Abbildung 3.8: Anlage von AFC Energy (Quelle: www.afcenergy.com)	24
Abbildung 3.9: Anlage von Nedstack (Quelle: www.nedstack.com)	25
Abbildung 3.10: Anlage von Convion (in Entwicklung) (Quelle: www.convion.fi).....	26
Abbildung 3.11: Anlage von Mitsubishi Hitachi Power Systems (in Entwicklung) (Quelle: www.mhps.com)	26
Abbildung 4.1: Brennstoffzellen-Anlage beim Autohaus in Hamburg. Logo des Automobilunternehmens auf Wunsch zensiert (Quelle: eigene Aufnahme vom 14.07.2015).....	29
Abbildung 4.2: Brennstoffzellen-Anlage beim Autohaus in Hamburg. Logo des Automobilunternehmens auf Wunsch zensiert (Quelle: eigene Aufnahmen vom 14.07.2015).....	30
Abbildung 4.3: Screenshot vom Anlagenschaubild mit aktuellen Messwerten (Quelle: Betriebsinterne Dokumente)	33
Abbildung 4.4: Erzeugte Strom- und Wärmemenge im Jahresverlauf (2014)	37
Abbildung 4.5: Elektrischer und thermischer Wirkungsgrad im Jahresverlauf (2014)	37
Abbildung 4.6: Stromkennzahl im Jahresverlauf (2014).....	37
Abbildung 4.7: Mittlere relative Abweichung der monatlichen Messwerte (2014).....	38
Abbildung 4.8: Mittlere relative Abweichung der monatlichen berechneten Werte (2014).....	38
Abbildung 4.9: Elektrischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der elektrischen Leistung (2014)	39
Abbildung 4.10: Thermischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der thermischen Leistung (2014).....	39
Abbildung 4.11: Elektrischer und Gesamtwirkungsgrad bei unterschiedlichen Lasten [HEI].....	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Übersicht und Vergleich einiger Brennstoffzellen-Anlagen (Quelle: selbst erstellt nach Datenblättern der Hersteller)	28
Tabelle 4.1: Monatliche Messdaten für 2014 (Quelle: Betriebsinterne Dokumente, Ausschnitt im Anhang).....	34
Tabelle 4.2: Auswertungen der Messdaten für 2014. Grün: Höchster Jahreswert. Rot: Niedrigster Jahreswert (Quelle: selbst erstellt nach Tab. 4.1).....	35

Abkürzungsverzeichnis

AFC	Alkaline Fuel Cell (Alkalische Brennstoffzelle)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
EnEV	Energieeinsparverordnung
FCH JU	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
GuD	Gas- und Dampfturbinenprozess
IER	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell (Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle)
NIP	Nationales Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell (Phosphorsäure-Brennstoffzelle)
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (Polymerelektrolyt-Membran-Brennstoffzelle), oder: Proton Exchange Membrane Fuel Cell
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (Festoxid-Brennstoffzelle)

Symbolverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
H_o	Brennwert, oberer Heizwert	[kJ/kg]
H_u	Heizwert, unterer Heizwert	[kJ/kg]
I	Stromstärke	[A]
\dot{m}_B	Brennstoffmassenstrom	[kg/s]
P	Leistung	[kW]
P_{el}	Elektrische Leistung	[kW _{el}]
Q	Wärme	[kJ]
\dot{Q}	Wärmestrom	[kW]
\dot{Q}_{Nutz}	Nutzwärmestrom	[kW _{th}]
s_{abs}	Absolute mittlere Abweichung	[-], [%]
s_{rel}	Relative mittlere Abweichung	[-], [%]
T	Temperatur	[K], [°C]
U	Elektrische Spannung	[V]
W_{el}	Arbeit	[kJ]
\bar{x}	Mittelwert	[-]
ΔG^0	Freie Gibbsche Reaktionsenthalpie	[kJ/mol]
ΔH^0	Enthalpie der Reaktion	[kJ/mol]
Δs	Reaktionsentropie	[J/mol*K]
η	Wirkungsgrad	[-], [%]
η_c	Carnot-Wirkungsgrad	[-], [%]
η_{el}	Elektrischer Wirkungsgrad	[-], [%]
η_{ges}	Gesamtwirkungsgrad	[-], [%]
η_{ideal}	Idealer Wirkungsgrad	[-], [%]
η_{th}	Thermischer Wirkungsgrad	[-], [%]
σ	Stromkennzahl	[-]

1 Einleitung

Die durch Ausstoß von Treibhausgasen verursachte globale Erwärmung und absehbare Verknappung fossiler Energieträger stellen zwei der zentralen zu lösenden Probleme der heutigen Zeit dar. Vertreter aus Politik und Wirtschaft sowie Wissenschaftler und Ingenieure aus vielen Disziplinen stehen vor der Aufgabe, zukunftsfähige, nachhaltige Lösungen zu entwickeln. Auf der einen Seite werden Maßnahmen ergriffen, die durch energieeffizienten Betrieb von Maschinen und Anlagen zu Energieeinsparung führen. Auf der anderen Seite wird eine Energieerzeugung aus regenerativen Energiequellen angestrebt oder versucht die Energieumwandlung fossiler Energieträger mit möglichst hohem Gesamtwirkungsgrad zu erreichen, um damit den Primärenergieverbrauch zu senken. Letzteres lässt sich beispielsweise durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und dezentrale Energieversorgung erreichen. Neben den seit langem eingesetzten Blockheizkraftwerken (BHKW) werden in den letzten Jahren verstärkt stationäre Brennstoffzellen in Betracht gezogen. Im Gegensatz zu klassischen BHKW bieten diese viele Vorteile, die im Rahmen dieser Arbeit näher betrachtet werden. Wie alle KWK-Anlagen leisten auch stationäre Brennstoffzellen einen effektiven Beitrag zur Energie- und Emissionseinsparung.

Vor dem Hintergrund, dass fast 40% des Energieverbrauchs und ein Drittel der CO₂-Emissionen in Deutschland auf Gebäude entfallen, liegt in Maßnahmen zur Energieeinsparung im Bereich der Gebäudetechnik und Energieversorgung von Gebäuden ein enormes Potential zur Erreichung der Klimaschutzziele. Dies hat auch die Bundesregierung erkannt und mit der Energieeinsparverordnung (EnEV) klare Zielvorgaben dafür auf den Weg gebracht. Die immer weitere Verschärfung der EnEV-Auflagen für die nächsten Jahre stellt sowohl Eigentümer von Bestandsbauten als auch Bauherren von geplanten Neubauten vor die Herausforderung, energieeffiziente Lösungen vorzusehen. Brennstoffzellen könnten dabei eine wichtige Rolle spielen.

Mit dieser Arbeit soll der heutige Stand der Technik von stationären Brennstoffzellen im mittleren Leistungsbereich (Gewerbe und Industrie) analysiert werden, was auch die aktuelle Marktsituation mit einschließt. Im ersten Teil (Kapitel 2) soll zunächst eine Einführung in die Brennstoffzellen-Technologie auf ingenieurwissenschaftlicher und technischer Ebene gegeben werden. Dabei soll allerdings kein detaillierter Einblick in die physikalisch-chemischen Vorgänge im Inneren der Brennstoffzelle erfolgen, sondern nur das Grundprinzip der Technologie erläutert und die Energieflüsse über die äußeren Bilanzgrenzen einer Brennstoffzellen-Anlage betrachtet werden. Der Fokus dieses Kapitels liegt also auf Zusammenfassung und Darstellung von technischen Informationen, die benötigt werden, um den aktuellen Markt

sinnvoll beurteilen zu können (Kapitel 3) und eine energetische Analyse, u.a. mit Hinblick auf den Wirkungsgrad eines Praxisbeispiels (eine seit drei Jahren in Betrieb befindlichen Anlage in Hamburg (Kapitel 4)) nachvollziehen zu können. Abschließend sollen in einem Fazit (Kapitel 5) Erkenntnisse aus der Marktanalyse und der technischen Analyse des Praxisbeispiels zusammengefasst und über die gemeinsame Betrachtung dieser eine Beurteilung des heutigen Stands der Technik von stationären Brennstoffzellen gegeben sowie ein Ausblick auf zu erwartende zukünftige Entwicklungen in der Forschung, Entwicklung und im Markt dargestellt werden.

2 Brennstoffzellen-Technik

Mit der Brennstoffzelle verfügt man heute über eine Technologie, die breite Anwendungsmöglichkeiten und viele Vorteile bietet, jedoch nach wie vor viel Entwicklungspotential besitzt. Insbesondere die relativ hohen Kosten gegenüber anderen Technologien machen ihren wirtschaftlichen Einsatz schwierig, was jedoch in den letzten Jahren und Jahrzehnten durch Steigerung der Wirkungsgrade und kostengünstigere Herstellung immer besser gelingt. Nach der Entdeckung des Grundprinzips der Brennstoffzelle 1839 durch C. F. Schönbein und W. Grove fand sie vorerst keine Anwendungsmöglichkeiten. Erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts kam sie verstärkt zum Einsatz. Zu Beginn war sie aufgrund hoher Kosten insbesondere für Bereiche interessant, in denen Kosten eine untergeordnete Rolle spielen – in der Raumfahrt und im Militär, speziell vor allem bei U-Booten. Inzwischen gibt es Produkte aus vielen unterschiedlichen Bereichen, die Brennstoffzellen-Technik verwenden. Mobile Brennstoffzellen finden sich in Kraftfahrzeugen, auf Schiffen und in der Luftfahrt, hier jedoch nur zur Hilfsenergieversorgung des Bordnetzes von Flugzeugen. Portable Anwendungen z.B. für die Versorgung von Handys und Laptops stellen die kleinsten Ausführungen von Brennstoffzellen dar. Stationäre Brennstoffzellen versorgen Gebäude oder Industrieanlagen mit Strom und ggf. auch mit Wärme. Als ein besonderer Anwendungsbereich gilt dabei die Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) in Bereichen, wo Stromausfälle kritische Folgen haben können, etwa in Krankenhäusern oder Serverräumen. Es zeigt sich somit eine Vielseitigkeit in der Anwendung von Brennstoffzellen, wodurch man sich branchenübergreifende Synergieeffekte für die weitere Entwicklung erhofft. So können z.B. neue Entwicklungen im Bereich mobiler Brennstoffzellen kurze Zeit später auch für stationäre Brennstoffzellen umgesetzt werden und umgekehrt.

Im Bereich stationärer Brennstoffzellen findet sich eine große Bandbreite an Einsatzgebieten und Leistungsklassen. Die kleinste Leistungsklasse sind sogenannte Mikro-Blockheizkraftwerke. Diese Brennstoffzellen-Heizgeräte besitzen typischerweise eine Leistung um die 5 kW_{el} und eignen sich damit zur Hausenergieversorgung von Ein- oder Zweifamilienhäusern. Am anderen Ende der Leistungsskala stehen die Brennstoffzellen-Kraftwerke mit mehreren MW Leistung. Im mittleren Leistungsbereich finden sich Brennstoffzellen-Anlagen für den Bereich Gewerbe und Industrie, typischerweise mit Leistungen ab etwa 10 kW_{el} bis hin zu einigen hundert kW_{el}. Diese Arbeit legt ihr Hauptaugenmerk auf diese Art von stationären Brennstoffzellen im mittleren Leistungsbereich. Die Marktanalyse im Kapitel 3 betrachtet kleinere und größere Brennstoffzellen nur am Rande, hauptsächlich wird jedoch der Markt der Brennstoffzellen im mittleren Leistungsbereich analysiert und einige Hersteller

und Produkte dargestellt. In Kapitel 4 wird ein Praxisprojekt einer 100 kW-Brennstoffzellen-Anlage genauer untersucht und Messdaten ausgewertet. [GUM], [HEI], [KUR]

2.1 Vorteile stationärer Brennstoffzellen

Möchte man das Potential und die Vorteile von Brennstoffzellen beurteilen, macht es Sinn diese im Vergleich mit alternativen Technologien zu betrachten. Stationäre Brennstoffzellen konkurrieren in erster Linie mit konventionellen BHKW auf Basis einer Wärmekraftmaschine. Gegenüber diesen besitzen Brennstoffzellen-KWK-Anlagen einige Vorteile, die im Folgenden näher betrachtet werden sollen. Beide Anlagentypen wandeln die chemische Energie des Brennstoffs in elektrische Energie und nutzbare Wärme um, der Weg ist jedoch unterschiedlich, was Auswirkungen auf den theoretisch erreichbaren Wirkungsgrad hat. Wärmekraftmaschinen wandeln Wärme in mechanische Energie um. Konventionelle BHKW auf Basis einer solchen Wärmekraftmaschine können auf Grundlage eines Verbrennungsmotors, einer Gasturbine oder Stirlingmotors funktionieren. Die Wärme für den Kreisprozess stammt dabei stets von der Verbrennung des Brennstoffs. Die mechanische Energie wird mit Hilfe eines Generators schließlich in elektrische Energie umgewandelt. Betrachtet man allein den Wirkungsgrad des Wärmekraftmaschinen-Prozesses, so ist dieser durch den aus der Thermodynamik bekannten Carnot-Wirkungsgrad begrenzt:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_U}{T_O} \quad (2.1)$$

Der Carnot-Wirkungsgrad ist von der oberen Systemtemperatur T_O abhängig; je größer T_O , desto größer der Wirkungsgrad. Zudem ist er durch die Umgebungstemperatur T_U begrenzt. In einer Brennstoffzelle hingegen wird der Brennstoff, in der Regel Wasserstoff, nicht unter Freisetzung von Wärme verbrannt, sondern reagiert über elektrochemische Prozesse mit dem Sauerstoff. Da die Umwandlung der chemischen Energie in elektrische Energie dabei auf direktem Wege erfolgt und keinen Umweg über die Wärme nehmen muss, unterliegt der Wirkungsgrad von Brennstoffzellen nicht der Begrenzung des Carnot-Wirkungsgrades. Stattdessen ist der ideale Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle der Quotient aus freier Gibbscher Reaktionsenthalpie ΔG^0 des Brennstoffs und der Enthalpie der Reaktion ΔH^0 .

$$\eta_{\text{ideal}} = \frac{\Delta G^0}{\Delta H^0} \quad (2.2)$$

Liegt das Produktwasser in der Gasphase vor, wie dies üblicherweise bei Brennstoffzellen der Fall ist, rechnet man mit ΔG_u^0 , welches bei Standardbedingungen $\Delta G_u^0 = -228,6$ kJ/mol beträgt, sowie mit dem unteren Heizwert von Wasserstoff $\Delta H_u^0 = -241,8$ kJ/mol. Damit ergibt

sich für die hier genannten Werte ein idealer Wirkungsgrad von $\eta_{\text{ideal,u}} = 94,5\%$. Der Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Prozesstemperatur T kann mit

$$\eta_{\text{ideal}} = \frac{\Delta H_{\text{U}}^0 - T\Delta s}{\Delta H_{\text{U}}^0} \quad (2.3)$$

berechnet werden. In Diagramm 2.1 ist der Carnot-Wirkungsgrad sowie der ideale Wirkungsgrad von Brennstoffzellen in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Dabei wurde mit einer Umgebungstemperatur von $T_{\text{U}} = 25\text{ °C}$ gerechnet und die Reaktionsentropie Δs als näherungsweise konstant $\Delta s = -44\text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ angenommen.

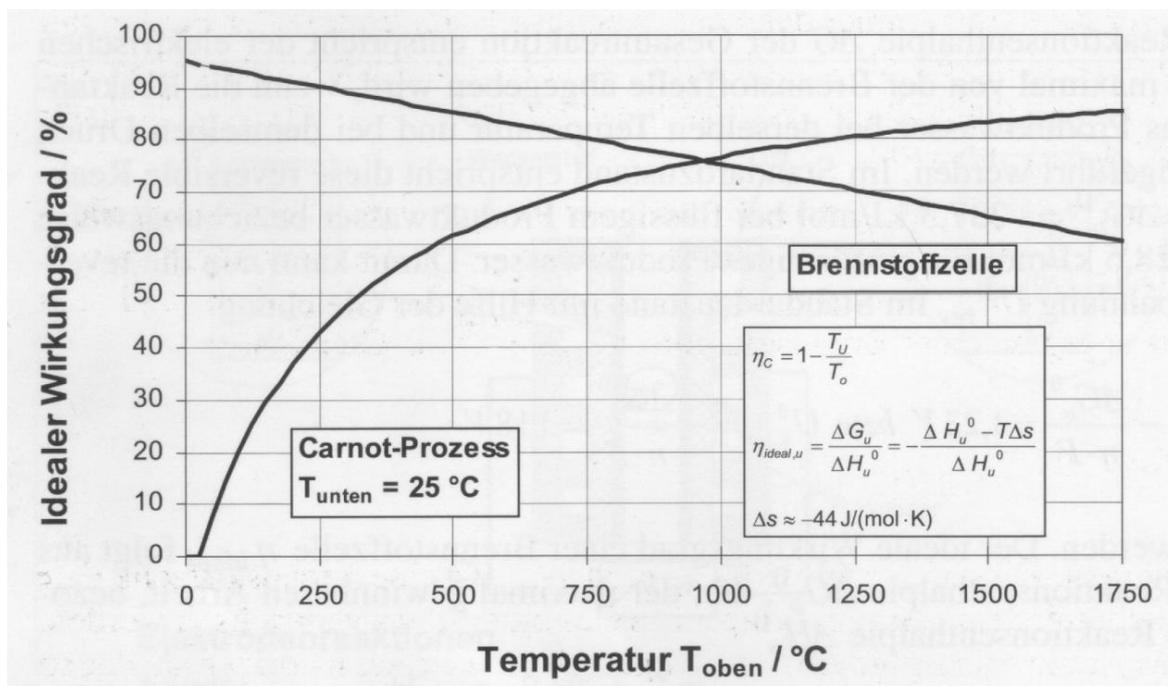


Abbildung 2.1: Vergleich des Carnot-Wirkungsgrades η_c mit dem idealen Brennstoffzellen-Wirkungsgrad $\eta_{\text{ideal,u}}$ [HEI, S. 6]

Dabei wird ein großer Nachteil von konventionellen BHKW, die dem Carnot-Prozess unterliegen, deutlich. Der Wirkungsgrad ist nur bei hohen Temperaturen groß, mit Abnahme der Temperatur nimmt auch der Wirkungsgrad stark ab. Brennstoffzellen hingegen besitzen auch bei niedrigen Temperaturen einen hohen Wirkungsgrad, der sogar mit abnehmender Temperatur zumindest theoretisch steigt. Dies schlägt sich auch in der Betrachtung des elektrischen Wirkungsgrades in Abhängigkeit der Leistung wieder. Wie in Diagramm 2.2 und 2.3 zu sehen, erreichen konventionelle Kraftwerke wie Gasturbinen zwar potentiell höhere Leistungen, allerdings sinkt ihr elektrischer Wirkungsgrad auch stark mit abnehmender Leistung, was sich insbesondere bei häufigem Teillastbetrieb als ein großer Nachteil erweist. Dagegen können Brennstoffzellen, insbesondere PEM- und PAFC-Typen auch bei niedrigen Leistungen und damit auch im Teillastbetrieb hohe elektrische Wirkungsgrade erzielen. [HEI], [GUM]

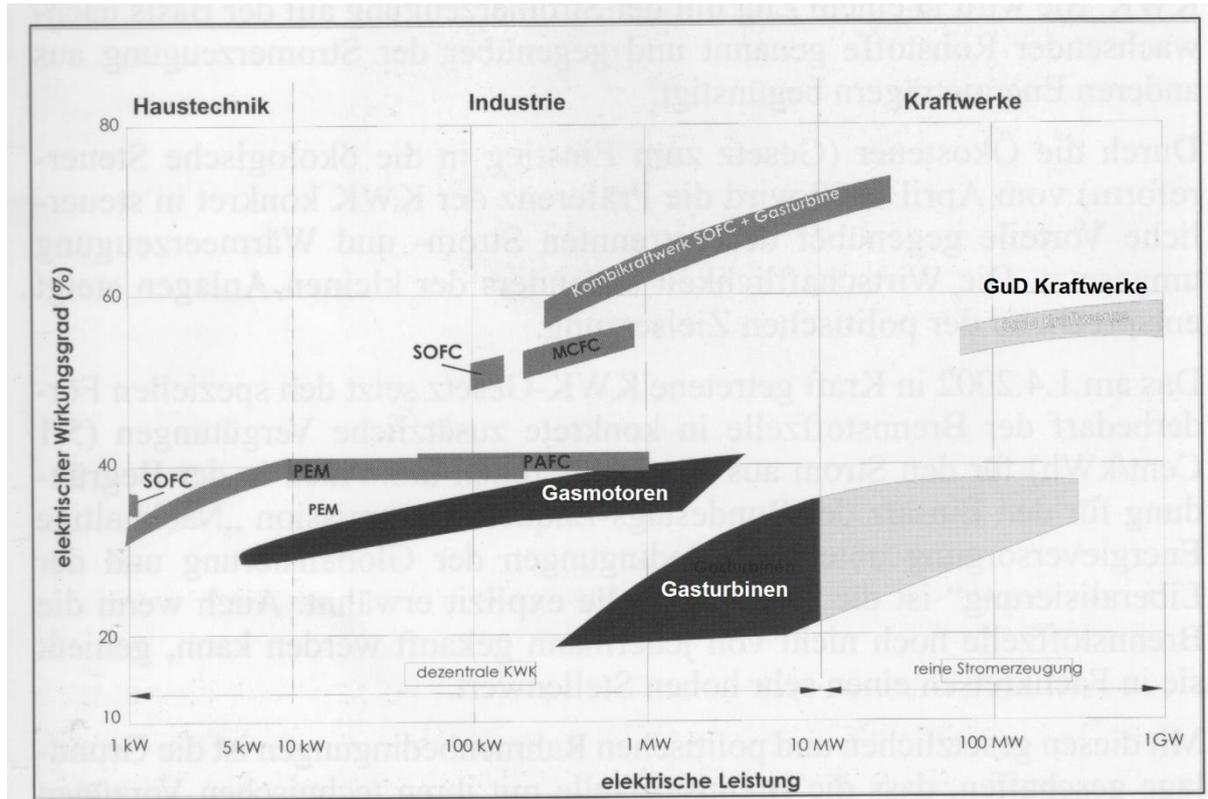


Abbildung 2.2: Elektrische Wirkungsgrade unterschiedlicher Techniken der Stromerzeugung (nach [GUM, S.6])

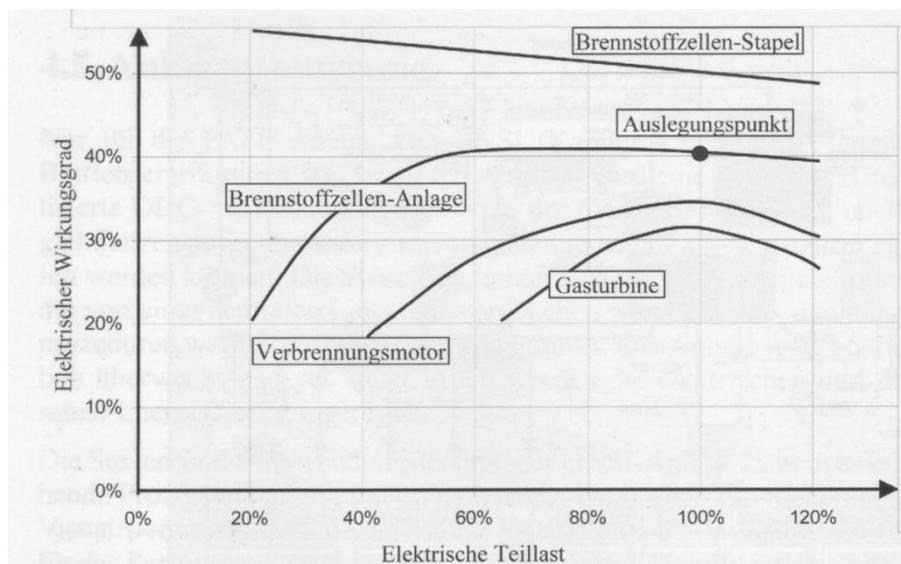


Abbildung 2.3: Typisches Teillastverhalten des elektrischen Wirkungsgrades von Brennstoffzellen, Verbrennungsmotoren und Gasturbinen [GUM, S.50]

Ein weiterer wesentlicher Vorteil von Brennstoffzellen liegt in den niedrigen Emissionen. Brennstoffzellen können je nach Typ mit reinem Wasserstoff oder auch mit fossilen Brennstoffen wie Erdgas oder mit Biogas betrieben werden. Beim Betrieb mit reinem Wasserstoff fällt lediglich Wasserdampf als Abgas an womit also keine umweltschädlichen Treibhausga-

se ausgestoßen werden. Der Betrieb mit Wasserstoff birgt jedoch einige Hindernisse. Da reiner Wasserstoff in der Natur nicht vorkommt, muss er erst unter Energieaufwand in einer Elektrolyse, d.h. dem Spalten von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff, hergestellt werden. Der Wasserstoff dient in dem Fall also nur als Speichermedium. Die nötige Energie für die Elektrolyse muss an anderer Stelle aus anderen Energiequellen erzeugt werden. Es gibt Vorschläge zur Erzeugung von Wasserstoff aus überschüssigen erneuerbaren Energien und Verteilung in Wasserstoff-Netzen. Dies würde jedoch einen großflächigen Ausbau einer Infrastruktur von Wasserstoff-Pipelines erfordern. Es gibt zahlreiche Beispiele, die die Funktionsfähigkeit solcher Wasserstoff-Verteilnetze belegen. Diese finden sich allerdings vor allem im industriellen Bereich, wo Wasserstoff oft in großen Mengen als Nebenprodukt entsteht und für andere industrielle Prozesse wiederum benötigt wird. So findet sich etwa im Ruhrgebiet ein derartiges Netz mit rund 240 km Länge. Auch wenn es also bereits Beispiele für derartige Netze im kleinen Maßstab gibt, ist ein großflächiger Ausbau zur Versorgung ganzer Städte und Länder zumindest in naher Zukunft unwahrscheinlich. [TÖP]

Während Brennstoffzellen in mobilen Anwendungen wie etwa in Fahrzeugen oder auf Schiffen an Wasserstoff-Tankstellen betankt werden können, gestaltet sich eine Versorgung stationärer Brennstoffzellen mit reinem Wasserstoff aufgrund der o.g. mangelnden Infrastruktur bisher als schwierig. Daher macht ein Betrieb mit reinem Wasserstoff nur dort Sinn, wo etwa im Zuge eines industriellen Prozesses Wasserstoff als Abfallprodukt anfällt. Aus diesem Grund wurden stationäre Brennstoffzellen entwickelt, die auch mit Erdgas oder Biogas betrieben werden können. Anders als beim Betrieb mit reinem Wasserstoff fallen hier dann zwangsläufig neben dem Wasserdampf-Abgas vor allem auch CO₂-Emissionen an. Im Gegensatz zu konventionellen Kraftwerken auf Verbrennungsbasis werden bei Brennstoffzellen jedoch nahezu keine Schadstoffe wie Stickoxide, unverbrannte Kohlenwasserstoffe oder Rußpartikel erzeugt (Abb. 2.4). Durch den hohen Wirkungsgrad und daraus folgendem geringen Brennstoffbedarf von Brennstoffzellen liegt zudem der CO₂-Ausstoß pro erzeugte Energiemenge niedriger als bei BHKW mit schlechteren Wirkungsgraden. [GUM]

Neben der Herstellung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien wird auch das sogenannte Power-to-Gas-Verfahren diskutiert. Bei diesem Verfahren wird der Wasserstoff-Elektrolyse eine Methanisierung nachgeschaltet. Hierbei wird aus dem erzeugten Wasserstoff und einem CO₂-Gas, das aus anderen CO₂-emittierenden Prozessen entnommen wird,

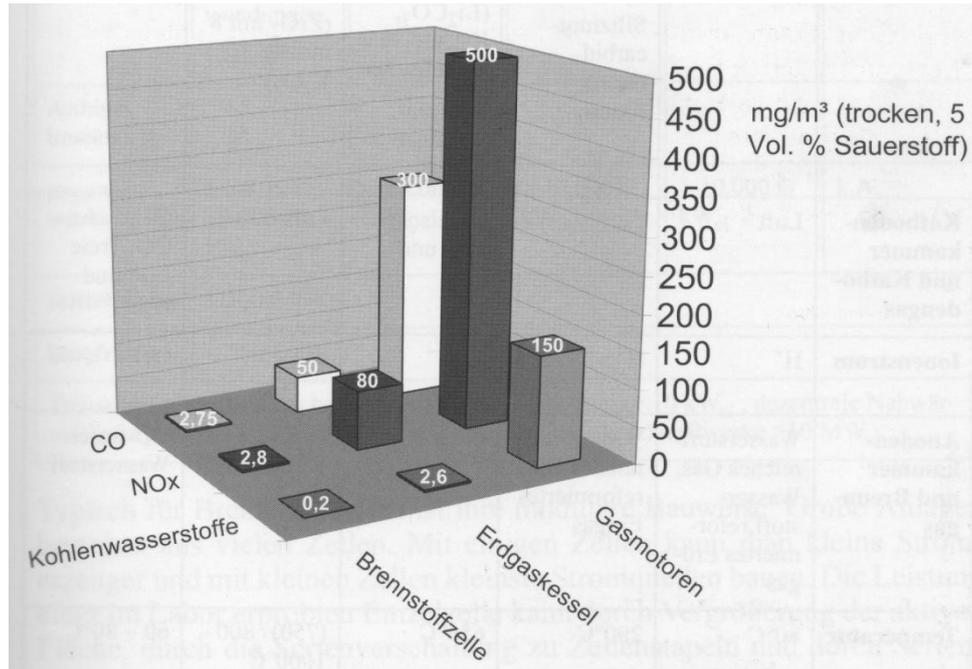


Abbildung 2.4: Vergleich der Schadstoffemissionen von thermischen Kraftwerken und Brennstoffzellen (Typ ONSI PC25C) [GUM, S. 7]

Methan (CH_4) synthetisiert. Um es von dem natürlich in Erdgas vorkommenden Methan abzugrenzen bezeichnet man ein derart hergestelltes Methan auch als Synthesegas. Dieses kann in Erdgasleitungen dem fossilen Erdgas beigemischt und letztendlich auch in stationären Brennstoffzellen verbraucht werden. [TÖP]

Schließlich wird der wartungs- und geräuscharme Betrieb von Brennstoffzellen als ein großer Vorteil angesehen. Da eine Brennstoffzelle im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren oder Gasturbinen keine beweglichen Teile besitzt, kommt es zu keinem mechanischen Verschleiß durch Reibung, was den Austausch von Bauteilen oder Ölwechsel überflüssig macht. Zudem ist die Brennstoffzelle selbst vibrations- und geräuscharm, was besonders im Hausbereich oder allgemein im städtischen Bereich von Vorteil ist. Lediglich Hilfsaggregate wie Gebläse und Pumpen erzeugen geringfügige Geräusche und erfordern eine regelmäßige Wartung, die sich in der Regel auf Austausch von Filtern und Funktionsprüfung von Bauteilen beschränkt. Die Zellstapel selbst besitzen jedoch eine begrenzte Lebensdauer, was sich in einer Verschlechterung des Wirkungsgrades nach einer gewissen Betriebsdauer bemerkbar macht, sodass diese üblicherweise nach einigen Jahren ausgetauscht werden müssen. Der gesamte Wartungsaufwand ist jedoch bei stationären Brennstoffzellen geringer als bei konventionellen BHKW. Die daraus resultierenden niedrigen Wartungskosten verbessern die Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellen im Betrieb, ebenso wie ihr hoher Wirkungsgrad und lange Lebensdauer. [GUM], [TÖP]

Genauere Daten zu Wirkungsgraden, Geräuschentwicklung etc. sind in Kapitel 3 an einigen marktverfügbaren Beispielen mit Herstellerangaben aufgeführt. Genauere Untersuchungen dazu und Auswertungen von Daten bietet das Praxisbeispiel aus Kapitel 4. Zu beachten ist, dass es sich bei diesen Angaben um Anlagen-Wirkungsgrade handelt. Diese sollten nicht mit den reinen Brennstoffzellen-Wirkungsgraden aus diesem Kapitel gleichgesetzt werden. Brennstoffzellen-Anlagen besitzen eine Vielzahl interner Widerstände und Verbraucher, etwa zur Gasaufbereitung und Prozessführung, die Energie benötigen und damit den Wirkungsgrad mindern.

2.2 Strom-Spannungs-Kurve

Ergänzend zu der Betrachtung des idealen Wirkungsgrades von Brennstoffzellen in 2.1 soll im Folgenden noch näher auf die theoretischen Grundlagen der elektrischen Leistung eingegangen werden. Diese berechnet sich als Produkt aus Spannung und Stromstärke:

$$P_{el} = U \cdot I \quad (2.4)$$

Die theoretisch maximal erreichbare Spannung einer Brennstoffzelle wird als thermoneutrale oder auch enthalpische Zellspannung U_{th} bezeichnet. Diese ideale Spannung wird jedoch in realen Brennstoffzellen nie erreicht, sondern unterliegt einer Reihe von Minderungseffekten. Eine anschauliche Darstellung bietet die Betrachtung einer Strom-Spannungs-Kurve einer Brennstoffzelle (Abb. 2.5). Während in Abb. 2.1 eine reversible Brennstoffzelle ohne Last betrachtet wurde, wird nun in Abb. 2.5 der Einfluss einer angelegten Last mit zunehmender Stromstärke I deutlich.

Man erkennt, dass selbst im stromlosen Zustand die enthalpische Zellspannung U_{th} nicht erreicht werden kann, sondern höchstens die reversible Zellspannung U_{rev} . Aufgrund im Inneren der Brennstoffzelle ablaufenden nicht idealen Prozesse liegt die sich real einstellende Klemmspannung sogar noch niedriger. Mit steigender Stromstärke kommt es zu weiteren Spannungsverlusten durch Überlagerung mehrerer Verlustmechanismen, die im Diagramm als Durchtrittsüberspannung ΔU_D , Widerstandsüberspannung ΔU_R und Konzentrationsüberspannung ΔU_{Diff} zu sehen sind. Damit ergibt sich der charakteristische Kurvenverlauf mit zunächst exponentiellen Abfall, anschließender linearer Abnahme und schließlich erneutem starken Abfall. Die als Fläche dargestellte elektrische Leistung, die mit Gleichung 2.4 berechnet werden kann, ist im Diagramm als Fläche dargestellt. Sie erreicht bei mittleren Strömen den größten Wert.

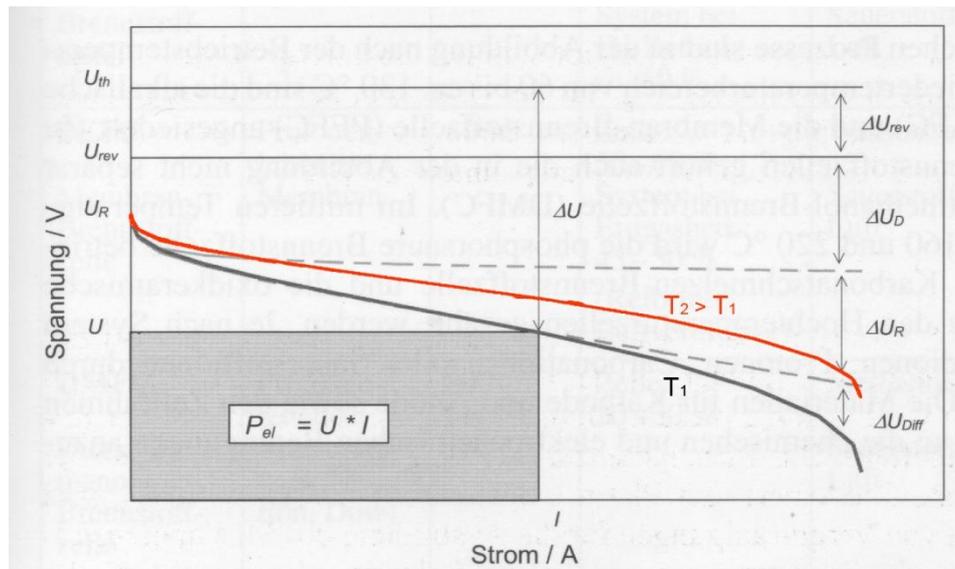


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung einer Strom/Spannungskennlinie (T_1). Weitere Kurve (rot) für eine höhere Betriebstemperatur ($T_2 > T_1$) (nach [HEI, S.7])

Zusätzlich hat insbesondere die Temperatur großen Einfluss auf die Zellspannung. In Abbildung 2.5 ist eine weitere Strom-Spannungskennlinie mit einer höheren Temperatur ($T_2 > T_1$) beispielhaft dargestellt. Mit höherer Betriebstemperatur sinken die Überspannungen und inneren Widerstände in der Zelle. Dadurch wird die Kurve flacher, zudem liegt sie höher, d.h. Zellspannung und damit auch die Leistung sind größer als bei niedrigen Temperaturen. Daher sind Hochtemperatur-Brennstoffzellen auch typisch für große Leistungsbereiche und Niedertemperatur-Typen eher für kleinere Leistungen (Näheres zu Brennstoffzellen-Typen siehe Kap. 2.4). Damit wird auch deutlich, weshalb der tatsächliche Wirkungsgrad von Brennstoffzellen (meist 30-50%) weit unter dem idealen Wirkungsgrad ($> 90\%$, vgl. Kap. 2.1) liegt. Die hier erwähnten inneren Verlustmechanismen führen zu Spannungsverlusten und damit auch niedrigeren Leistungen und elektrischen Wirkungsgraden. Zudem haben Temperatur, Druck und weitere Umgebungsbedingungen großen Einfluss. [HEI], [KUR]

2.3 Wirkungsgrad und Stromkennzahl

Bei der Berechnung des Wirkungsgrades von stationären Brennstoffzellen unterscheidet man, wie bei KWK-Anlagen üblich, zwischen dem elektrischen Wirkungsgrad η_{el} und thermischen Wirkungsgrad η_{th} . Diese ergeben sich aus der elektrischen Leistung bzw. abgeführten Nutzwärme im Verhältnis zum zugeführten Energiestrom, der sich aus dem unteren Heizwert des Brennstoffes (Wasserstoff, Erdgas etc.) und dessen Massenstrom ergibt:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{m}_B \cdot H_U} \quad (2.5)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{m}_B \cdot H_U} \quad (2.6)$$

Der Gesamtwirkungsgrad der KWK-Anlage ergibt sich aus der Summe der beiden Wirkungsgrade:

$$\eta_{ges} = \eta_{el} + \eta_{th} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{m}_B \cdot H_U} \quad (2.7)$$

Liegen Messdaten zur erzeugten Strom- und Wärmemenge sowie Brennstoffverbrauch über einen bestimmten Zeitraum vor, so kann ein durchschnittlicher Wirkungsgrad über den Zeitraum bzw. Nutzungsgrad $\bar{\eta}$ ermittelt werden:

$$\bar{\eta}_{el} = \frac{|W_{el}|}{m_B \cdot H_U} \quad (2.8)$$

$$\bar{\eta}_{th} = \frac{Q_{Nutz}}{m_B \cdot H_U} \quad (2.9)$$

$$\bar{\eta}_{ges} = \bar{\eta}_{el} + \bar{\eta}_{th} = \frac{|W_{el}| + Q_{Nutz}}{m_B \cdot H_U} \quad (2.10)$$

Bei den Formeln 2.7 und 2.10 sollte die Addition von elektrischer Energie und Wärme aus thermodynamischer Sicht kritisch beurteilt werden. Elektrische Energie ist reine Exergie, während Wärme je nach Umgebungs-Temperaturniveau aus einem Exergie- und Anergie-Anteil besteht. Da elektrische Energie damit als höherwertig angesehen wird, sollte für eine korrekte thermodynamische Betrachtung Strom und Wärme getrennt betrachtet werden. In der Praxis ist es jedoch üblich, einen Gesamtwirkungsgrad aus der Summe der beiden Wirkungsgrade gemäß Formel 2.7 zu berechnen, da er einen anschaulichen Kennwert für KWK-Anlagen bietet und sie gut vergleichbar macht. In den späteren Berechnungen dieser Arbeit wird daher diese Formel angewandt. [1]

Eine weitere oft bei KWK-Anlagen angegebene Größe ist die Stromkennzahl σ . Sie beschreibt das Verhältnis aus elektrischer Leistung zur genutzten Abwärmeleistung der Anlage:

$$\sigma = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Nutz}} \quad (2.11)$$

Sie ist keine feste Größe der Anlage, sondern vom jeweiligen Betriebszustand abhängig. Für die Stromkennzahl kann ebenfalls ein gemittelter Wert berechnet werden:

$$\bar{\sigma} = \frac{|W_{el}|}{Q_{Nutz}} \quad (2.12)$$

Da Brennstoffzellen-KWK-Anlagen je nach Betriebszustand mehr Strom als Nutzwärme oder umgekehrt mehr Nutzwärme als Strom erzeugen können, kann ihre Stromkennzahl größer oder auch kleiner 1 betragen. [KUR], [WIN]

Stationäre Brennstoffzellen können wie jede KWK-Anlage sowohl wärmegeführt, d.h. an den Wärmebedarf angepasst, als auch stromgeführt betrieben werden. In der Regel ist ein wärmegeführter Betrieb sinnvoller, da überschüssiger Strom leichter in ein öffentliches Netz eingespeist werden kann und der Wärmeverbrauch eines Gebäudes einen über den Tagesverlauf gleichmäßigeren Verlauf aufweist als der oft unetwige Stromverbrauch. Dort wo eine Speicherung größerer Wärmemengen oder Einspeisung überschüssiger Wärme in ein Nah- oder Fernwärmenetz möglich ist, bietet sich jedoch auch die Möglichkeit einer stromgeführten Betriebsweise. Auch in Fällen, wo der Strombezug teuer ist empfiehlt sich ein stromgeführter Betrieb. Dies ist beispielsweise im Inselbetrieb der Fall, d.h. bei Gebäuden in weit vom öffentlichen Stromnetz abgelegenen Gegenden. [GUM], [KUR]

2.4 Brennstoffzellen-Typen

Es gibt verschiedene Typen von Brennstoffzellen, die je nach verwendetem Elektrolyt eingeteilt werden. Fünf davon, die im Bereich stationärer Brennstoffzellen Anwendung finden, sollen im Folgenden näher betrachtet werden:

- AFC: Alkaline Fuel Cell (Alkalische Brennstoffzelle)
- PEFC oder PEMFC: Polymer Electrolyte (Membrane) Fuel Cell (Polymerelektrolyt-Membran-Brennstoffzelle) (auch: Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
- PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell (Phosphorsäure-Brennstoffzelle)
- MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell (Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle)
- SOFC: Solid Oxide Fuel Cell (Festoxid-Brennstoffzelle)

Je nach Betriebstemperatur unterteilt man diese in Nieder- und Hochtemperatur-Brennstoffzellen. Zu den Niedertemperatur-Brennstoffzellen, die den Temperaturbereich 60-200°C abdecken, zählen AFC, PEMFC und PAFC. Ihnen ist gemein, dass sie keinen chemisch gebundenen Wasserstoff wie z.B. in Methan (CH_4) verarbeiten können, sondern reinen Wasserstoff (H_2) oder zumindest ein wasserstoffreiches Gas benötigen. AFC-Typen gelten als besonders empfindlich etwa gegen CO_2 , sodass sie mit hochreinem Wasserstoff und Sauerstoff betrieben werden müssen, was also auch die Zufuhr von Luft ausschließt. Die

Typen MCFC und SOFC ordnet man den Hochtemperatur-Brennstoffzellen zu. Sie decken den Bereich 650-1000°C ab. Die hohe Betriebstemperatur sorgt dafür, dass Wasserstoff vom Brennstoff (z.B. Methan) direkt im Brennstoffzellen-Prozess abgespalten wird. Damit können Hochtemperatur-Brennstoffzellen direkt mit diversen Erdgas- oder Biogas-Arten betrieben werden. Doch auch stationäre Brennstoffzellen-Anlagen vom Typ PEMFC und PAFC werden heute üblicherweise mit Erdgas oder Biogas betrieben. Hierfür müssen sie allerdings mit einer Reihe von Apparaten ausgestattet werden, die der Gasaufbereitung in mehreren Stufen dienen. In der ersten Stufe steht die Reformierung mit Wasserdampf, in der zweiten die sogenannte Shift-Reaktion und in der dritten das Trennen von CO und H₂. Am Ende dieses Gasaufbereitungsprozesses steht ein H₂-reiches Gas, das der PEMFC oder PAFC zugeführt werden kann. Die Aufbereitungsprozesse, insbesondere die stark endotherme Reaktion im Reformier der ersten Stufe, benötigen Energie, die in Form von Wärme zugeführt wird. Diese wird intern aus dem Brennstoffzellen-Prozess abgeführt und dem Reformier zugeführt, womit die Nutzwärmeleistung und Wirkungsgrad der Anlage sinken. In Abbildung 2.6 sind die einzelnen Stufen der Gasaufbereitung im Zusammenhang mit den passenden Brennstoffzellen-Typen schematisch dargestellt. In Kapitel 3.3 ist zu jedem Brennstoffzellen-Typ mindestens ein Beispiel einer marktverfügbaren Anlage aufgeführt.

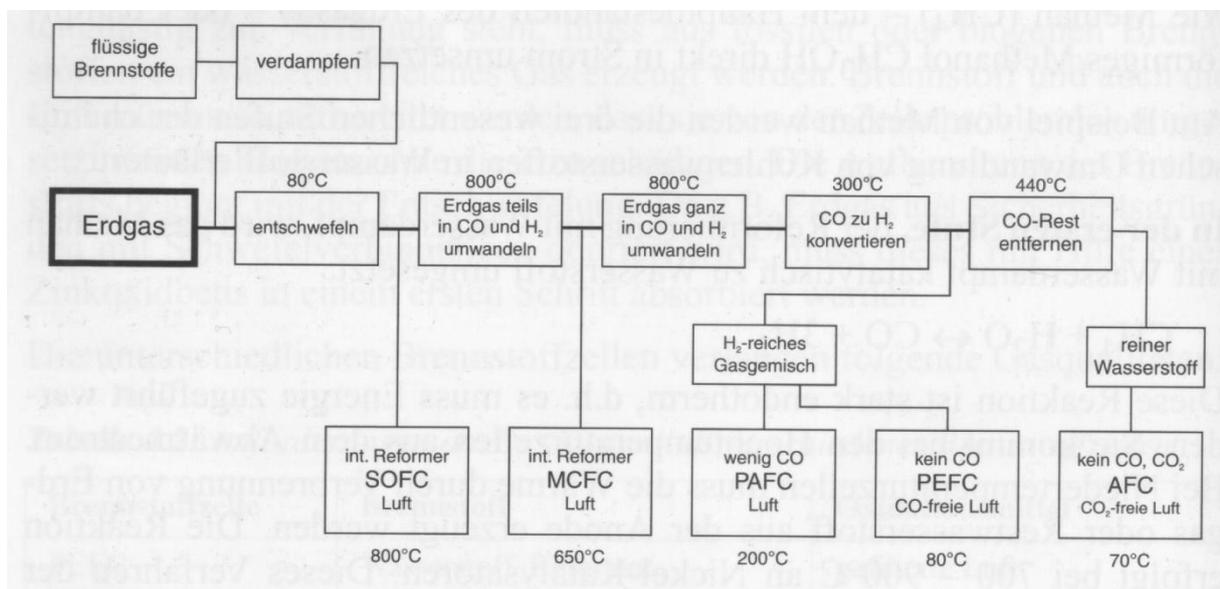


Abbildung 2.6: Aufbereitung von Erdgas für die fünf Brennstoffzellen-Typen [GUM, S. 42]

3 Marktanalyse

Die kommerzielle Nutzung der Brennstoffzellen-Technologie im stationären Bereich begann gegen Ende des 20. Jahrhunderts, nachdem die Ölkrise 1973 einige amerikanischen Unternehmen dazu veranlasste die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen zur stationären Energieversorgung aufzunehmen. Das zunehmende Umweltbewusstsein Ende der 80er Jahre weckte zudem das Interesse der breiten Öffentlichkeit, wodurch Forschungsanstrengungen deutlich verstärkt wurden. Seit dem wurden eine Vielzahl von Produkten und Anlagen entwickelt und erfolgreich in der Praxis eingesetzt. Dennoch besteht heute nach wie vor ein enormes Potential zur weiteren Verbesserung und Entwicklung.

Für eine Analyse des heutigen Marktes und voraussichtlichen zukünftigen Entwicklungen muss zwischen den verschiedenen Leistungsklassen und Herkunftsländern der Hersteller differenziert werden. Am weitesten ausgereift sind kleine Brennstoffzellen-Heizgeräte für Ein- und Zweifamilienhäuser. Als Vorreiter im Bereich stationärer Brennstoffzellen galten bisher die USA, Japan und Südkorea. Doch auch in Deutschland hat sich zumindest für derartige Brennstoffzellen-Heizgeräte im Hausbereich in den letzten Jahren ein beachtlicher Markt entwickelt. Viele deutsche Hersteller bieten seit kurzem marktreife Produkte an oder stehen kurz vor der Markteinführung. Seit einigen Jahren ist in Deutschland ein Trend zu beobachten, wonach immer mehr Unternehmen, die bisher vor allem als Heizkessel-Hersteller bekannt waren, die Entwicklung und Markteinführung eines Gerätes auf Brennstoffzellen-Basis anstreben. Dieser Trend profitiert wohl zum einen vom wachsenden Umweltbewusstsein in Deutschland, zum anderen von der Verbesserung des energetischen Gebäudestandards, welcher zu geringeren Erdgasverbräuchen führt. Als eine treibende Kraft hinter dem Trend gilt daher die Erwartung der Gaswirtschaft dadurch entstehende Absatzverluste kompensieren zu können. Mikro-BHKW auf Basis von Brennstoffzellen eignen sich nämlich aufgrund ihres hohen elektrischen Wirkungsgrades auch für gut gedämmte Häuser mit geringem Wärmebedarf zur Verstromung von Erdgas. [WIN] Der Markt für größere Brennstoffzellen-Anlagen ($> 10 \text{ kW}_{\text{el}}$ bis mehrere MW_{el} , Bereich Gewerbe und Industrie) konnte sich hingegen in Deutschland noch nicht so gut entwickeln. Zwar sind viele Anlagen in Deutschland in Betrieb, allerdings stammen diese überwiegend von Herstellern der anderen o.g. Länder. Aufgrund der positiven Erfahrungen der letzten Jahre im kleineren Leistungsbereich und dem politischen Willen innovative KWK-Technologien wie diese zu fördern, könnte dies jedoch bald auch in Deutschland eine Entwicklung antreiben. Versuche dazu gab es bereits von mehreren deutschen Firmen, nur wurde bisher in vielen Fällen die Entwicklung eingestellt, z.B. von Siemens Westinghouse und MTU (vgl. Kap. 3.3.3). [HEI], [WIN]

3.1 Kosten

Genauere und aktuelle Zahlen zu Investitionskosten liegen für diese Arbeit nicht vor, da die Hersteller selbst dazu keine Angaben in ihren Produktpräsentationen im Internet machen. Als ein Anhaltspunkt können jedoch die Angaben betrachtet werden, die das Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart 2014 ermittelt hat. [2] So kann für gewerbliche Brennstoffzellen-KWK-Anlagen von Investitionskosten in Höhe von 2.500 €/kW_{el} (für PEM-Anlagen) über 4.000 €/kW_{el} (PAFC), 6.670 €/kW_{el} (MCFC) bis hin zu 11.000 €/kW_{el} (SOFC) ausgegangen werden. Als Zielwert der Hersteller gilt zumindest für MCFC- und SOFC-Anlagen jeweils 1.250 €/kW_{el}. Das „Virtuelle Institut Strom zu Gas und Wärme“ gab in einem Bericht vom Januar 2015 Investitionskosten von 8.000-10.000 €/kW_{el} für Brennstoffzellen-KWK-Anlagen über 100 kW_{el} an. [3] Zu beachten ist, dass in beiden Quellen von nicht näher spezifizierten Investitionskosten die Rede ist. Ob diese lediglich aus den Modulkosten bestehen oder ob darin auch weitere Leistungen wie Lieferung und Installation enthalten sind, ist nicht erwähnt. Demgegenüber sollen Angaben zu Investitionskosten konventioneller BHKW auf Verbrennungsbasis betrachtet werden, die einer für 2014/2015 erstellten Broschüre mit BHKW-Kenndaten entnommen wurden [ASU].

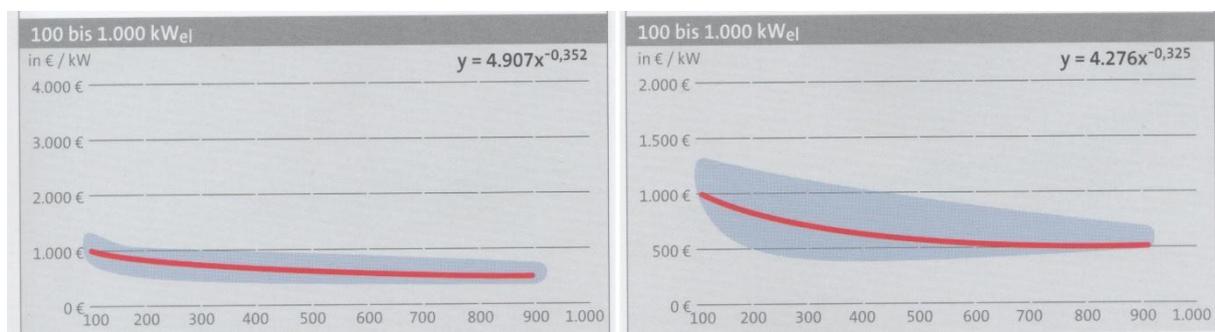


Abbildung 3.1: Richtwerte für Modulkosten in €/kW für Erdgas-BHKW (links) und Biogas-BHKW (rechts) [ASU, S. 11]

Diese enthält u.a. Richtwerte für die Modulkosten. Den Diagrammen (Abb. 3.1) ist zu entnehmen, dass die Modulkosten abhängig von der Leistung etwa 500-1.000 €/kW_{el} für Erdgas- und Biogas-BHKW im Bereich 100 bis 1.000 kW_{el} betragen. Die Grafik 3.2 veranschaulicht die o.g. Kosten und die Preisunterschiede zwischen Brennstoffzellen-Anlagen und konventionellen BHKW. Da die Angaben für Brennstoffzellen und BHKW aus jeweils unterschiedlichen Quellen stammen und die genaue Zusammensetzung der Investitionskosten daher nicht eindeutig ist, sollte beachtet werden, dass die Werte unter Umständen nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Dennoch ist eine deutliche Tendenz zu erkennen. Die

Grafik verdeutlicht und betont die weit verbreitete Ansicht, dass Brennstoffzellen heute nach wie vor als recht teuer angesehen werden.

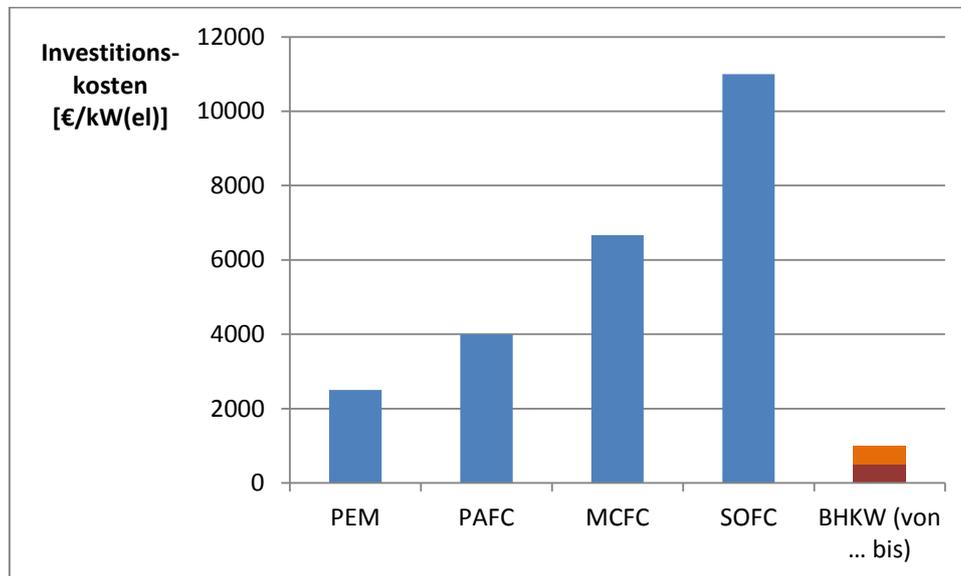


Abbildung 3.2: Vergleich der Investitionskosten (nicht näher spezifiziert) unterschiedlicher Brennstoffzellen-Anlagentypen und BHKW auf Verbrennungsbasis (Quelle: eigene Darstellung, Daten aus [2], [ASU])

Eine häufige Forderung lautet daher, dass Brennstoffzellen-Systeme günstiger werden müssen, wenn sie sich auf dem Markt durchsetzen wollen. Dabei muss natürlich beachtet werden, dass Brennstoffzellen zwar höhere Investitionskosten als BHKW haben, durch ihre hohen Wirkungsgrade und niedrigen Wartungskosten allerdings niedrigere Betriebskosten. Ab einem gewissen Punkt kann dies eine Verkürzung der Amortisationszeit bewirken. Für eine zukünftige Verbesserung der Wirtschaftlichkeit gilt daher insbesondere für Brennstoffzellen-Systeme, dass nicht nur die Investitionskosten sinken müssen, sondern auch eine weitere Verbesserung der Wirkungsgrade und Standzeiten (im Sinne von Lebensdauer) angestrebt werden sollte. Zudem erhofft man sich zumindest bei den zahlreichen Neuentwicklungen kleinerer Anlagen für den Hausbereich eine Verringerung der Herstellkosten durch Serienfertigung mit hohen Stückzahlen, sobald die Produkte erst einmal marktreife erreicht haben und die Nachfrage hoch genug ist. Durch die höheren Absatzzahlen von kleinen Brennstoffzellen-Anlagen oder auch Brennstoffzellen im mobilen Bereich sinken damit auch die Preise der Zulieferer von Komponenten, etwa der Stack-Hersteller. Da diese auch in größeren Brennstoffzellen-Anlagen verbaut werden kann dies also auch für Anlagen im Leistungsbereich Gewerbe und Industrie eine Vergünstigung nach sich ziehen. [GUM]

Was den heutigen Stand angeht gelten Brennstoffzellen-Systeme jedoch nach wie vor als teuer, wodurch sie selten von Gebäudeinhabern oder Unternehmen in Betracht gezogen werden. Daher sind heute besonders Unternehmen gefragt, die bereit sind eine Anlage trotz schlechter Wirtschaftlichkeit und langer Amortisationszeit in Betrieb zu nehmen und sich dafür als umweltbewusstes und zukunftsweisendes Unternehmen zu präsentieren. Als ein Beispiel dafür gilt das Praxisprojekt aus Kapitel 4. Solche Projekte sind in der aktuellen Entwicklungsphase besonders wichtig, weil die Hersteller damit eine Möglichkeit erhalten ihre nahezu ausgereiften Produkte in der Praxis zu erproben und die gesammelten Betriebserfahrungen und Erkenntnisse in die weitere Entwicklungsarbeit einfließen lassen können. Ferner können auch öffentlich finanzierte Leuchtturmprojekte einen ähnlichen Beitrag leisten, wie z.B. die 250-kW-Brennstoffzellen-Anlage von FuelCell Energy, die 2014 im neu gebauten Bundesministerium für Bildung und Forschung in Berlin installiert wurde (näheres dazu in Kap. 3.3.1.3). Für potentielle Kunden, die vor den hohen Investitionskosten einer Brennstoffzellen-Anlage zurückschrecken bietet das Contracting-Modell eine gute Methode zur Finanzierung. Dabei stellt der Gebäudenutzer den Installationsraum für eine Anlage einem Netzbetreiber zur Verfügung, muss also die Investitionskosten nicht selbst tragen. Ein Vertrag zwischen Gebäudenutzer und Netz- bzw. Anlagenbetreiber regelt die Abnahme von Strom und Wärme sowie die Vergütung. Schließlich bieten staatliche Fördermittel eine wichtige Grundlage zur Finanzierung. [TÖP], [2], [4]

3.2 Förderungsmöglichkeiten

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) fördert im Rahmen der Förderrichtlinie „Brennstoffzellen für hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen“ Investitionen in brennstoffzellenbasierte KWK-Anlagen. Gefördert werden sowohl kleine Anlagen zur Hausenergieversorgung als auch große KWK-Anlagen zur Energieversorgung größerer Liegenschaften bzw. von Industrieanlagen. Antragsberechtigt sind Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft und Gebietskörperschaften, nicht jedoch Hersteller von Geräten oder Komponenten. Die Richtlinie ist Teil des 2008 gestarteten und noch bis Ende 2016 laufenden „Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ (NIP). Dieses führte bereits in der Vergangenheit dazu, dass viele Hersteller Marktreife erlangen konnten, die aufgrund der hohen Herstellkosten noch nicht die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit erreichten. Um das Technologiepotential ausnutzen und weitere marktreife Produkte generieren zu können, wird derzeit eine Fortführung des NIP um weitere zehn Jahre diskutiert. Insgesamt rechnet man mit hohen Primärenergieeinsparungen und möchte den anstehenden Markthochlauf unterstützen. [5]

Auch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) fördert Brennstoffzellen und begründet dies u.a. damit, dass der Betrieb von Brennstoffzellen aktuell nur mit Hilfe einer Förderung wirtschaftlich darstellbar sei. So belief sich die Projektförderung im Jahr 2014 auf 24,1 Millionen Euro für insgesamt 112 Projekte, zudem wurden 28 Projekte mit einer Förderung von insgesamt 21,5 Millionen Euro über die gesamte Projektlaufzeit neu angestoßen. Bisher angekündigte Produkte zur Markteinführung setzen die Verwendung von Technologie aus Japan, Südkorea und Nordamerika voraus, daher liegt der Schwerpunkt der BMWi-Förderung in der Unterstützung von Material- und Komponentenherstellern im Inland. [6]

3.3 Aktuelle Hersteller

Im Folgenden sollen einige Hersteller von großen Brennstoffzellen-Anlagen dargestellt werden, die ein oder mehrere Produkte auf dem Markt anbieten oder aktuell dabei sind ein Produkt zu entwickeln. Bei ersteren wird jeweils mindestens eins der Produkte näher beschrieben sowie ggf. Beispiele für derzeit in Deutschland installierte Anlagen aufgeführt. Die folgende Ausführung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll lediglich einen Eindruck über den heutigen Markt mit einigen der bekanntesten Hersteller und den aktuellen Stand ihrer Produkte vermitteln. Detaillierte technische Daten zu den vorgestellten Produkten finden sich in der Tabelle 3.1 in Kap. 3.4.

3.3.1 Marktverfügbare Brennstoffzellen

3.3.1.1 Ballard Power Systems

Das kanadische Unternehmen Ballard Power Systems, Inc. gilt als global führend im Bereich PEM-Brennstoffzellen. Sie bieten Produkte für die Bereiche Notstromerzeugung, dezentrale Stromerzeugung, Materialtransport und mobile Anwendungen in Bussen an. Ihre Brennstoffzellen-Anlage ClearGen® wird mit reinem Wasserstoff betrieben und ist ein modular aufgebautes System mit skalierbarer Leistung. Das Grundmodell besitzt eine elektrische Leistung von 1 MW und kann in 500 kW-Schritten erweitert werden. Damit eignet es sich sowohl zur Grund- wie auch Spitzenlastversorgung von Gebäuden, Liegenschaften oder größeren Versorgungsnetzen. [7], [8]

Bekanntestes Beispiel einer Ballard-Anlage in Deutschland ist ein Demonstrationsprojekt, bei dem eine 250 kW-Anlage in Kooperation mit dem Energiekonzern Alstom 2000-2003 in Berlin betrieben wurde. Ziel des Vorhabens war der Gewinn von Betriebserfahrungen. [HEI], [9]

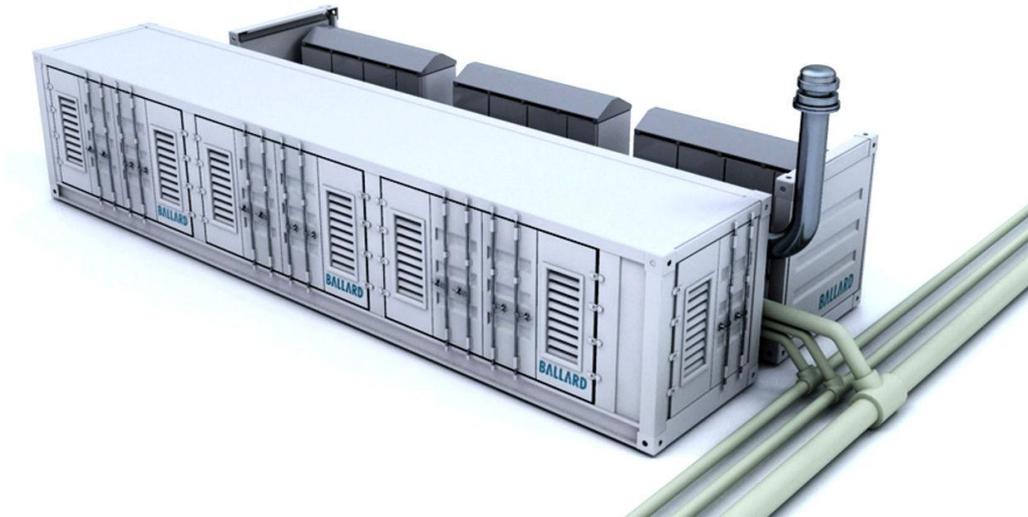


Abbildung 3.3: Ballard-Anlage ClearGen® (Quelle: www.ballard.com)

3.3.1.2 Doosan Fuel Cell America

Doosan Fuel Cell America, Inc. gehört zu der südkoreanischen Doosan Group. Das Unternehmen mit Sitz in South Windsor, Connecticut, USA existiert unter diesem Namen seit 2014, als ClearEdge Power durch Doosan aufgekauft wurde und mit einem weiteren amerikanischen Unternehmen – Fuel Cell Power – fusionierte. Ihre Brennstoffzellen-Anlage wird unter dem Namen PureCell® Model 400 vermarktet. Die Anlage vom Typ PAFC hat eine elektrische Leistung von 400 kW und kann mit Erdgas betrieben werden. Der Hersteller betont die Möglichkeit, mehrere Anlagen in einem Verbund zusammenzuschalten. Das größte im Datenblatt aufgeführte System besteht aus 60 Einheiten mit einer Gesamtleistung von 24 MW.



Abbildung 3.4: Doosan-Anlage PureCell® (Quelle: www.doosanfuelcell.com)

3.3.1.3 FuelCell Energy

FuelCell Energy ist spezialisiert auf größere Brennstoffzellen-Kraftwerke auf MCFC-Basis. Der Hauptsitz liegt in Danbury, Connecticut, USA. Seit dem Frühjahr 2012 besteht zudem mit der FuelCell Energy Solutions GmbH ein deutsches Tochterunternehmen mit Sitz in Dresden und einer Produktionsstätte im bayrischen Ottobrunn. Ihr Produktportfolio reicht von dem Modell DFC®250 EU mit 250 kW elektrischer Leistung bis zum DFC®3000 EU mit 2,8 MW. Zudem bieten sie mit dem DFC®ERG™ (Direct FuelCell Energy Recovery Generation) ein Hybridsystem aus Brennstoffzelle und Gasturbine für große Kraftwerke im Bereich mehrerer MW. Sämtliche Anlagen sind auf den Betrieb mit Erdgas ausgelegt. [10], [11], [12]



Abbildung 3.5: FuelCell Energy DFC®-Kraftwerk in einer Brauerei (Quelle: www.fces.de)

Der seit Herbst 2014 eröffnete Neubau des Bundesministeriums für Bildung und Forschung in Berlin verfügt über eine DFC®250 EU-Brennstoffzelle zur Gebäudeenergieversorgung. Das 54.000 m² große Gebäude wurde dank seines innovativen Energiekonzeptes, zu dem neben der Brennstoffzelle die Ausstattung mit Photovoltaik-Anlagen, LED-Beleuchtung und eine Absorptionskältemaschine gehören, mit dem Nachhaltigkeitszertifikat in Gold ausgezeichnet. FuelCell Energy Solutions betonte, dass es sich bei dieser Brennstoffzelle um die erste wieder in Deutschland gefertigte Anlage handelt und als Türöffner zum europäischen Markt dienen soll. Denkbar wären auch Brennstoffzellenparks mit 15 bis 60 MW, wie man sie heute bereits in den USA und Südkorea findet. Derzeit werden die Produktionskosten mit 2.800 Euro pro kW angegeben. Man hofft auf politische Unterstützung, um die Produktion steigern und damit die Preise senken zu können. [13], [14], [15]

3.3.1.4 Bloom Energy

Das 2001 gegründete Unternehmen Bloom Energy aus Sunnyvale, California, USA, entwickelt und produziert Brennstoffzellen-Anlagen auf SOFC-Basis. Einen großen Vorteil der SOFC-Technologie sieht das Unternehmen in der Verwendung von kostengünstigen Materialien wie Oxidkeramik statt teurer Metalle wie Platin oder korrosiver Materialien auf Säure-Basis, wie sie bei anderen Brennstoffzellen-Typen verwendet werden. Bloom Energy vermarktet seine Produkte unter dem Namen Energy Server®, wodurch die Möglichkeit verdeutlicht werden soll, je nach Leistungsbedarf mehrere solcher Server in einem Verbund zusammenzuschließen. Ein einzelnes Modul, beispielsweise vom Typ ES-5710 besitzt eine elektri-

sche Leistung von 250 kW und kann sowohl mit Erdgas als auch Biogas betrieben werden. Bloom Energy hat viele namhafte Kunden in den USA wie Walmart und Coca Cola oder auch öffentliche Einrichtungen wie das Verteidigungsministerium oder die NASA. Vor allem Technologieunternehmen, die wegen ihrer großen Rechenzentren einen hohen Strombedarf haben finden sich in der Kundenliste von Bloom Energy. Zu den bekanntesten zählen Google, Apple, Yahoo und eBay. [16], [17]



Abbildung 3.6: Bloom Energy Server® (Quelle: www.bloomenergy.com)

3.3.1.5 N2telligence / Fuji Electric

Die N2telligence GmbH wurde 2006 als Start-Up-Unternehmen gegründet. Die Geschäftsidee der beiden Unternehmensgründer und ehemaligen Airbus-Ingenieure bestand darin, eine bereits etablierte Brennstoffzellen-Anlage um eine Brandschutzfunktion zu erweitern. Dabei wird der für den Brennstoffzellen-Prozess benötigte Sauerstoff nicht wie sonst aus der Atmosphäre, sondern aus einem geschlossenen Raum entnommen. Dadurch wird der Sauerstoffgehalt im Raum von 20 auf 15 bis 17 Prozent gesenkt. Dies reicht bereits aus, um Brände effektiv zu verhindern, ohne die Gesundheit von Personen zu gefährden, die sich für kurze Zeit in dem Raum aufhalten. Als potentielle Kunden werden daher besonders Unternehmen und Einrichtungen gesehen, die sowohl ihren Strom- bzw. Wärmebedarf mit einer eigenen Anlage decken als auch besonders brandempfindliche Güter schützen wollen, wie z.B. Serverräume, Archive oder Lager. Diese Methode wird sogar seit 2015 von der VdS Schadensverhütung als Brandschutzmaßnahme anerkannt und die Anlagen entsprechend zertifiziert. Damit kann z.B. auf Sprinkleranlagen, die bei bestimmten Gebäuden von Behörden vorgeschrieben sind, verzichtet werden. Seit 2007 besteht eine Kooperation mit dem japanischen Brennstoffzellen-Hersteller Fuji Electric. Die PAFC-Anlagen von Fuji Electric werden um die Brandschutz-Komponenten erweitert und nach Deutschland bzw. ins Zielland geliefert. Lediglich die Dachaufbauten werden vor Ort installiert. Ab Mitte 2016 soll die Ferti-

gung komplett in Deutschland erfolgen. Eine erste Demonstrationsanlage wurde in der N2telligence-Niederlassung in Wismar installiert. Der Firmensitz befindet sich in Hamburg.



Abbildung 3.7: N2telligence-Anlage QuattroGeneration (Quelle: www.n2telligence.com)

Die in Kapitel 4 behandelte Anlage ist ebenfalls von N2telligence geliefert und installiert worden, wenngleich in diesem Fall auf die Brandschutzfunktion verzichtet wird. Das Modell TriGeneration liefert Strom, Wärme und optional mithilfe einer integrierten Absorptionskältemaschine auch Kälte. Das Modell QuattroGeneration verfügt zudem über die o.g. Brandschutzfunktion. Beide Modelle werden mit Erdgas betrieben. Ein weiteres Modell, HyCogeneration ist für den Betrieb mit reinem Wasserstoff ausgelegt. Die elektrische Leistung wird mit jeweils 100 kW angegeben, ist jedoch erweiterbar. [18], [19], [20] Das Zentrum für Brennstoffzellen-Technik (ZBT) an der Universität Duisburg-Essen verfügt seit Mai 2015 über eine 100 kW-Anlage von Fuji Electric, die das Gebäude mit Strom und Wärme versorgt. Die sauerstoffreduzierte Abluft wird in diesem Fall jedoch nicht zum Brandschutz, sondern für Hypoxie-Forschung genutzt, d.h. Wissenschaftler eines medizinischen Instituts erforschen die Auswirkungen sauerstoffarmer Luft auf den menschlichen Körper. [21] In Frankfurt am Main versorgt seit 2013 eine Anlage von N2telligence vom Typ QuattroGeneration ein Rechenzentrum der Firma Equinix. Seit Dezember 2014 versorgt eine TriGeneration-Anlage ein Gebäude der Minenaufsicht in Johannesburg, Südafrika. [22]

3.3.1.6 AFC Energy

Das britische Unternehmen AFC Energy ist spezialisiert auf AFC-Anlagen. Da diese nur mit reinem Wasserstoff betrieben werden können, beschränkt sich ihr Einsatz im Wesentlichen auf industrielle Anwendungen. In einem aktuellen Projekt baut das Unternehmen eine Anlage

in Stade bei Hamburg. Das unter dem Namen „Power Up“ laufende Projekt soll insgesamt 11,6 Millionen Euro kosten, wovon 6,1 Millionen Euro aus EU-Fördermitteln im Rahmen des Förderprogramms „Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking“ (FCH JU) beigesteuert werden. Die Anlage soll im fertigen Zustand 500 kW in das öffentliche Stromnetz über die Stadtwerke Stade leisten. Den Wasserstoff liefert eine bereits bestehende Industrie-Anlage des Unternehmens Air Products & Chemicals. Beginn des Projekts war im April 2013, die Fertigstellung ist für Ende 2015 geplant. Ein Teil der Anlage konnte bereits im August 2015 in Betrieb genommen werden. Das Vorhaben gilt als wichtiges Demonstrationsprojekt zur kommerziellen und technischen Praxistauglichkeit von AFC-Anlagen. [23], [24], [25] , [26]



Abbildung 3.8: Anlage von AFC Energy (Quelle: www.afcenergy.com)

3.3.1.7 Nedstack

Nedstack ist ein niederländischer Hersteller von PEM-Brennstoffzellen. Laut eigenen Angaben sind sie der größte unabhängige Hersteller von PEM-Brennstoffzellen-Stapeln in Europa und der zweitgrößte der Welt. Ihre Produkte weisen laut Datenblatt lediglich 2-10 kW_{el} auf. Da sie jedoch auch größere Anlagen durch „stacken“ (stapeln) vieler solcher Brennstoffzellen planen und installieren, versorgen sie auch Kunden mit Bedarf im Bereich mehrerer hundert kW oder einiger MW. Seit 2011 steht eine aus 12.600 PEM-Brennstoffzellen bestehende Anlage von Nedstack in einer Industrieanlage des Unternehmens Solvay in Belgien. Wasserstoff gilt als typisches Nebenprodukt der Chlor-Industrie, welcher in diesem Fall in der PEM-Anlage Verwendung findet. Die 1 MW elektrische Leistung und 500 kW Wärme der PEM-Anlage werden wiederum für weitere Prozesse der Industrieanlage genutzt. Im Februar

2015 erhielt Nedstack den Auftrag zum Bau eines 2 MW-Brennstoffzellen-Kraftwerks für eine Industrieanlage in China. Die Anlage wird damit das größte PEM-Kraftwerk der Welt sein und damit die 1 MW-Anlage in Belgien als derzeit größte PEM-Anlage ablösen. [27], [28]



Abbildung 3.9: Anlage von Nedstack (Quelle: www.nedstack.com)

3.3.2 In Entwicklung befindliche Brennstoffzellen

Das finnische Unternehmen Conviaon entwickelt derzeit SOFC-Systeme für den Leistungsbe-
reich 50-300 kW. Conviaon wurde 2012 gegründet und übernahm das Unternehmen Wärtsilä.
Die Markteinführung ist für 2015 geplant. [29], [30]

Auch Mitsubishi Hitachi Power Systems arbeitet derzeit an einem SOFC-System. Eine Be-
sonderheit dieser Anlage liegt in der Kombination aus SOFC-Brennstoffzelle, Gasturbine und
Dampfkraftprozess (GuD). [31]



Abbildung 3.10: Anlage von Convion (in Entwicklung) (Quelle: www.convion.fi)



Abbildung 3.11: Anlage von Mitsubishi Hitachi Power Systems (in Entwicklung) (Quelle: www.mhps.com)

3.3.3 Eingestellte und übernommene Projekte

Bei der Recherche aktueller Hersteller sind häufig Namen von Unternehmen oder Projekten zu lesen, die nicht mehr existieren, eingestellt oder von anderen Firmen übernommen wurden. Das häufig in der Literatur und in älteren Meldungen erwähnte Unternehmen UTC Fuel Cells wurde 2013 von ClearEdge Power übernommen, welches wiederum wie in 3.3.1.2 erwähnt von Doosan Fuel Cell America aufgekauft wurde. [32]

Lange Zeit galt eine von MTU Friedrichshafen GmbH bzw. deren Tochterunternehmen MTU CFC Solutions entwickelte Brennstoffzelle als aussichtsreiches Produkt. Die unter dem Namen HotModule bekannte MCFC-Anlage besaß eine Leistung von 245 kW elektrisch und

180 kW thermisch. Nach mehreren Übernahmen gelangte das Unternehmen Ende 2005 an die Tognum AG, die Ende 2010 die Beendigung sämtlicher Aktivitäten im Bereich stationärer Brennstoffzellen beschloss. Tognum fiel diese Entscheidung, weil man mittelfristig keine Möglichkeiten zur profitablen Vermarktung von Brennstoffzellen sah. Dies passte nicht zu den kurzfristigen Profitzielen des Konzerns. Damit wurde auch die geplante Serienfertigung des HotModule eingestellt. Eine bereits fertiggestellte Fertigungsstraße in Ottobrunn, die etwa 50 Anlagen pro Jahr produzieren sollte, wurde geschlossen. 2010 erwarb FuelCell Energy diverse Vermögensgegenstände von MTU. In den ehemaligen Fertigungshallen von MTU produziert die FuelCell Energy Solutions GmbH heute ihre MCFC-Anlagen (vgl. Kap. 3.3.1.3). [33], [34] In Hamburg erlangte das HotModule Bekanntheit durch eine 2006 in der HafenCity in Betrieb genommene Anlage. Das Pilotprojekt lief in erster Linie zu Probezwecken und war daher auf drei Jahre Laufzeit beschränkt. [35]

3.4 Zusammenfassende Darstellung

Eine übersichtliche Darstellung einiger in Kapitel 3.3.1 vorgestellten Produkte bietet die Tabelle 3.1 mit einigen wichtigen Kennwerten, die den Datenblättern der Anlagen entnommen wurden. Eine zusammenfassende Bewertung dieser findet sich in Kapitel 5. Die Anlagen von AFC Energy und Nedstack finden sich nicht in der Tabelle, da die Hersteller kein Datenblatt für ein konkretes Produkt zur Verfügung stellen, sondern Anlagen je nach Bedarf konzipieren.

Tabelle 3.1: Übersicht und Vergleich einiger Brennstoffzellen-Anlagen (Quelle: selbst erstellt nach Datenblättern der Hersteller)

					
Bild					
Hersteller	Ballard	Doosan Fuel Cell America	FuelCell Energy	Bloom Energy	N2telligence (Fuji Electric)
Modell	ClearGen® Multi-MW Systems	PureCell Model 400	DFC®300	ES-5710	QuattroGeneration
Land	Kanada	Südkorea / USA	USA / Deutschland	USA	Deutschland (Japan)
Typ	PEM	PAFC	MCFC	SOFC	SOFC
el. Leistung	1 MW	400 kW	300 kW	250 kW	100 kW
th. Leistung	950 kW	498 kW	k.A.	k.A.	54 kW
el. Wirkungsgrad	40%	41%	47%	52-60%	k.A.
th. Wirkungsgrad	k.A.	49%	k.A.	k.A.	53%
Gesamtwirkungsgrad	k.A.	90%	k.A.	k.A.	27%
Brennstoff	Wasserstoff	Erdgas	Erdgas	Erdgas, Biogas	Erdgas, Biogas
Geräuschentwicklung	< 80 dB (7 m)	< 65 dB(A) (10 m)	65-72 dB(A) (3 m)	< 70 db(A) (1,82 m)	< 70 dB(A) (1 m)
Maße (L x B x H)	BZ-Modul: 2,9 x 2,4 x 9 m Elektr. Modul: 2,9 x 2,4 x 6,3 m	8,74 x 2,54 x 3,02 m	6,1 x 6,1 x 4,6 m	8,1 x 2,6 x 2,1 m	Haupteinheit: 3,3 x 1,9 x 2,2 m Hilfsaggregate: 3,0 x 0,6 x 2,2 m
Gewicht	40.000 + 15.000 kg	27.200 kg	33.600 kg	19.400 kg	k.A.
Aktueller Stand	marktfähig	marktfähig	marktfähig	marktfähig	in Entwicklung
Quelle Datenblatt	www.ballard.com	www.doosanfuelcell.com	www.fces.de	www.bloomenergy.com	www.n2telligence.com

(grün: selbst berechnete Werte aus den anderen Tabellenwerten)

4 Brennstoffzellen-Projekt Autohaus Hamburg

Im Folgenden soll eine Brennstoffzellen-Anlage analysiert werden, die seit 2012 in einem Autohaus in Hamburg in Betrieb ist. In der Marktanalyse aus Kapitel 3 wurde allgemein der Markt stationärer Brennstoffzellen analysiert und einige Hersteller und Produkte vorgestellt. Ziel dieses Kapitels ist nun, diese Marktanalyse durch ein Praxisprojekt zu ergänzen, bei dem eine konkrete Anlage näher betrachtet, Betriebserfahrungen aus 3 Jahren Betrieb untersucht und Messdaten zu Energieverbrauch und -erzeugung ausgewertet und bewertet werden. Als Quellen dienen Tabellen mit Messwerten und sonstige Dokumente, die von Mitarbeitern des Autohauses und Automobil-Herstellers zur Verfügung gestellt wurden sowie mündliche und telefonische Aussagen der Mitarbeiter und des Lieferanten der Brennstoffzelle (N2telligence). Fotografische Aufnahmen der Anlage wurden im Rahmen eines Besprechungs-Termins im Autohaus am 14.07.2015 selbst erstellt (Abb. 4.1 und 4.2).



Abbildung 4.1: Brennstoffzellen-Anlage beim Autohaus in Hamburg. Logo des Automobilunternehmens auf Wunsch zensiert (Quelle: eigene Aufnahme vom 14.07.2015)



Abbildung 4.2: Brennstoffzellen-Anlage beim Autohaus in Hamburg. Logo des Automobilunternehmens auf Wunsch zensiert (Quelle: eigene Aufnahmen vom 14.07.2015)

4.1 Beschreibung der Anlage

4.1.1 Aufbau

Bei der besagten Anlage handelt es sich um eine erdgasbetriebene PAFC-Anlage von N2telligence/Fuji Electric vom Typ TriGeneration. Das Autohaus wurde vor der Installation der Brennstoffzelle mit Strom und Fernwärme aus dem öffentlichen Netz versorgt, heute deckt die Anlage einen Teil des Bedarfs. Der Automobil-Konzern startete vor einigen Jahren ein Programm zur Verbesserung der Umweltfreundlichkeit und Energieeinsparung einiger seiner Autohäuser. Die Filiale in Hamburg-Wandsbek wurde energetisch saniert und mit der Brennstoffzelle ausgestattet. Die Anlage wurde in Japan gebaut, nach Hamburg geliefert, installiert und schließlich im August 2012 in Betrieb genommen. Laut Hersteller-Angaben besitzt sie eine Leistung von 100 kW elektrisch und 120 kW thermisch. Im Inneren besteht die als Container ausgeführte Anlage im Wesentlichen aus dem PAFC-Brennstoffzellen-Stack, einem Reformer und weiteren Apparaten zur Erdgas-Vorbehandlung, Wärmetauschern mit Auskopplung für einen Nieder- und Hochtemperaturkreis, einer Steuerungseinheit sowie Notrückkühlern. Auf die optional zur Verfügung stehende Absorptionskältemaschine wurde hier verzichtet, da man sich entschieden hat Kälte nach wie vor mit den bereits bestehenden Klimaanlage zu erzeugen. Auch für die Brandschutzfunktion des Modells QuattroGeneration besteht kein Bedarf. Die Notrückkühler dienen dazu ein Überhitzen der Anlage zu verhindern. Dies kann bei einer Störung, beispielsweise beim Ausfall einer Pumpe der Fall sein, wodurch die Vorlauftemperatur auf ein kritisches Maß steigt. Außerdem kann bei sehr niedriger Wärmeabnahme, etwa im Sommerbetrieb eine Notkühlung notwendig

sein. Neben dem fünfgeschossigen Hauptgebäude mit Verkaufsfläche und Büroräumen gehört auch eine Service-Werkstatt zum Gelände. Die Brennstoffzelle versorgt beide Gebäude mit Strom. Überschüssiger Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist und vergütet, umgekehrt wird auch Strom bezogen, wenn der Bedarf größer ist als die Leistung der Anlage. Die Wärme wird jedoch nur an die Service-Werkstatt geliefert, nicht jedoch an das Verkaufsflächen-/Bürogebäude. Da eine Ankopplung der Brennstoffzellen-Anlage an das recht alte Netz der Heizungsanlage des Gebäudes mit einigen Komplikationen verbunden gewesen wäre, entschied man sich dagegen. In der Service-Werkstatt wird die Wärme zur Beheizung der Räume und Warmwasserbereitung genutzt. Die Wärme des Hochtemperatur-Kreises der Brennstoffzellen-Anlage hat eine Temperatur von 80-90 °C und wird ganzjährig in das Fernwärme-Netz eingespeist. Die Niedertemperatur mit 40-50 °C deckt im Frühjahr und Herbst (8-12 °C Außentemperatur) den Wärmebedarf der Service-Werkstatt und wird im Winter (Außentemperatur < 8 °C) durch die Hochtemperatur ergänzt. Im Sommer (> 12 °C) muss nicht benötigte Wärme des Niedertemperatur-Kreises ggf. durch die Notrückkühler abgeführt werden. Die Möglichkeit der Einspeisung der Hochtemperatur in das öffentliche Fernwärmenetz verbessert die Wirtschaftlichkeit der Anlage erheblich, weil sie damit ganzjährig überwiegend im Volllastbetrieb laufen kann. Während Einspeisungen von Strom in öffentliche Netze weit verbreitet sind, gilt eine Einspeisung in Fernwärmenetze als technisch weniger sinnvoll und ist daher unüblich. In diesem Fall gab es ein Entgegenkommen des Netzbetreibers, der sich bereit erklärt hat die in den Rücklauf des Fernwärmenetzes eingespeiste Wärme abzunehmen und 1:1 mit der vom Autohaus bezogenen Fernwärme zu vergüten. Damit wirkt das Fernwärmenetz wie ein großer Pufferspeicher für die Wärme. In Fällen, wo eine derartige Einspeisung nicht zur Verfügung steht muss überschüssige Wärme entweder anderweitig genutzt werden, etwa für eine Absorptionskältemaschine oder die Anlage im Teillastbetrieb gefahren werden, was ihre Wirtschaftlichkeit verschlechtert, da der Wirkungsgrad sinkt. Die Investitionskosten der Anlage betragen rund 967.000 €. Dies entspricht für diese 100 kW_{el}-Anlage 9.670 €/kW_{el}. Informationen zur genauen Aufschlüsselung der Investitionskosten liegen nicht vor, d.h. es ist nicht bekannt ob darin z.B. auch Lieferungs- und Installationskosten enthalten waren. Das Projekt wurde ohne öffentliche Fördergelder realisiert.

4.1.2 Betriebserfahrungen bis heute

Seit ihrer Inbetriebnahme am 19.07.2012 (öffentliche Inbetriebnahme: August 2012) war die Anlage bis heute etwa drei Jahre weitestgehend ununterbrochen in Betrieb. Die gesammelten Erfahrungen liefern wichtige Erkenntnisse für Anlagenbetreiber und -hersteller. Im ersten Betriebsjahr gab es einige Vorkommnisse, die jedoch alle behoben werden konnten. Wäh-

rend der Problembehebung konnte die Anlage teilweise unter Maximallast in Betrieb bleiben. Im Oktober 2012 wurde die Verwendung eines falschen Erdgas-Brennwertes erkannt, was mit einem Software-Update behoben wurde. Im Dezember 2012 kam es zu einem Frostschaden am Tischkühler, der daraufhin ausgetauscht und die Verwendung von Glykol als Frostschutzmittel eingeführt wurde. Im Sommer 2013 fiel die Fernwärme-Pumpe aus, die daraufhin ausgetauscht wurde. Grundsätzlich werden Wartungen vierteljährlich durchgeführt. Die Instandhaltungskosten betragen durchschnittlich 9.200 Euro netto pro Jahr. Ein Wartungsjahr beinhaltet drei Inspektionen und eine Wartung. Für die jährliche Wartung ist eine Betriebsunterbrechung von ca. drei Tagen notwendig. Die Wartungsarbeiten bestehen im Wesentlichen aus Überprüfung bzw. Austausch von Sicherheitsventilen, Gassensoren, Gebläsen, Lüftern, Pumpen und der Batterie für die unterbrechungsfreie Stromversorgung (jeweils alle 2-3 Jahre) sowie dem Inverter (alle 4 oder 8 Jahre). Einige weitere Wartungsarbeiten wie der Austausch von Filtern können auch im Betrieb erfolgen. Nach Ablauf von ca. 60.000 Betriebsstunden sollte der Brennstoffzellen-Stack und der Reformer ausgetauscht werden. Derzeit prognostiziert man, dass dies etwa 8 Jahre nach Inbetriebnahme notwendig sein wird. Die Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen aktuelle Aufnahmen der Anlage, in Bild 4.3 ist ein Screenshot aus der Anlagen-Leittechnik zu sehen. Weitere Bilder finden sich im Anhang.

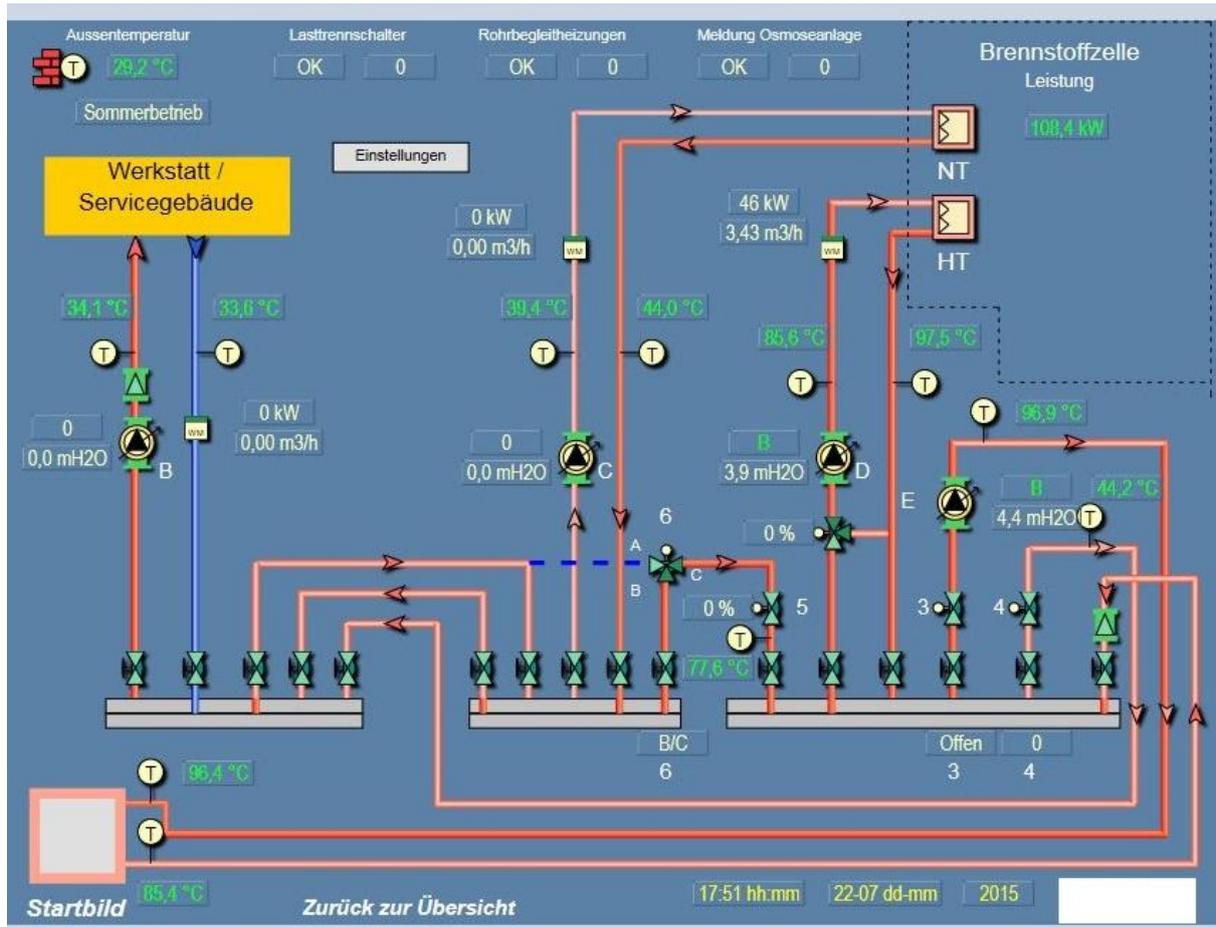


Abbildung 4.3: Screenshot vom Anlagenschaubild mit aktuellen Messwerten (Quelle: Betriebsinterne Dokumente)

4.2 Auswertung von Messdaten

Die Anlage ist mit Messtechnik ausgestattet, die diverse Messwerte im 4-16 Minuten-Takt aufzeichnet und in einer Datenbank speichert. Ein ursprünglich geplanter und von einigen Mitarbeitern erlaubter Zugriff auf diese Daten wurde jedoch im Nachhinein von der Geschäftsführung des Autohauses verwehrt. Daher beschränkt sich die folgende Auswertung auf monatliche Daten, die in Form von Tabellen zur Verfügung gestellt wurden. Es liegen monatliche Daten zum Bezug von Fernwärme, Strom und Erdgas sowie die jeweiligen Kosten für die Jahre 2011-2014 zur Verfügung. Da aus diesen Daten jedoch nicht ersichtlich ist, wie viele kWh jeweils von der Brennstoffzelle geliefert wurden, bieten sie nur bedingt Erkenntnisse über die Wirksamkeit der Anlage. Zu beachten ist nämlich, dass parallel zur Installation der Brennstoffzellen-Anlage eine umfangreiche energetische Sanierung der Gebäude erfolgte. Es lässt sich mit den vorliegenden Daten daher nicht nachvollziehen, welcher Anteil an Energieeinsparung auf die Sanierung und welcher auf die Verwendung der Brennstoffzelle zurückzuführen ist.

Für das Jahr 2014 liegen jedoch genauere Daten vor, die im Folgenden ausgewertet werden sollen. Ziel dieser Analyse soll sein, zu untersuchen wie sich der elektrische, thermische und Gesamt-Wirkungsgrad im Jahresverlauf ändern und mögliche Ursachen dafür zu identifizieren. Insbesondere soll ein möglicher Zusammenhang zwischen den Wirkungsgraden und der Auslastung der Anlage, d.h. elektrische Leistung und Wärmeabgabe untersucht werden. In der Tabelle 4.1 (Quelldokument in der Anlage) sind für 2014 monatliche Daten zu Erdgasverbrauch sowie erzeugte Strom- und Wärmemenge der Brennstoffzelle angegeben. Für die weiteren Berechnungen werden nur die Werte des Heizwertes H_U verwendet. Die Werte für den Brennwert H_O finden keine Verwendung und sind nur deshalb in der Tabelle enthalten, weil sie auch in der Original-Quelle gelistet sind.

Tabelle 4.1: Monatliche Messdaten für 2014 (Quelle: Betriebsinterne Dokumente, Ausschnitt im Anhang)

	Erzeugte Strommenge	Brennstoffbedarf	Brennstoffbedarf	Wärmemengenzähler Stand HT+NT	Tage	Stunden
	kWh	H_U/H_i in kWh	H_O/H_S in kWh	kWh		
Januar	73.197	204.133	224.546	90.700	31	744
Februar	67.395	184.527	202.980	81.000	28	672
März	69.171	189.842	208.826	76.800	31	744
April	65.026	183.293	201.622	69.800	30	720
Mai	77.445	214.678	236.146	75.200	31	744
Juni	67.352	187.392	206.131	55.400	30	720
Juli	72.959	202.393	222.632	55.000	31	744
August	64.709	182.489	200.738	55.200	31	744
September	65.383	180.858	198.944	58.000	30	720
Oktober	73.340	206.510	227.161	81.400	31	744
November	70.431	201.587	221.746	93.400	30	720
Dezember	71.792	205.165	225.682	93.300	31	744
Summe	838.200	2.342.867	2.577.154	885.200	365	8.760
s_{abs}	3344	10505	11556	12572		
s_{rel} (%)	4,79	5,38	5,38	17,04		

Mit den in Kapitel 2.2 aufgeführten Formeln wurde jeweils ein monatlicher durchschnittlicher Wirkungsgrad bzw. Nutzungsgrad sowie die Stromkennzahl berechnet. Da der Erdgasverbrauch nicht als Massenstrom, sondern bereits in kWh angegeben ist, erübrigt sich die in den Formeln dargestellte Umrechnung über den Heizwert. In der Tabelle 4.2 sind die berechneten Werte dargestellt.

In beiden Tabellen (4.1 und 4.2) ist zudem die Streuung bzw. absolute mittlere Abweichung eingetragen. Diese wurde berechnet mit

$$s_{\text{abs}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (4.1)$$

mit n als Anzahl der Werte ($n = 12$), dem Messwert x_i und dem Mittelwert \bar{x} . Außerdem wurde zur besseren Vergleichbarkeit die relative mittlere Abweichung mit

$$s_{\text{rel}} = \frac{s_{\text{abs}}}{\bar{x}} * 100 \text{ (\%)} \quad (4.2)$$

berechnet. In der Tabelle 4.2 wurde außerdem die durchschnittliche elektrische, thermische und Gesamt-Leistung über die Anzahl der Stunden im jeweiligen Monat (siehe Tabelle 4.1)

Tabelle 4.2: Auswertungen der Messdaten für 2014. Grün: Höchster Jahreswert. Rot: Niedrigster Jahreswert (Quelle: selbst erstellt nach Tab. 4.1)

	Durchschnittliche Leistung			Durchschnittlicher Wirkungsgrad			Durchschn. Strom- kennzahl $P_{\text{el}}/Q^{\text{i}}_{\text{nutz}}$
	elektrisch	thermisch	gesamt	elektrisch	thermisch	gesamt	
	P_{el}	$Q^{\text{i}}_{\text{nutz}}$	$P_{\text{el}} + Q^{\text{i}}_{\text{nutz}}$	η_{el}	η_{th}	η_{ges}	
	kW	kW	kW	%	%	%	
Jan	98,4	121,9	220,3	35,9	44,4	80,3	0,81
Feb	100,3	120,5	220,8	36,5	43,9	80,4	0,83
Mär	93,0	103,2	196,2	36,4	40,5	76,9	0,90
Apr	90,3	96,9	187,3	35,5	38,1	73,6	0,93
Mai	104,1	101,1	205,2	36,1	35,0	71,1	1,03
Jun	93,5	76,9	170,5	35,9	29,6	65,5	1,22
Jul	98,1	73,9	172,0	36,0	27,2	63,2	1,33
Aug	87,0	74,2	161,2	35,5	30,2	65,7	1,17
Sep	90,8	80,6	171,4	36,2	32,1	68,2	1,13
Okt	98,6	109,4	208,0	35,5	39,4	74,9	0,90
Nov	97,8	129,7	227,5	34,9	46,3	81,3	0,75
Dez	96,5	125,4	221,9	35,0	45,5	80,5	0,77
Mittelwert	95,7	101,2	196,8	35,8	37,7	73,5	0,98
s_{abs}	4,0	17,2	20,4	0,4	5,7	5,6	0,16
$s_{\text{rel}} \text{ (\%)}$	4,16	17,02	10,38	1,18	15,18	7,62	16,46

berechnet. Es lässt sich bereits erkennen, dass die elektrische Leistung zwischen 87,0 und 104,1 kW (Herstellerangabe: 100 kW) und die Wärmeabgabe zwischen 73,9 und 129,7 kW (Herstellerangabe: 120 kW) schwankt. Die tatsächliche Leistung stimmt also zumindest bei voller Auslastung mit den Angaben im Datenblatt des Herstellers gut überein. Zur Veran-

schaulichung der Tabellen-Daten soll nun eine Betrachtung in Diagrammen erfolgen. Am Diagramm 4.4 ist zu erkennen, dass die Wärmeabgabe über den Jahresverlauf stark schwankt. Im Sommer wird am wenigsten Wärme benötigt, im Winter am meisten. Die Stromerzeugung hingegen weist einen näherungsweise konstanten Verlauf auf, zumindest ist kein Zusammenhang zwischen Stromerzeugung und Jahreszeit zu erkennen.

In Diagramm 4.5 sieht man, dass die jeweiligen Wirkungsgrade einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Der elektrische Wirkungsgrad bleibt näherungsweise konstant (ca. 35%). Der thermische Wirkungsgrad hingegen schwankt zwischen 27 % und 46 % und scheint abhängig von der Wärmeabgabe zu sein. Damit ergibt sich eine Stromkennzahl-Kurve (Diagramm 4.6), die nahezu eine Spiegelung der Wärmewirkungsgrad-Kurve darstellt. In diesem Fall geht also eine hohe Stromkennzahl (es wird deutlich mehr Strom als Wärme erzeugt) mit einem niedrigen Wirkungsgrad einher und umgekehrt. Wie genau der Zusammenhang zwischen der elektrischen bzw. thermischen Leistung und den Wirkungsgraden ist, lässt sich aus die-

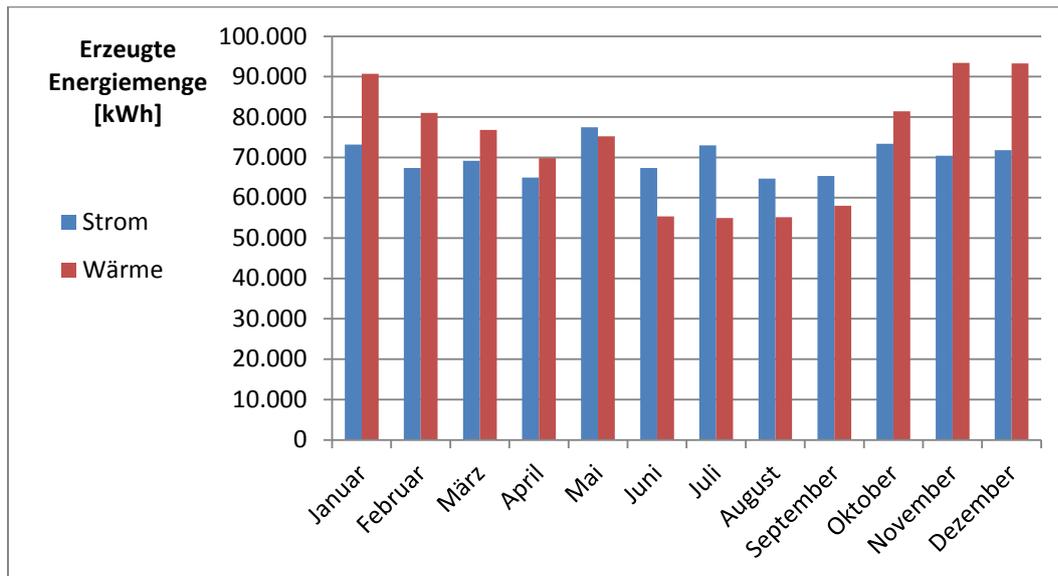


Abbildung 4.4: Erzeugte Strom- und Wärmemenge im Jahresverlauf (2014)

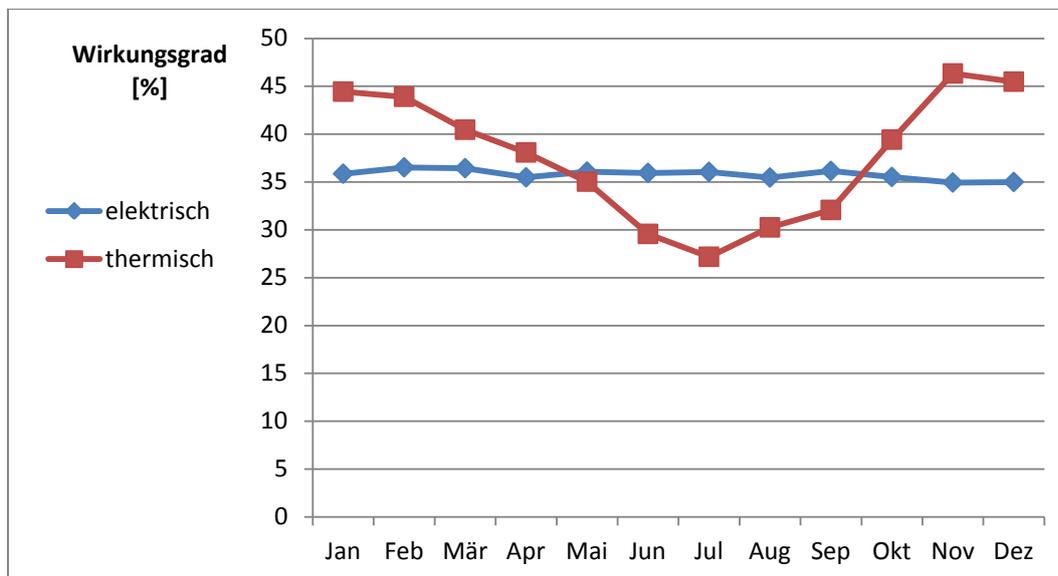


Abbildung 4.5: Elektrischer und thermischer Wirkungsgrad im Jahresverlauf (2014)

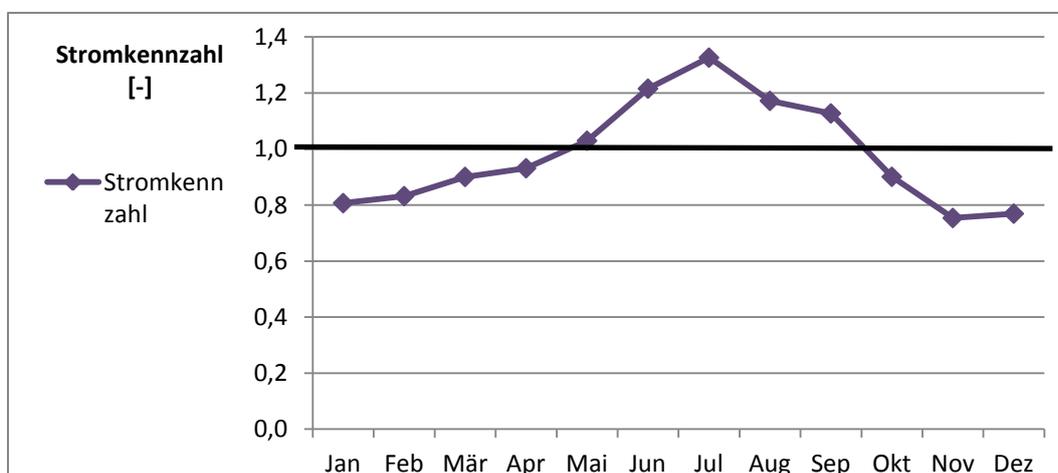


Abbildung 4.6: Stromkennzahl im Jahresverlauf (2014)

sen Diagrammen jedoch nur bedingt erkennen. Insbesondere der Einfluss der elektrischen Leistung ist unklar, da sie sich über das gesamte Jahr kaum ändert. Einen genaueren Eindruck vermittelt die Betrachtung der jeweiligen mittleren relativen Abweichung der Werte.

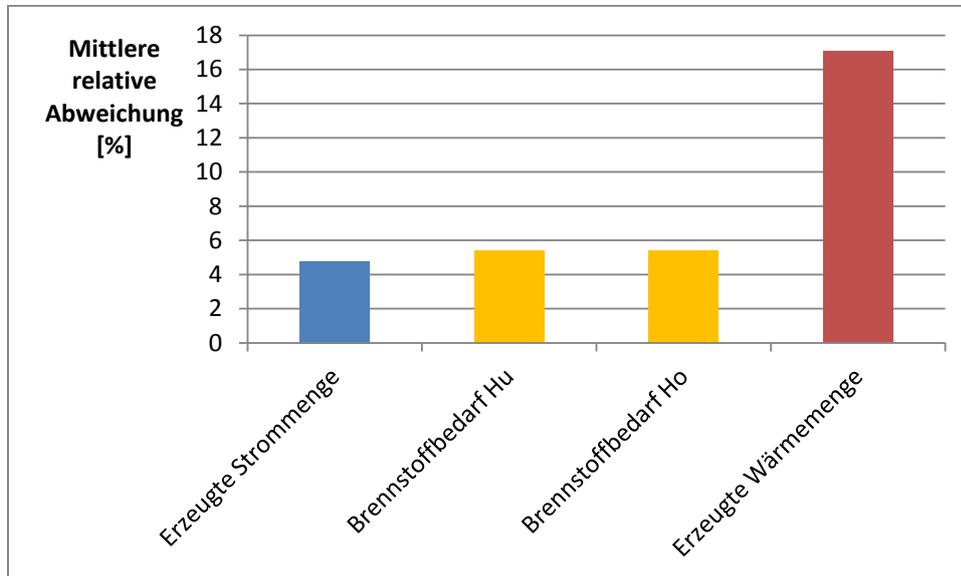


Abbildung 4.7: Mittlere relative Abweichung der monatlichen Messwerte (2014)

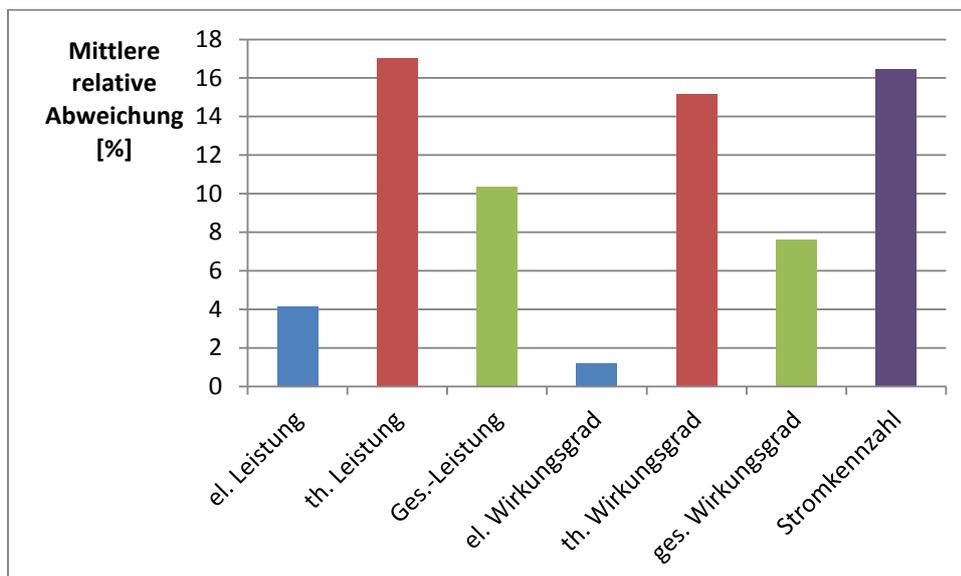


Abbildung 4.8: Mittlere relative Abweichung der monatlichen berechneten Werte (2014)

Dort ist noch einmal deutlich zu sehen, dass die erzeugte Wärmemenge mit 17,0 % deutlich mehr schwankt als die erzeugte Strommenge mit 4,8 % (Diagramm 4.7). Die elektrische Leistung schwankt mit 4,2 % ähnlich stark, der elektrische Wirkungsgrad hingegen nur mit 1,2 % (Abb. 4.8). Damit liegt die Vermutung nahe, dass der elektrische Wirkungsgrad nicht abhängig von der elektrischen Leistung ist, da eine doch relativ starke Schwankung der Leistung dennoch zu einem recht stabilen Wirkungsgrad führt. Jedoch ist auch bei der Wärmeabgabe zu erkennen, dass die Schwankung des Wirkungsgrades etwas geringer ist als die

der Leistung. Gewissheit bringt letztendlich eine Darstellung, bei der der Wirkungsgrad über die Auslastung der Anlage bzw. die jeweiligen Leistung aufgetragen ist (Diagramm 4.9 und 4.10).

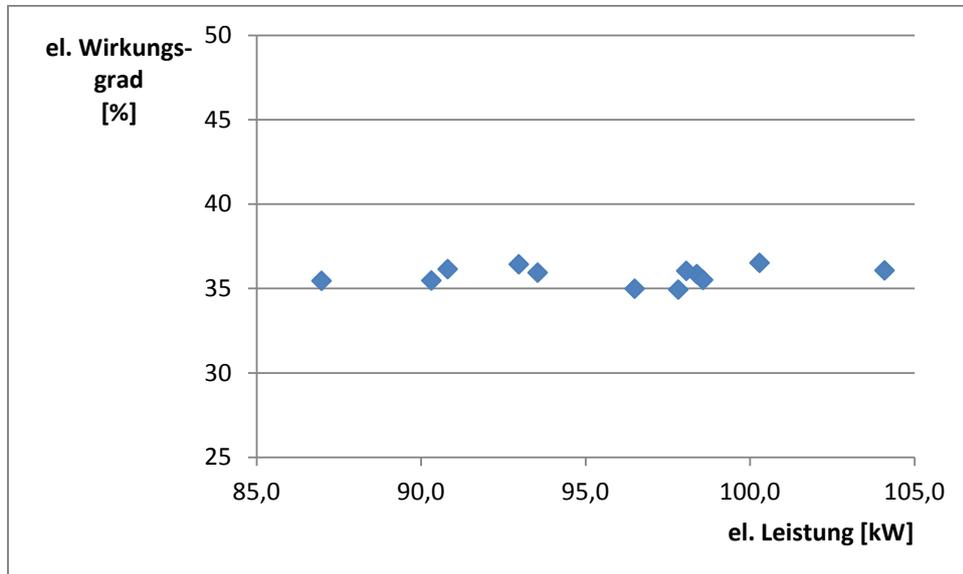


Abbildung 4.9: Elektrischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der elektrischen Leistung (2014)

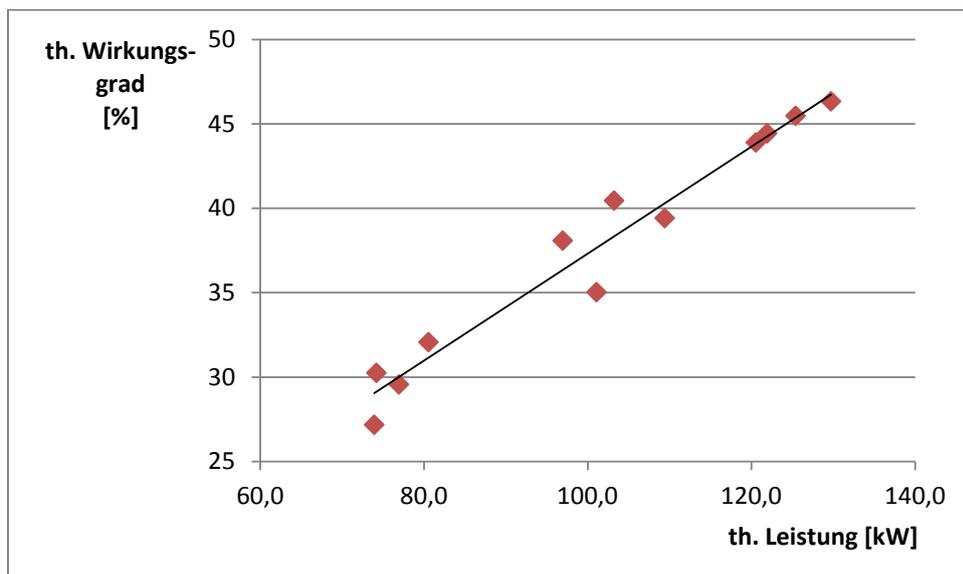


Abbildung 4.10: Thermischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der thermischen Leistung (2014)

Jeder der zwölf Datenpunkte steht für ein Datenpaar aus Leistung und Wirkungsgrad eines Monats. Für den elektrischen Wirkungsgrad lässt sich ein näherungsweise konstanter Verlauf erkennen, d.h. offenbar ist der elektrische Wirkungsgrad unabhängig von der Auslastung. Dies deckt sich auch gut mit der Darstellung im Theorieteil (Abb. 2.2 in Kapitel 2.1), wonach PAFC-Anlagen einen näherungsweise konstanten elektrischen Wirkungsgrad über die Leistung aufweisen. Im Gegensatz zum elektrischen Wirkungsgrad lässt sich bei dem thermischen Wirkungsgrad eine deutliche Abhängigkeit von der Auslastung der Anlage er-

kennen (Diagramm 4.10). Der thermische Wirkungsgrad nimmt proportional zur Leistung mit einer Steigung von ca. 0,32 Prozentpunkten pro kW_{th} zu. Eine abschließende Bewertung dieser Erkenntnisse erfolgt im Fazit (Kap. 5). Weitere aufschlussreiche Diagramme, auf die hier nicht näher eingegangen wurde, finden sich im Anhang.

4.3 Vergleich mit Ballard-Projekt in Berlin

In diesem Zusammenhang soll noch eine Erkenntnis betrachtet werden, die eine wichtige Ergänzung zu den Ergebnissen in Kapitel 4.2 liefert. Bei dem bereits in Kapitel 3.3.1.1 erwähnten Projekt wurde ebenfalls die Änderung des Wirkungsgrades über die Auslastung bei einer 250 kW-PEM-Anlage von Ballard in Berlin untersucht. In Diagramm 4.11 stehen die mit „Wirkungsgrad“ bezeichneten Werte für den elektrischen Wirkungsgrad und der „Nutzungsgrad“ für den Gesamtwirkungsgrad.

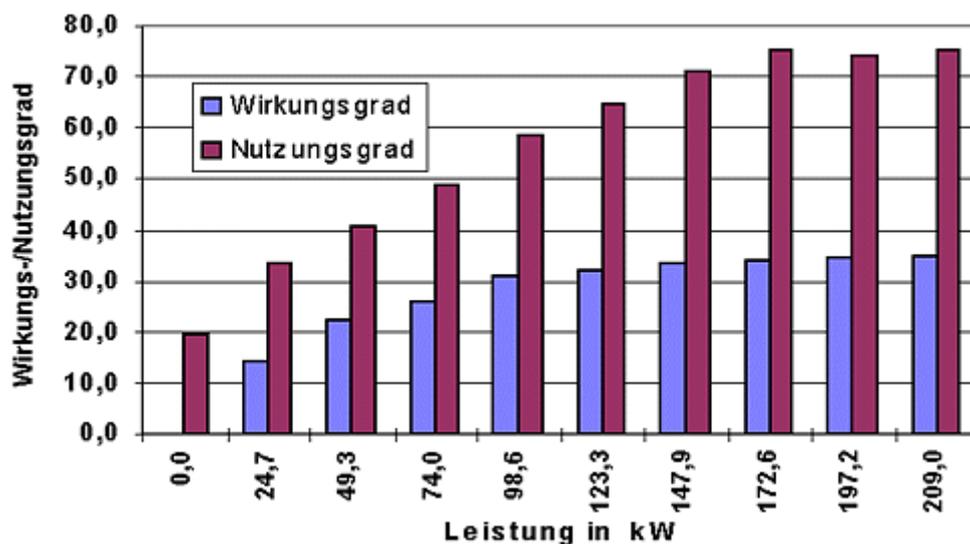


Abbildung 4.11: Elektrischer und Gesamtwirkungsgrad bei unterschiedlichen Lasten [HEI]

Es wurde festgestellt, dass der Wirkungsgrad ungefähr über die Hälfte des Leistungsspektrums einen näherungsweise konstanten Verlauf aufweist, erst unterhalb von 50 % ist eine Abnahme zu verzeichnen. Dafür wird in [HEI] folgende Begründung geliefert:

„Dieser Effekt resultiert aus dem positiven Gradienten der Brennstoffzelle. Er führt zu einem Wirkungsgradgewinn bei Teillast, der den wirkungsgradmindernden Effekt der internen Verbraucher kompensiert. Unterhalb von 50 % der Vollastleistung überwiegt der Eigenverbrauch mit der Folge einer linearen Abnahme des Wirkungsgrades.“ ([HEI], S. 175)

Dieser Effekt der Abnahme des elektrischen Wirkungsgrads konnte bei der Hamburger Anlage von N2telligence / Fuji Electric nicht festgestellt werden, da der niedrigste Messwert mit

87 kW_{el} weit oberhalb von 50 % der Vollastleistung (dies wäre bei ca. 50 von 100 kW_{el} der Fall) liegt. Ob dieser Effekt auch bei dieser Anlage auftreten würde und ab welcher Auslastung bleibt daher offen. Da es sich hier um eine PAFC-Anlage handelt und nicht um eine PEM wie im Berliner Projekt wäre dies eine weitere interessante Untersuchung. Für den Bereich des konstanten Wirkungsgrad-Verlaufs kann jedoch davon ausgegangen werden, dass hier dieselbe Erklärung zutrifft wie bei der Berliner Anlage von Ballard.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Für ein abschließendes Fazit und eine Beurteilung des aktuellen Stands der Technik stationärer Brennstoffzellen im Leistungsbereich Gewerbe und Industrie sollen im Folgenden die Erkenntnisse aus der Marktanalyse (Kapitel 3) und der Analyse der Anlage aus Kapitel 4 zusammenfassend betrachtet werden. Obwohl bereits weit fortgeschritten, gilt die Brennstoffzellen-Technologie nach wie vor als jung. Viele Hersteller, Experten und Verfasser von Literaturquellen sind sich einig, dass zwar großes Potential besteht, jedoch insbesondere die Wirtschaftlichkeit steigen muss. Dies kann sowohl durch Senkung der Investitionskosten, etwa durch Verwendung günstigerer Materialien oder Serienfertigung als auch durch weitere Verbesserung der Wirkungsgrade und Standzeiten erreicht werden. Allgemein bewirken auch Energiepreissteigerungen eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen und damit auch von stationären Brennstoffzellen.

International gibt es eine Vielzahl von Herstellern mit gut ausgereiften Produkten, andere sind auf gutem Wege welche zu entwickeln. In Deutschland beschränkt sich dies bisher im Wesentlichen auf kleine Geräte zur Versorgung von Ein- und Zweifamilienhäusern im Bereich um die 5 kW_{el} , doch mit der FuelCell Energy Solutions und N2telligence sind auch zwei Unternehmen im Leistungsbereich Gewerbe und Industrie vertreten. Ob sich die Branche in Deutschland in Zukunft weiter entwickelt lässt sich nach Beurteilung der vorliegenden Quellen schwer vorhersagen, d.h. zurzeit ist kein eindeutiger Trend zu verzeichnen. Jüngste Fortschritte und Bemühungen seitens von Herstellern, Anlagenbetreibern, Politikern und öffentlicher Förderprogramme haben aber zumindest gute Voraussetzungen für eine weitere Entwicklung geschaffen. Dafür spricht auch, dass viele Anlagen von in- und ausländischen Herstellern in Deutschland in Betrieb oder geplant sind. Besonders wichtig ist nun, dass bisherige Unterstützungen seitens der Politik und Förderprogramme weitergeführt werden und sich mehr Unternehmen und Netzbetreiber finden, die bereit sind eine Anlage trotz schlechter Wirtschaftlichkeit und langer Amortisationszeit zu kaufen und in Betrieb zu nehmen und sich im Gegenzug als zukunftsweisendes und umweltfreundliches Unternehmen zu präsentieren. Derartige Demonstrationsprojekte liefern in der aktuellen Phase wertvolle Praxiserfahrungen und führen zu einem weiteren Ausreifen der Produkte.

Ein Beispiel hierfür stellt das untersuchte Projekt im Autohaus in Hamburg dar. Die hier durchgeführte Analyse dieser Anlage basiert auf Messdaten für das Jahr 2014 und Betriebs Erfahrungen seit der Inbetriebnahme im August 2012 bis heute. In den drei Jahren Betriebszeit waren nur wenige Störungen zu verzeichnen, die allesamt behoben werden konnten. Sie beschränken sich im Wesentlichen auf kleine Störungen im Rahmen der Inbetriebnahme

oder des ersten Betriebsjahres. Die nachhaltige Funktionsfähigkeit der Anlage wurde durch diese Störungen nicht gefährdet und eine Problembeseitigung konnte meist während des Betriebs erfolgen.

Die Ergebnisse der Messwert-Auswertung wurden im Zusammenhang mit den Hersteller-Angaben (elektrische Leistung $100 \text{ kW}_{\text{el}}$, Wärmeauskopplung $120 \text{ kW}_{\text{th}}$) betrachtet. Die Anlage erreicht weitestgehend die vom Hersteller angegebenen Werte für elektrische (Jahresdurchschnitt: $95,7 \text{ kW}_{\text{el}}$) und thermische Leistung ($101,2 \text{ kW}_{\text{th}}$) oder übertrifft sie teilweise sogar (Höchstwerte: $104,1 \text{ kW}_{\text{el}}$ und $129,7 \text{ kW}_{\text{th}}$). Der im Datenblatt angegebene Gesamtwirkungsgrad von $> 90 \%$ wird jedoch zumindest nach den vorliegenden Messwerten nicht erreicht. Der im Jahresdurchschnitt erreichte Nutzungsgrad beträgt $73,5 \%$, der höchste Wert liegt im November 2014 mit $81,3 \%$. Eine Hersteller-Angabe im Datenblatt über den Anlagenwirkungsgrad stellt jedoch in der Regel keinen verbindlichen Wert dar, sondern einen bei idealen äußeren Bedingungen geltenden Wert. Für den Betrieb in der Praxis ergibt sich damit wie auch bei dieser Anlage stets ein darunter liegender Wert.

Potential zur Optimierung besitzt die Anlage für den Sommerbetrieb, wo der Gesamtwirkungsgrad auf bis zu $63,2 \%$ stark sinkt. Als Ursache hierfür wurde die niedrige Wärmeabgabe aufgrund des geringen Wärmebedarfs identifiziert. Eine Nutzung zusätzlicher Wärme im Sommer, etwa zur Kälteerzeugung mittels einer Absorptionskältemaschine würde den Wirkungsgrad steigern. Für die Anlage spricht bereits, dass das Fernwärmenetz dank der Möglichkeit zur Einspeisung als Puffer genutzt werden kann. Bei Anlagen, wo dies nicht möglich ist bleibt fraglich, ob sich dies wirtschaftlich betreiben lässt. Daher wären weitergehende Untersuchungen einer Anlage mit häufigem Teillastbetrieb aufschlussreich. Zu beachten ist auch, dass die hier ermittelten Ergebnisse auf recht wenigen Daten, nämlich 12 Monats-Datensätzen eines einzigen Jahres beruhen. Für genauere Untersuchungen wäre eine Betrachtung über mehrere Jahre, möglichst sogar bis kurz vor Austausch eines Stacks interessant. Auch die Untersuchung von Messwerten in kürzeren Abständen, z.B. im Stundentakt oder im Abstand einiger Minuten, wie sie bei dieser Anlage auch aufgezeichnet werden, könnte weitere Aufschlüsse, etwa über den Verlauf eines Tages bringen. Schließlich werden auch wirtschaftliche Betrachtungen immer wichtiger, z.B. zu Investitions- und Betriebskosten mit Berücksichtigung der Wartungskosten, Ermittlung einer Amortisationszeit sowie ein Vergleich mit einem BHKW auf konventioneller Verbrennungsbasis. Erst wenn Brennstoffzellen-Systeme die klassischen BHKW in wirtschaftlichen Gesichtspunkten übertreffen, stellen sie eine ernsthafte Konkurrenz dar. Bis dahin ist noch einiges an Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig.

Einige wesentliche Vorteile gegenüber BHKW sprechen dafür, dass Brennstoffzellen in Zukunft immer wichtiger und präsenter werden könnten. Die Vorteile wie geringer Wartungsaufwand und Geräuschentwicklung, niedrige bis keine Emissionen sowie hohe Wirkungsgrade besonders auch bei wechselndem Lastverhalten überzeugen immer mehr Menschen. Selbst in einer möglichen fernen Zukunft, in der Strom und Wärme weitestgehend aus erneuerbaren Energien erzeugt würden, hätten Brennstoffzellen ihren Platz. Wind- und Solarenergie werden nämlich immer vor dem Problem stehen, dass ihre Verfügbarkeit unbeständig ist, was eine Speicherung der Energie notwendig macht. Power-to-Gas-Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff oder Synthesegas (z.B. Methan) und anschließendem Verbrauch in dezentral verteilten stationären Brennstoffzellen wäre eine Möglichkeit hierfür. Dies würde auch zu einer deutlich geringeren Abhängigkeit von fossilen Energieträgern führen.

Vor allem die Tatsache, dass Wohngebäude wie auch Gewerbegebäude in Zukunft immer besser wärmegeklämt sein werden, spricht für einen zunehmenden Einsatz von Brennstoffzellen mit hohen elektrischen Wirkungsgraden und geringer Wärmeabgabe anstelle von konventionellen BHKW auf Verbrennungsbasis. Auch in anderen Branchen mit Brennstoffzellentechnologie, etwa in Automobilen, in der Schiff-, Luft- und Raumfahrt lohnt sich eine Beobachtung der zukünftigen Entwicklungen, da mit positiven Synergieeffekten für den stationären Bereich zu rechnen ist. Insgesamt gelten stationäre Brennstoffzellen nach wie vor als relativ teuer und noch nicht vollständig ausgereift, doch die aktuellsten Entwicklungen der letzten Jahre stimmten optimistisch. Ein Kauf und Betrieb einer Brennstoffzelle gilt heute unbestritten als deutlich lohnender als noch vor einigen Jahren. Die Beobachtung der weiteren Entwicklung bzgl. Technik und Markt von Brennstoffzellen sowie der Energiewirtschaft und -politik in den nächsten Jahren wird letztendlich zeigen, ob sich Brennstoffzellen-Systeme als zukunftsfähige Alternative zu BHKW zur dezentralen Energieversorgung etablieren können

Literaturverzeichnis

Fachbücher

- [GUM] Gummert, G. / Suttor, W. (2006): *Stationäre Brennstoffzellen*. Heidelberg: C.F. Müller
- [HEI] Heinzl, A. / Mahlendorf, F. / Roes, J. (2006): *Brennstoffzellen*. 3. Auflage. Heidelberg: C.F. Müller
- [KUR] Kurzweil, P. (2013): *Brennstoffzellentechnik – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg
- [TÖP] Töpfer, J. / Lehmann, J. (2014): *Wasserstoff und Brennstoffzelle – Technologien und Marktperspektiven*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg
- [WIN] Winkler, W. (2002): *Brennstoffzellenanlagen*. Heidelberg: Springer

Broschüren

- [ASU] ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (2014): *BHKW-Kenndaten 2014/2015 – Module, Anbieter, Kosten*. BHKW-Consult, BHKW-Infozentrum

Internetquellen

- [1] RP Photonics Consulting GmbH: *RP-Energie-Lexikon – Exergie*. URL: <https://www.energie-lexikon.info/exergie.html> (27.09.2015)
- [2] IER Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung: *Vorlesung: KWK Anlagen und Systeme – Innovative und kleine KWK-Prozesse*. URL: <http://www2.ier.uni-stuttgart.de/lehre/skripte/kwk/Innovative%20Systeme.pdf> (15.06.2015)
- [3] Virtuelles Institut: *Strom zu Gas und Wärme: Technologiecharakterisierungen in Form von Steckbriefen*. URL: http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/Virtuelles_Institut_Strom_zu_Gas_und_Waerme_Anlage_Steckbriefsammlung.pdf (28.05.2015)
- [4] Roland Berger Strategy Consultants: *Advancing Europe's energy systems – Stationary fuel cells in distributed generation*. URL: http://www.rolandberger.de/media/pdf/Roland_Berger_Fuel_Cells_Study_20150330.pdf (09.09.2015)
- [5] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Neue Förderrichtlinie „Brennstoffzellen für hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen“*. URL: <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/foerderrichtlinie->

- brennstoffzellen-fuer-kraft-waerme-kopplungsanlagen.html?nn=36210
(23.08.2015)
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Innovation durch Forschung - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz: Projekte und Ergebnisse der Forschungsförderung 2014*. URL: <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/innovation-durch-forschung,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> (30.08.2015)
- [7] Ballard Power Systems, Inc.: *Über Ballard*. URL: <http://www.ballard.com/about-ballard/German.aspx> (12.09.2015)
- [8] Ballard Power Systems, Inc.: *Product Specifications – Distributed Generation 1MW*. URL: http://www.ballard.com/files/PDF/Distributed_Generation/CLEARgen_Spec_Sheet.pdf (26.05.2015)
- [9] Vattenfall Europe: *PEM-Brennstoffzellenprojekt Berlin*. URL: <http://www.innovation-brennstoffzelle.de/projekt/haupt2.html> (12.09.2015)
- [10] FuelCell Energy: *Company Overview*. URL: <http://www.fuelcellenergy.com/about-us/company-overview/> (14.09.2015)
- [11] FuelCell Energy Solutions GmbH: *Über FuelCell Energy Solutions*. URL: <http://www.fces.de/ueber-uns/uber-fuelcell-energy-solutions/> (14.09.2015)
- [12] FuelCell Energy Solutions GmbH: *Überblick (Produkte und Service)*. URL: <http://www.fces.de/produkte-dienstleistungen/overview/> (14.09.2015)
- [13] HZwei-Blog – Nachrichten über Wasserstoff und Brennstoffzellen: *Bildungsministerium bekommt Brennstoffzelle*. Artikel vom 30.08.2012. URL: <http://www.hzwei.info/blog/2012/08/30/bildungsministerium-bekommt-brennstoffzelle/> (09.09.2015)
- [14] HZwei-Blog – Nachrichten über Wasserstoff und Brennstoffzellen: *Brennstoffzellen-Kraftwerk fürs Bildungsministerium in Berlin*. Artikel vom 10.02.2014. URL: <http://www.hzwei.info/blog/2014/02/10/brennstoffzellen-kraftwerk-fuers-bildungsministerium-in-berlin/> (09.09.2015)
- [15] Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Neubau des Bundesforschungsministeriums ausgezeichnet*. URL: <http://www.bmbf.de/de/26617.php> (15.09.2015)
- [16] Bloom Energy: *What is an Energy Server?* URL: <http://www.bloomenergy.com/fuel-cell/energy-server/> (15.09.2015)
- [17] Bloom Energy: *Customers*. URL: <http://www.bloomenergy.com/customer-fuel-cell/> (15.09.2015)
- [18] N2telligence GmbH: *Effiziente Brennstoffzellensysteme mit patentiertem Zusatznutzen*. URL: <http://www.n2telligence.com/de/produkte> (15.09.2015)

- [19] Seiderer, S.: *Die smarten Brandschützer*. Die Welt. Artikel vom 11.03.2012. URL: <http://www.welt.de/print/wams/vermishtes/article13915321/Die-smarten-Brandschuetzer.html> (16.06.2015)
- [20] HZwei-Blog – Nachrichten über Wasserstoff und Brennstoffzellen: *N2telligence präsentiert BZ-Brandschutz-System QuattroGeneration*. Artikel vom 03.09.2010. URL: <http://www.hzwei.info/blog/2010/09/03/n2telligence-praesentiert-bz-brandschutz-system-quattrogeneration/> (28.06.2015)
- [21] RP Online: *Eine Brennstoffzellenanlage für die Uni*. Artikel vom 21.05.2015. URL: <http://www.rp-online.de/nrw/staedte/duisburg/eine-brennstoffzellenanlage-fuer-die-uni-aid-1.5104163> (26.05.2015)
- [22] HZwei-Blog – Nachrichten über Wasserstoff und Brennstoffzellen: *TriGeneration-Brennstoffzelle für Minenaufsicht in Südafrika*. Artikel vom 30.03.2015. URL: <http://www.hzwei.info/blog/2015/03/30/trigeneration-brennstoffzelle-fuer-minenaufsicht-in-suedafrika/> (16.06.2015)
- [23] AFC Energy: *Project POWER-UP*. URL: <http://www.afcenergy.com/projects/powerup.aspx> (13.07.2015)
- [24] AFC Energy: *About POWER-UP*. URL: <http://project-power-up.eu/category/about-power-up/> (13.07.2015)
- [25] Air Products GmbH: *Air Products liefert Wasserstoff für EU-gefördertes Brennstoffzellen-Projekt „Power Up“ in Stade*. Artikel vom 15.01.2014. URL: <http://www.airproducts.de/company/news-center/2014/01/0115-air-products-liefert-wasserstoff-fur-eu-gefordertes-brennstoffzellen-projekt-power-up-in-stade.aspx> (13.07.2015)
- [26] AFC Energy: *AFC's KORE Fuel Cell System Achieves Landmark Operation in Stade, Germany*. Artikel vom 03.08.2015. URL: http://www.afcenergy.com/news/2015/8/8/1336/afcs_kore_fuel_cell_system_achieves_landmark_operation_in_stade_germany (15.09.2015)
- [27] Nedstack: *Nedstack sells world's largest PEM fuel cell power plant*. Artikel vom 17.02.2015. URL: <http://www.nedstack.com/about-us/nedstack-in-the-news> (13.07.2015)
- [28] Renewable Energy Focus: *Solvay unveils Nedstack 1 MW PEM fuel cell in operation*. Artikel vom 06.02.2012. URL: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/23702/solvay-unveils-nedstack-1-mw-pem-fuel-cell-in-operation/> (13.07.2015)
- [29] Convion Ltd.: *Company*. URL: <http://www.convion.fi/company.html> (29.06.2015)
- [30] Convion Ltd.: *News Release*. Artikel vom 24.02.2015. URL: http://www.convion.fi/download/NEWS%20RELEASE_02_15.pdf (29.06.2015)

- [31] Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd.: *Fuel Cell Power Generation Systems under Development*. URL: <http://www.mhps.com/en/technology/business/power/sofc/index.html> (13.07.2015)
- [32] FuelCellToday: *ClearEdge Power to Acquire United Technologies Fuel Cells Unit UTC Power*. Artikel vom 02.01.2013. URL: <http://www.fuelcelltoday.com/news-archive/2013/january/clearedge-power-to-acquire-united-technologies-fuel-cells-unit-utc-power> (15.09.2015)
- [33] BHKW Infozentrum: *Tognum stellt Produktion der Brennstoffzelle Hot-Module ein*. Artikel ohne Datum. URL: http://www.bhkwinfozentrum.de/statement/tognum_stellt_produktion_der_brennstoffzelle_hot-module_ein.html (26.05.2015)
- [34] Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme: *FuelCell Energy gibt europäische Marktaktivitäten bekannt*. Artikel vom 16.05.2012. URL: <http://www.ikts.fraunhofer.de/de/impressum.html> (17.09.2015)
- [35] PresseBox / unn United News Network GmbH: *HotModule heizt Hamburgs HafenCity – Brennstoffzelle ist wesentlicher Teil des innovativen Energiekonzepts*. Artikel vom 27.02.2006. URL: <http://www.pressebox.de/inaktiv/mtu-cfc-solutions-gmbh/HotModule-heizt-Hamburgs-HafenCity/boxid/53699> (17.09.2015)

Sonstige, nicht öffentliche Quellen

- Diverse betriebsinterne Dokumente des Automobilunternehmens
- (Fern)mündliche Aussagen, Notizen und E-Mails der Mitarbeiter des Autohauses, des Automobilunternehmens und des Lieferanten der Brennstoffzellen-Anlage (N2telligence GmbH)

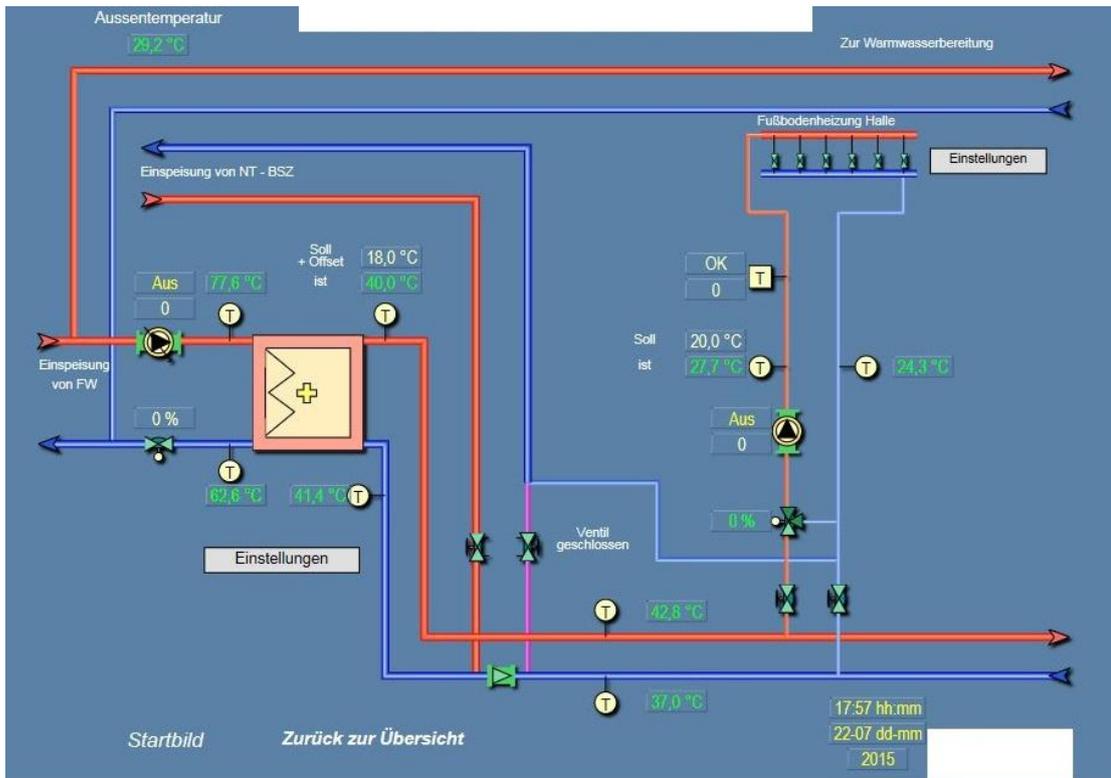
Anhang

Energiedaten der Brennstoffzelle im Autohaus in Hamburg für 2014 – Auszug aus betriebsinternen Dokument

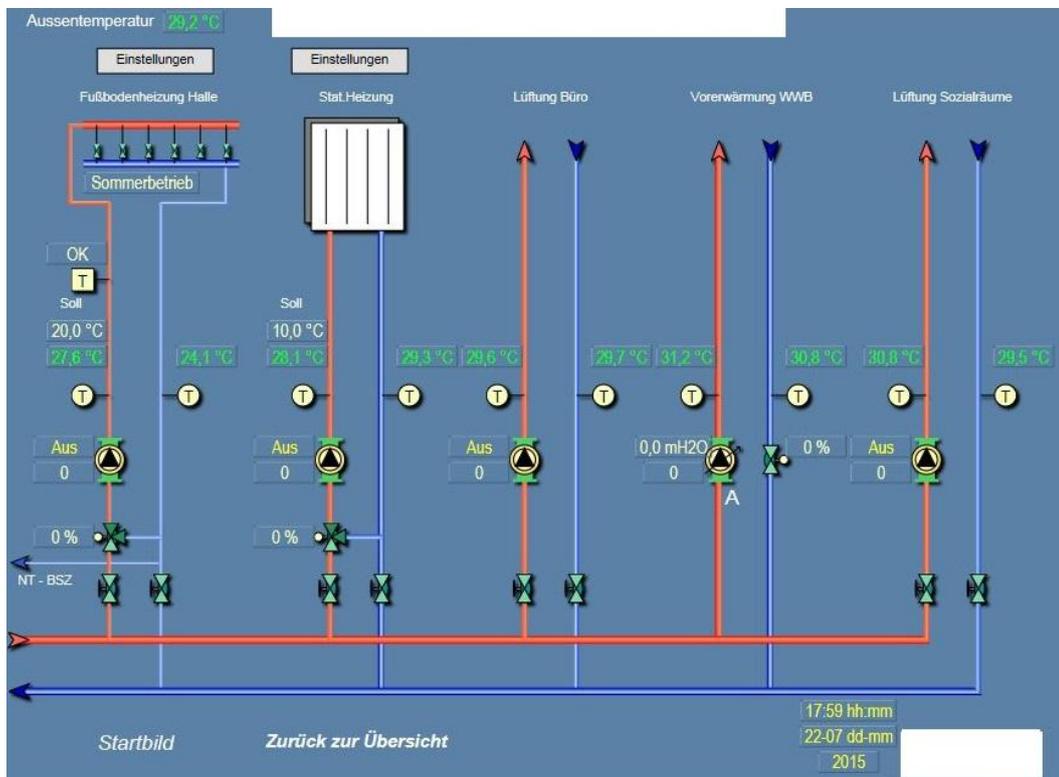
Daten 2014

	erzeugte Strommenge kWh	Brennstoffbedarf Hu/Hi in kWh	Brennstoffbedarf Ho/HS in kWh	Wärmemengenzähler Stand kWh
	Diff.Zählerstand Vormonat	Gasverbrauch im Ablesezeitraum	lt.Jahresabrechnung <- : 1,1	HT + NT
Januar	73.197	204.133	224.546	90.700
Februar	67.395	184.527	202.980	81.000
März	69.171	189.842	208.826	76.800
April	65.026	183.293	201.622	69.800
Mai	77.445	214.678	236.146	75.200
Juni	67.352	187.392	206.131	55.400
Juli	72.959	202.393	222.632	55.000
August	64.709	182.489	200.738	55.200
September	65.383	180.858	198.944	58.000
Oktober	73.340	206.510	227.161	81.400
November	70.431	201.587	221.746	93.400
Dezember	71.792	205.165	225.682	93.300
Summe	838.200	2.342.867	2.577.154	885.200

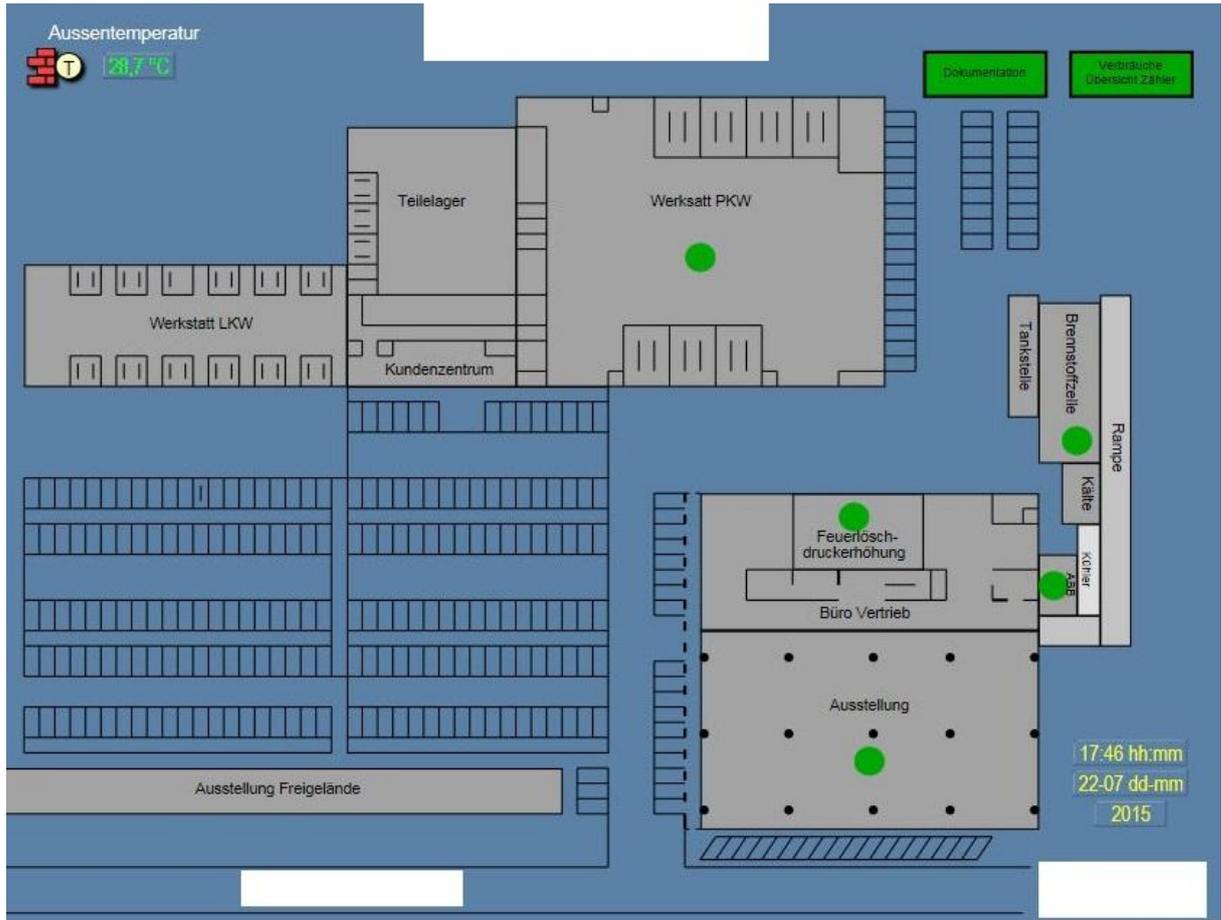
Screenshots der Gebäudeleittechnik



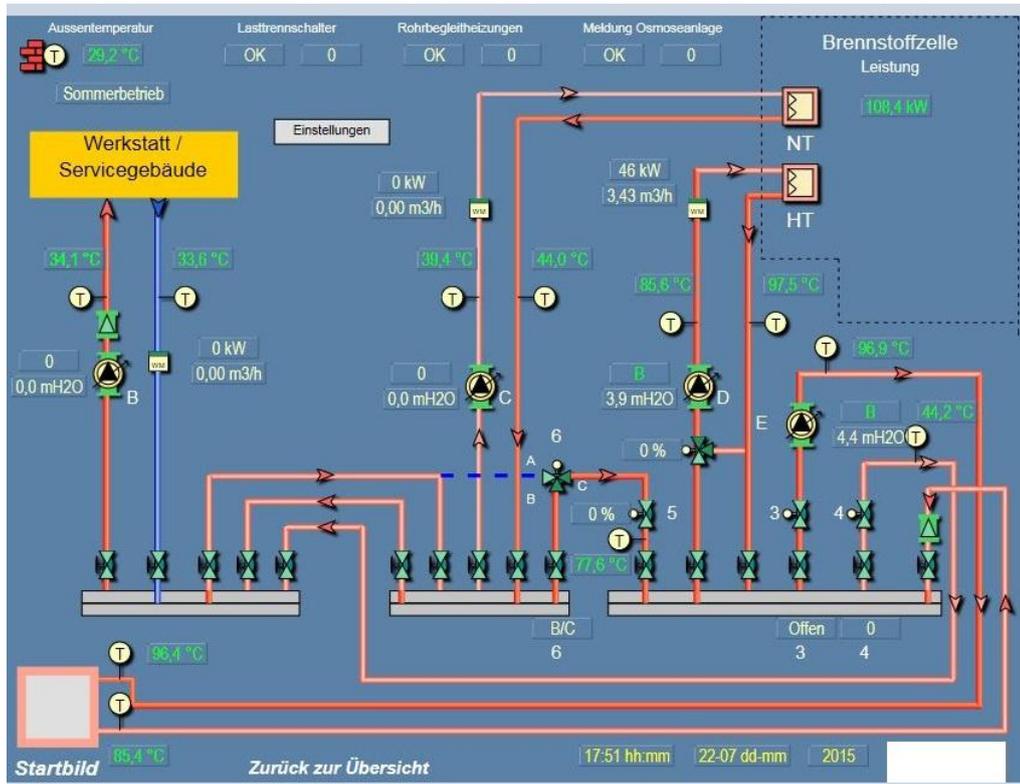
FED Einspeisung Brennstoffzelle in Service-Gebäude



FED Heizkreise Service-Gebäude

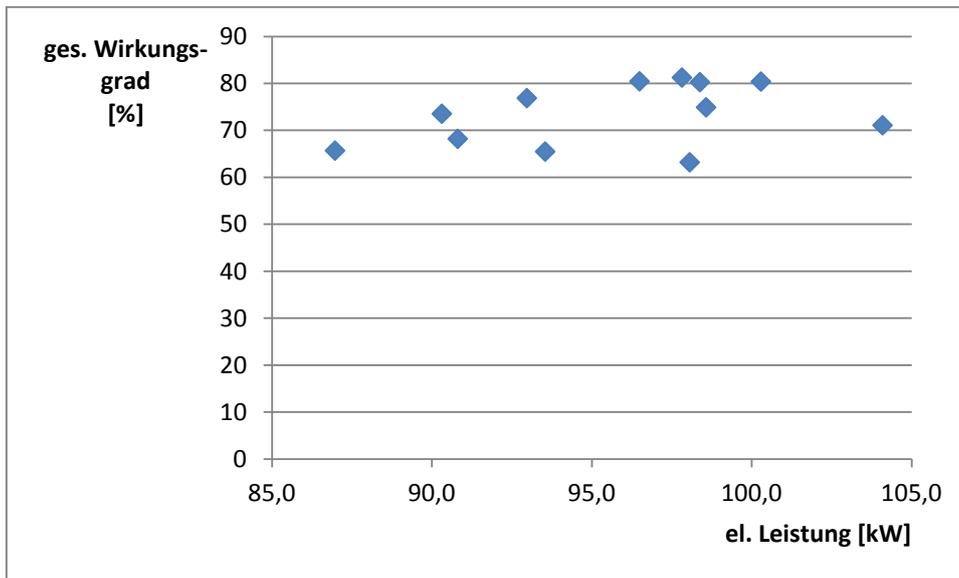


FED Start-Bild

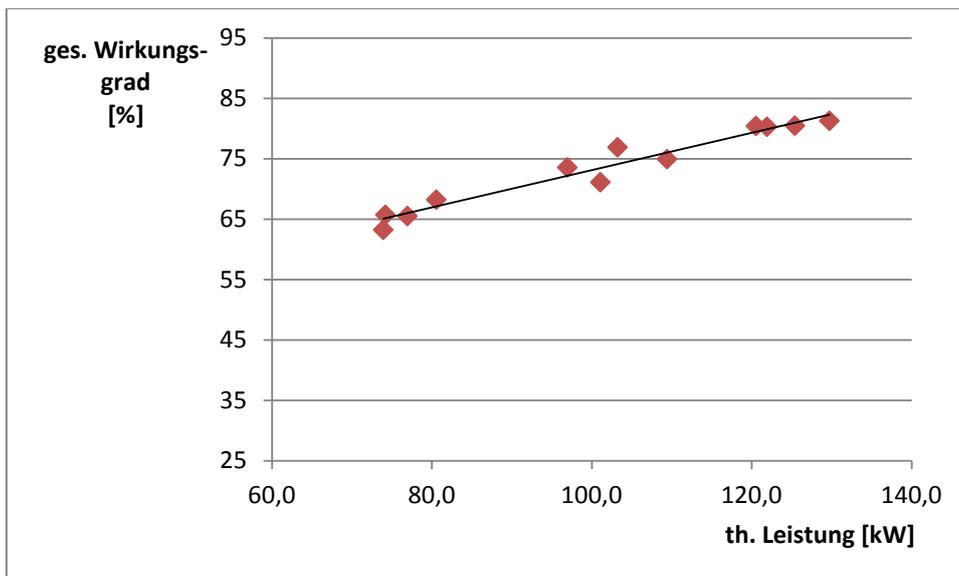


FED Verteiler Brennstoffzelle

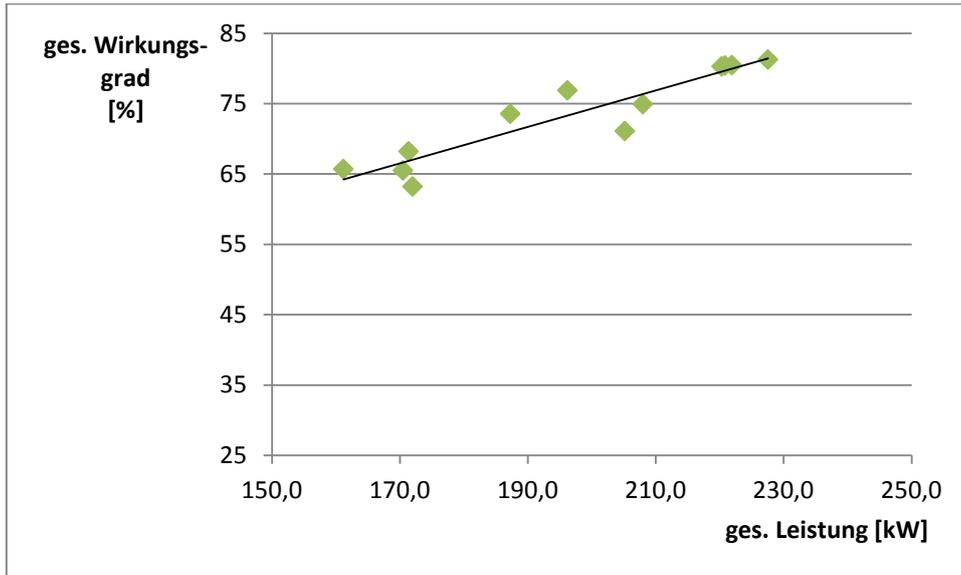
Diagramme ohne weitere Auswertung im Textteil der Arbeit



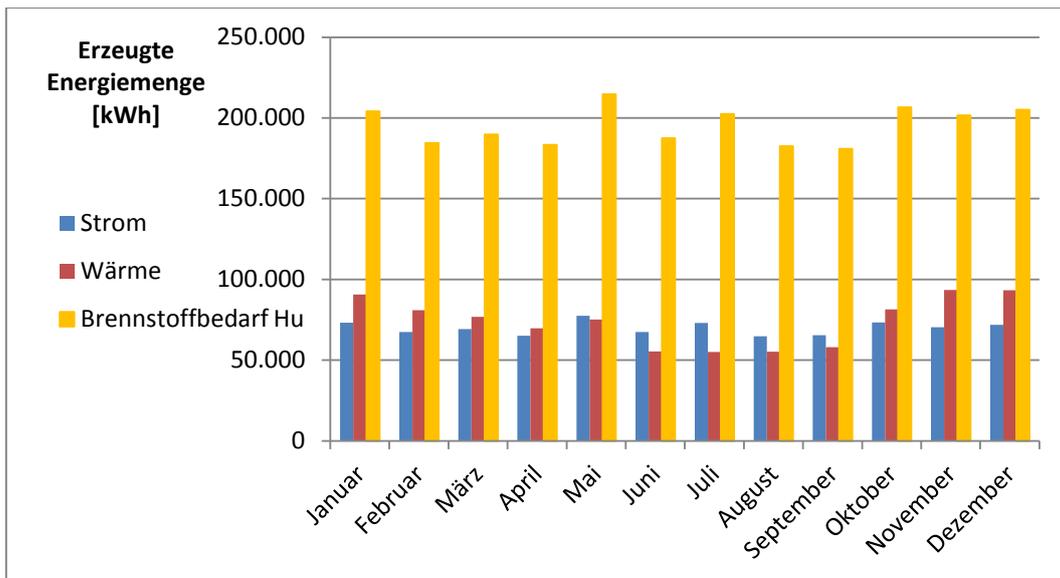
Gesamtwirkungsgrad über elektrische Leistung (2014)



Gesamtwirkungsgrad über thermische Leistung (2014)



Gesamtwirkungsgrad über Gesamtleistung (2014)



Erzeugte Energiemenge (Strom, Wärme) und Brennstoffbedarf (2014)



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Lidtke

Vorname: Oskar

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Stand der Technik stationärer Brennstoffzellen zur Gebäudeenergieversorgung mit energetischer Analyse einer gewerblich genutzten 100kW-Anlage

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch:

Ort

Datum

Unterschrift im Original