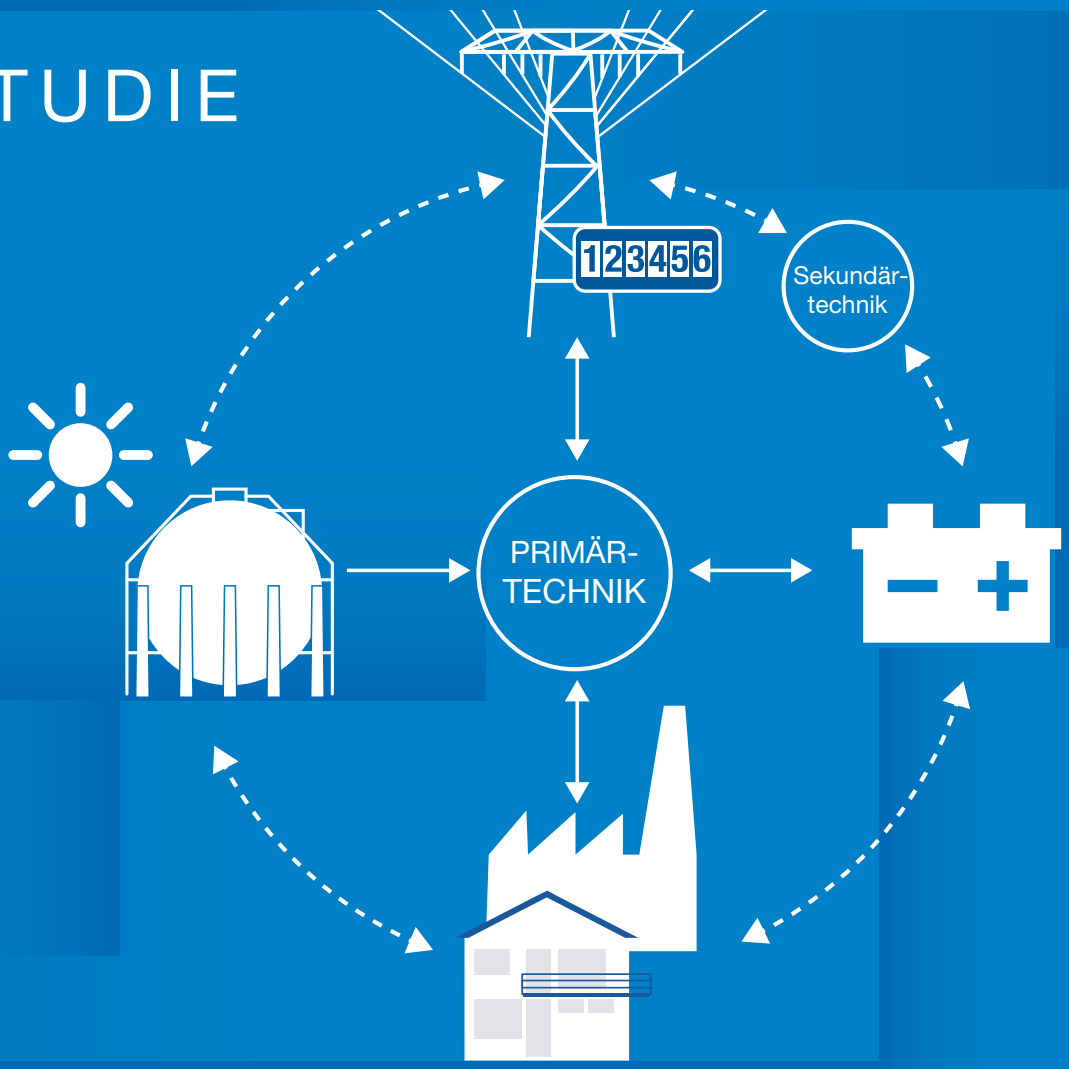
VDE-STUDIE



DER ZELLULARE ANSATZ

Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende

ETG

VDE

Autoren

ETG Task Force Grundsätzliche Auslegung neuer Netze

Dr.-Ing. Thomas Benz, ABB AG
Dipl.-Ing. Jörg Dickert, TU Dresden
Dipl.-Ing. Maik Erbert, MITNETZ Strom GmbH
Dipl.-Ing. Niels Erdmann, TU Dresden
Christopher Johae, M. Sc., Bergische Universität Wuppertal
Dr. Burkhard Katzenbach, Westnetz GmbH
Dipl.-Ing. Wolfgang Glaunsinger, VDE|ETG
Dr.-Ing. Holger Müller, Siemens AG, Erlangen
Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner, TU Dresden
Dr.-Ing. Jürgen Schwarz, Neckargemünd
Prof. Dr.-Ing. Rainer Speh, Siemens Ltd., Riad KSA
Dr.-Ing. Hanno Stagge, RWTH Aachen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek, Bergische Universität Wuppertal

Impressum

VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.

Energietechnische Gesellschaft (ETG)
Stresemannallee 15 · 60596 Frankfurt am Main · Telefon 069 6308-346
Fax 069 6308-9836 · E-Mail etg@vde.com · http://www.vde.com/etg

Bildnachweise Titel ©: VDE e.V.
Design: www.schaper-kommunikation.de

Juni 2015

Der Zellulare Ansatz

Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende

Studie der
Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG)

Vorbemerkung
ETG-Studien geben – entsprechend der ETG-Positionierung als neutrale, energietechnisch fundierte Institution – gemeinsame Erkenntnisse der Mitglieder der Task Force/des Fachbereichs wieder. Die Gemeinschaftsergebnisse werden im konstruktiven Dialog aus häufig unterschiedlichen Positionen erarbeitet. Die Studien spiegeln daher nicht unbedingt die Meinung der durch ihre Mitarbeiter vertretenen Unternehmen und Institutionen wieder.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 6

1 Einleitung 9
1.1 Zielsetzung 9
1.2 Aufbau der Studie 9

2 Potenziale von Technologien zur Energiewandlung und -speicherung 12
2.1 Definition des Bilanzkreises 12
2.2 Inhalte und Struktur der Technologiesteckbriefe 13
2.2.1 Energie-Wandler 14
2.2.2 Energie-Speicher 15
2.3 Zwischenfazit 18

3 Energetische Betrachtungen zu einer nachhaltigen Energieversorgung in Deutschland 19
3.1 Betrachtungshorizont und -rahmen 19
3.2 Langfristige Reduzierung des Energiebedarfs 20
3.3 Bereitstellung aus regenerativen Energien 22
3.4 Fazit 24

4 Lokale Versorgung – der Zellulare Ansatz 26
4.1 Die Grundidee des Zellularen Ansatzes 26
4.1.1 Einführung 26
4.1.2 Die Grundsätze der heutigen Netze 26
4.1.3 Neue Prinzipien der Netzplanung und des Netzbetriebs 28
4.1.4 Der zellulare Ansatz 29
4.2 Energiezelle Haushalt 32
4.2.1 Autarke Energiezelle Haushalt 33
4.2.2 Energiezelle Haushalt mit elektrischem Netzanschluss 33
4.2.3 Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss 34
4.2.4 Zwischenfazit für die Energiezelle Haushalt 35
4.3 Energiezelle Gewerbe-Handel-Dienstleistungen 36
4.3.1 Autarke Energiezelle GHD 37
4.3.2 Energiezelle GHD mit elektrischen Netzanschluss 37
4.3.3 Energiezelle GHD mit Gasnetzanschluss 38
4.3.4 Zwischenfazit für die Energiezelle GHD 39
4.4 Energiezelle Industrie 40
4.4.1 Gesamtenergiebedarf der Industrie 41
4.4.2 Energiezelle „Kleiner Industriebetrieb“ 42
4.4.3 Energiezelle „Industriegebiet“ 45
4.4.4 Energiezelle „Industriepark“ 47
4.4.5 Zwischenfazit Energiezelle Industrie 50
4.5 Gesamtfazit zum zellularen Ansatz 51

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

5 Grundsätzliche Überlegungen zum überregionalen Energieausgleich 52
5.1 Methodik 52
5.2 Regionen 53
5.3 Verbindungskorridore 53
5.4 Annahmen zum Bedarf an elektrischer Energie 53
5.5 Annahmen zur Bereitstellung der elektrischen Energie 53
5.5.1 Ansatz A 54
5.5.2 Ansatz B 54
5.6 Übertragungskorridore 57
5.7 Fazit 59

6 Zusammenfassung 60
6.1 Schlussfolgerungen 60
6.2 Handlungsempfehlungen 63

7 Literaturverzeichnis 64

Abkürzungsverzeichnis 65

Glossar 66

Anhang 1: Technologiesteckbriefe 66

Anhang 2: Detailuntersuchungen 67
A2.1 Exemplarische Untersuchungen zur Energiezelle Haushalt 67
A2.1.1 Technologieeinsatz für Energiezellen Haushalt 67
A2.1.2 Berechnungsgrundlagen für die Energiezelle Haushalt 70
A2.1.3 Betrieb der Energiezelle Haushalt 75
A2.1.4 Berechnungsergebnisse für Energiezelle Haushalt 76
A2.2 Gewerbe-Handel-Dienstleistungs-Zelle 80
A2.2.1 Lastgänge 81
A2.2.2 Energiebedarf eines Supermarktes 84
A2.3 Versorgungsszenarien 86
A2.3.1 Autarke Energiezelle GHD 86
A2.3.2 Energiezelle GHD mit elektrischem Netzanschluss 88
A2.3.3 Energiezelle GHD mit Gasnetzanschluss 91
A2.4 Literaturverzeichnis 94

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Vorwort

Am 28. September 2010 wurde das Energiekonzept der Bundesregierung verabschiedet [1]. Dieses Datum gilt allgemein als der Startschuss zur „deutschen Energiewende“, wobei gewichtige Weichen bereits 1990 mit dem Stromeinspeisegesetz und 2000 mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz richtungsweisend gestellt wurden. Fünf Monate später, unmittelbar nach dem Reaktorunglück von Fukushima am 11. März 2011, wurden zusätzlich weitreichende Beschlüsse bezüglich des Ausstiegs aus der Kernenergie gefasst. Der Zeithorizont der Zielsetzungen bis ins Jahr 2050 zeigt die Tragweite der Energiewende.

Die wichtigsten Eckpunkte der Energiewende sind:

- Reduktion der Treibhausgase um 80 bis 95% (Referenzjahr: 1990),
- Reduktion des Primärenergieverbrauchs um 50% (Referenzjahr: 2008),
- Reduktion des elektrischen Energieverbrauchs um 25% (Referenzjahr: 2008),

und für das Jahr 2050 soll der Anteil von erneuerbaren Energien

- am gesamten Energieverbrauch 60% und
- für die Stromerzeugung 80% betragen.

Insbesondere das letztgenannte Ziel stellt speziell die Elektrizitätswirtschaft vor eine große Herausforderung. Die bestehende Infrastruktur, die Prinzipien der Betriebsführung und nicht zuletzt die existierenden Marktstrukturen und die regulatorischen Rahmenbedingungen sind zu hinterfragen. Die Elektrizitätswirtschaft steht damit vor den größten Änderungen in ihrer über 150-jährigen Geschichte. Es ist anzunehmen, dass das erworbene Wissen und die jahrzehntelangen Erfahrungen sich einer grundsätzlichen Neuorientierung stellen müssen, um die ambitionierten Ziele der Energiewende zu erreichen.

Betrachtet man die Entwicklung der elektrischen Energieversorgung seit ihrem Beginn Ende des neunzehnten Jahrhunderts bis heute stellt man fest, dass man zumindest teilweise wieder zu den Strukturen der Anfangszeit zurückkehren will. Dies betrifft beispielsweise den Einsatz kleiner, lokaler Erzeugungsanlagen, für welche die Netzstruktur angepasst werden muss. Auch die Frage des Einsatzes von Gleich- oder Wechselspannung zur Übertragung und Verteilung von Elektrizität wird angesichts der zu-

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

nehmenden Anzahl von Gleichstromverbrauchern, u.a. für Beleuchtungszwecke, IKT und Unterhaltungselektronik, neu zu beantworten sein. Aber insbesondere die Leistungsbilanzierung durch Speicherung und Lastverschiebung ist eine wesentliche Herausforderung für die Energiewende. Unter anderem durch die ungleiche Verteilung von Potenzialen von erneuerbaren Energien ist eine deutliche Zunahme des überregionalen Energieausgleichs und durch das fluktuierende Angebot Speicherung erforderlich.

Ein weiterer Aspekt umfasst die heute fortgeschrittenen Technologien, welche beim Entstehen der flächendeckenden Energieversorgung vor mehr als 100 Jahren noch nicht zur Verfügung standen. Insbesondere sind hier die Leistungselektronik und die Breitbandkommunikation zu erwähnen. Durch technologische Fortschritte gibt es Weiterentwicklungen bei Energie-Speichern und Energie-Wandlern. Es ist zu erkennen, dass in modernen und nachhaltigen Energieversorgungssystemen unterschiedliche Energieträger miteinander vernetzt werden, um technisch optimale und wirtschaftliche Lösungen für die Anwendungen wie Mobilität, Prozesswärme, Raumwärme, Kälte, Antriebe und IKT zur Verfügung zu stellen. Damit stellt sich folgende Frage:

Wie sieht eine moderne Energieversorgung aus, wenn man unter Beachtung der neuen Anforderungen, aber auch unter Verwendung richtungsweisender Technologien die Struktur völlig neu konzipieren könnte?

Zur Beantwortung dieser Frage hat die Task Force mögliche Technologien zur Energie-Wandlung und Energie-Speicherung zusammengetragen. Im Weiteren wird ein universales Energieszenario für Deutschland erstellt, wobei sowohl auf die regenerative Energiebereitstellung als auch auf die Bedarfsveränderung eingegangen wird. Ein erster Lösungsansatz ist die lokale Versorgung. Dies wird als Zellularer Ansatz bezeichnet. Wenn in Zukunft das Gleichgewicht zwischen lokaler Erzeugung und Verbrauch auf der niedrigsten machbaren Ebene in zellularen Strukturen möglich ist, ergeben sich wesentliche Chancen, den Besonderheiten regenerativer Energiequellen gerecht zu werden.

Der gesellschaftliche Anspruch an eine hohe Versorgungssicherheit, insbesondere für energieintensive Industrien, große Ballungsräume und Metropolen, kann häufig nicht zu allen Zeiten regional erfüllt werden. Dies erfordert intensivere Energieübertragung und umfangreiche Energiespeicherung.

Elektrizität ist nur begrenzt speicherbar, daher wird überlegt, welche alternativen Speichermöglichkeiten es für große Energiemengen gibt. Gerade bei der Speicherung hat Gas[1] Vorteile. Daher ist zu überlegen, welche Rolle Gas in einem zukünftigen Energiesystem einnehmen kann.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Die Task Force bewertet neben zellularen, lokalen Konzepten auch die Anforderungen zur Energieübertragung in Abhängigkeit der Umsetzung zellularer Netze. Dabei werden für einen angenommenen Ausbau der dezentralen erneuerbaren Energieträger die Übertragungsaufgaben abgeleitet.

Einen Teil dieser zukünftigen Herausforderungen untersucht daher die ETG-Task Force und will damit zur Diskussion anregen.

1 Im Rahmen dieser Studie werden unter „Gas“ die Stoffe Erdgas, Methan und Wasserstoff sowie die Gemische dieser Stoffe verstanden. Andere ähnliche Energieträger, wie beispielsweise Propan, werden heutzutage zwar in bestimmten Anwendungen genutzt, allerdings sind die Autoren der Meinung, dass diese Stoffe für die allgemeine Energieversorgung keine führende Rolle einnehmen werden.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung

Die Task Force untersucht und beschreibt Konzepte für eine nachhaltige Energieversorgung am Beispiel Deutschlands, welche über die kurzfristige bzw. mittelfristige Planung hinausgehen.

Die Task Force setzt sich dabei folgende Zielstellung:

Das Energieversorgungssystem der Zukunft wird sich noch stärker als bisher auf erneuerbare Energiequellen abstützen und vermehrt Aspekte der Umweltverträglichkeit berücksichtigen müssen. Bei der Realisierung müssen insbesondere auch neue Technologien – soweit einsatzbereit oder in Entwicklung befindlich – auf ihre Einsatzmöglichkeit geprüft werden. Gesellschaftliche Akzeptanz sowie Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit und die Versorgungssicherheit gilt es gleichermaßen zu beachten.

Im Unterschied zu anderen Studien und Entwicklungskonzepten wird nicht versucht, das bestehende Energiesystem durch Aus- und Zubau für die zukünftigen Aufgaben zu ertüchtigen. Ziel ist es vielmehr, einen absehbaren Energiebedarf mit einem neuen Energiesystem zu decken. Grundlage dieses Systems sind heute bekannte Technologien, unter Berücksichtigung der Entwicklungspotenziale. Gleichzeitig muss und wird auch eine stärkere Vernetzung zwischen den Energieträgern berücksichtigt.

Durch diesen Ansatz sollen Freiräume für neue Konzepte in der Energieversorgung entstehen.

1.2 Aufbau der Studie

Für eine zum großen Teil auf regenerativen Energiequellen basierende Energieversorgung sind heute weder die Struktur bekannt, noch ein idealer Entwicklungspfad ausgearbeitet. In zahlreichen Studien und Untersuchungen (z.B. [2], [3], [4]) wurde versucht, auf unterschiedlichen Ebenen der Energieversorgung und durch verschiedene Akteure mögliche zukünftige Versorgungsstrukturen zu bestimmen und basierend hierauf Entwicklungspfade abzuleiten.

Methodisch basieren diese Konzepte zur Ermittlung möglicher zukünftiger Energieversorgungssysteme häufig auf Bedarfsannahmen und Annahmen zur zukünftigen Erzeugung durch regenerative Energieträger. Die Annahme-

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

werte sind in beiden Bereichen sehr unscharf und besitzen große Streubereiche, da diese insbesondere auch stark von politischen und gesellschaftlichen Vorgaben geprägt sind. Basierend hierauf werden die notwendigen Ausbauschritte bestimmt, um die heute vorhandene Struktur der Energieversorgung weiter zu entwickeln und an den erwarteten zukünftigen Bedarf, beziehungsweise die regenerative Erzeugung, anzupassen. Durch dieses Vorgehen werden Überlegungen zu grundlegend neuen Strukturen in der Energieversorgung und die Integration innovativer Wandlungs- und Speicher-Technologien nicht ausreichend berücksichtigt.

Das Vorgehen dieser Task Force hebt sich von den bisherigen Studien dadurch ab, dass sie mögliche Energieversorgungkonzepte **ohne die Berücksichtigung bisheriger Strukturen** am Beispiel Deutschlands entwickelt und vergleicht.

Ausgangspunkte für die Untersuchungen sind Technologiesteckbriefe für Energie-Wandler und Energie-Speicher, welche den heutigen ingenieurwissenschaftlichen Erkenntnisstand abbilden und zukünftige Innovationspotenziale abschätzen. Die Task Force ist sich bewusst, dass neue Entdeckungen auf den Gebieten der Physik, Chemie, Biologie oder Geologie und daraus resultierende technische Entwicklungssprünge die Ergebnisse dieser Studie in einem anderen Licht erscheinen lassen können.

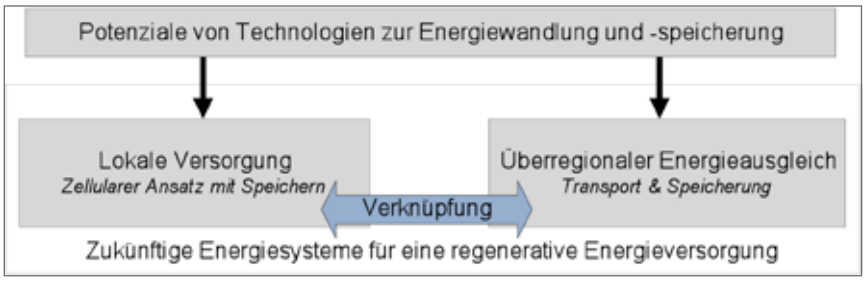


Bild 1: Vorgehensweise der VDE-Studie „Der Zellulare Ansatz – Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende“

Basis für die Erstellung der Konzepte sind Perspektiven für die regenerative Energiebereitstellung sowie die Abschätzung und Annahmen zu zukünftigen Energiebedarfen, welche in Anlehnung an ein universales Energieszenario für Deutschland erstellt werden. Wachstumspotenzial bei der Energiebereitstellung zeigen Onshore- und Offshore-Windenergieanlagen sowie Photovoltaik-Anlagen. Wasserkraftwerke und Biomassekraftwerke werden jedoch auch weiterhin als wichtiger Bestandteil des Energiemix angesehen. Die Kernfusion wird in dieser Studie nicht betrachtet, da ein technologischer Durchbruch bei der Kernfusion die Energiesysteme massiv verändern wird, aber dieser zurzeit nicht absehbar ist.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Beim Energiebedarf wird der Querverbund zwischen Elektrizität, thermischer Energie sowie Mobilität immer bedeutender. Durch Effizienzsteigerungen kann der bisherige Elektrizitätsbedarf gesenkt werden. Durch die steigende Nutzung von Elektrofahrzeugen, Wärmepumpen und Raumklimatisierung steigt jedoch der Elektrizitätsbedarf in Summe an.

Es wird somit der zentralen Frage nachgegangen:

Wie würde man heute, in einem Gebiet ohne vorhandenes Energiesystem, ein Versorgungssystem strukturieren und welche Technologien würde man einsetzen, um eine nachhaltige, überwiegend auf regenerativen Energieträgern beruhende Energieversorgung realisieren zu können?

International haben sich hierfür Begriffe wie „greenfield planning“ oder „greenfield design of future networks“ eingebürgert (vgl. z.B. [5], [6]).

In der VDE-Studie „Der Zellulare Ansatz – Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende“ wird gezeigt, dass für eine zukünftige Energieversorgung sowohl dezentrale Strukturen ausgebaut, aber auch Energie überregional ausgeglichen werden muss. Diese Ergebnisse unterstreichen, dass eine lokale Versorgung teilweise möglich ist (Zellularer Ansatz), aber auch überregionale Strukturen für die Energieversorgung von morgen eingesetzt werden müssen, wozu diese Studie Diskussionsansätze liefert.

Hierbei werden die heute bekannten Technologien für Energiewandlung und -speicherung sowie die absehbaren technologischen Entwicklungen berücksichtigt. Wirtschaftliche Aspekte oder politische Anreize stehen nicht im Fokus dieser Studie.

Es ergeben sich Handlungsempfehlungen im Hinblick auf die Forschungsförderung für Technologieentwicklungen und die Weiterentwicklung der wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen. Zudem sollten die vorgeschlagenen Konzepte im Anschluss an diese Studie auf ihre reale Umsetzungsfähigkeit geprüft werden.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

2 Potenziale von Technologien zur Energiewandlung und -speicherung

2.1 Definition des Bilanzkreises

Wichtige Grundlage für die Betrachtung von Energieversorgungsszenarien ist die Definition von Bilanzkreisen.

Energie kann von außen in einen Bilanzkreis eingebracht und durch „Nutzung“ aus dem Bilanzkreis wieder entnommen werden. Zusätzlich fallen „Verluste“ an; damit ist die Energie gemeint, die bei der Umwandlung oder für die Übertragung (zumeist als Abwärme) anfällt und nicht für eine Nutzanwendung innerhalb des Bilanzkreises zur Verfügung steht.

Im Sinne dieser Studie werden Elektrizität, Wärme und Gas als Energieträger im Bilanzkreis festgelegt. Elektrizität wird durch Kraftwerke in den Bilanzkreis eingeführt, wofür Primärenergie benötigt wird. In thermischen Kraftwerken werden beispielsweise fossile Energieträger, Biomasse oder Kernenergie in Elektrizität umgewandelt. Andere Kraftwerke wie Windenergieanalgen, Photovoltaik-Anlagen oder Wasserkraftwerke erzeugen elektrische Energie aus weiteren Formen von Primärenergie, welche aufgrund ihres regenerativen Charakters als Umweltenergie bezeichnet wird. Thermische Energie kann von Kraftwerken bereitgestellt oder für unterschiedliche Anwendungen direkt aus Primärenergieträgern (z.B. Brennstoffe) oder Elektrizität erzeugt werden. Gas nimmt in diesem Zusammenhang eine Sonderstellung ein. Energie in Form von Gas kann dem Bilanzkreis von außen zugeführt (z.B. als fossiler Energieträger aus einem Bohrloch oder aus Biomasse), aber auch aus der Umwandlung von Elektrizität (Elektrolyse bzw. „Power2Gas“) erzeugt werden. Im letzteren Fall wird aus dem Bilanzkreis keine Energie ab- oder zugeführt, es findet lediglich eine Umwandlung innerhalb des Bilanzkreises statt. Gas kann dann innerhalb des Bilanzkreises in Elektrizität oder in thermische Energie umgewandelt werden.

Als Hauptanwendungen von Energie sind Haushalte, Industrie, Gewerbe und der Verkehr zu nennen. Diese entnehmen dem Bilanzkreis Energie in Form von Elektrizität, thermischer Energie und Gas und wandeln diese in Nutzenergie[2], beispielsweise für chemische Prozesse, Prozesswärme, Raumheizung, IKT oder mechanische Energie um.

Speicher sind innerhalb des Bilanzkreises eingesetzt. Sie nehmen Energie auf (z.B. Elektrizität) und geben diese nach der Speicherzeit wieder ab.

2 Nutzenergie ist kein einheitlich festgelegter Begriff, vgl. auch Energieformen im Glossar (S. 71)

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Das folgende Bild 2 stellt den Bilanzkreis und die unterschiedlichen Energieformen schematisch dar. Dabei steht nicht im Vordergrund, die Thematik erschöpfend zu beschreiben, sondern eine Darstellung zum besseren Verständnis des Ansatzes dieser Studie zu liefern.

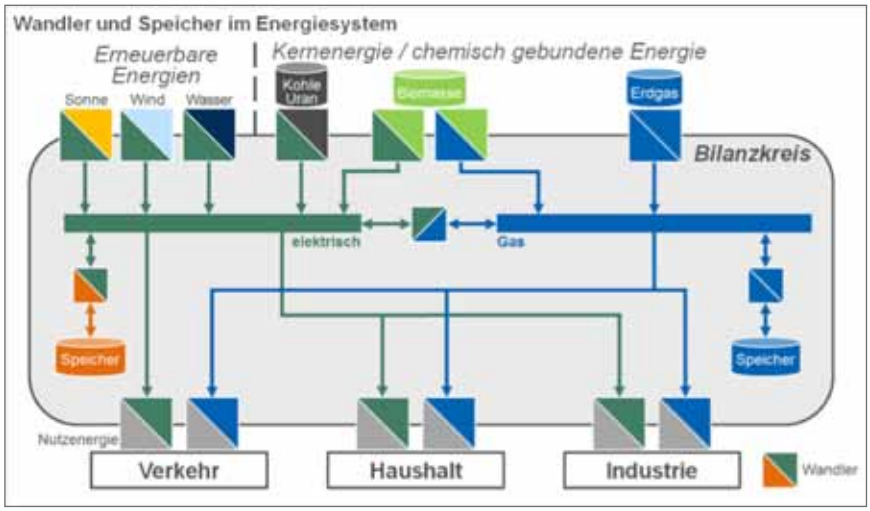


Bild 2: Energieträger mit Bilanzkreis und Verknüpfungen für die Studie

Als Anmerkung zu Bild 2 ist noch zu ergänzen, dass im Sinne dieser Studie auch eine Haushaltsbrennstoffzelle als ein thermisches Kraftwerk eingeordnet wird, auch wenn diese nur eine sehr geringe Leistung hat und daher im allgemeinen Sprachgebrauch meist nicht als Kraftwerk bezeichnet wird. Die dargestellten Verknüpfungen haben weiterhin keine direkte Bedeutung als Netze, sondern stellen lediglich dar, dass eine bestimmte Energieform genutzt wird. Dabei spielt es zunächst keine Rolle, ob Energie direkt lokal genutzt oder über eine Leitung an andere Verbraucher weitergegeben wird.

Wichtig für eine zukünftige Energieversorgung ist insbesondere, inwieweit sich die heute gebräuchlichen Energieträger, speziell die fossilen Brennstoffe, durch Elektrizität, Wärme und Gas ersetzen lassen, um Verbraucher zu versorgen. Im Bild 2 ist zu erkennen, dass es keine Anwendung gibt, die nicht durch elektrische Energie oder Gas versorgt werden könnte. Damit wäre eine vollständige Versorgung aus erneuerbaren Energien unter Verzicht auf Kernenergie und fossile Brennstoffe möglich.

2.2 Inhalte und Struktur der Technologiesteckbriefe

Als Grundlage für die Beurteilung der verschiedenen Energieversorgungsoptionen dienen Technologiesteckbriefe. In diesen Steckbriefen sind die grundlegenden Daten für die unterschiedlichen Wandlungs- und Speicher-

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

technologien, aber nicht für die Energieübertragung, für die Zwecke dieser Studie zusammengefasst. Ausgangspunkt für die Steckbriefe ist der heutige Stand der Technik mit einer Abschätzung von Entwicklungspotenzialen. Innovationssprünge, wie die Anwendung neuer physikalischer Phänomene, sind in dieser Aufstellung nicht enthalten, da sie nicht vorhersagbar sind.

Die Einteilung erfolgt in 28 Technologiesteckbriefen nach den Klassen Energie-Wandler oder Energie-Speicher. Dies unterstreicht die neue Sichtweise auf das Energiesystem, weg von klassischen Erzeugern und Verbrauchern. Innerhalb der Klassen werden Technologien in Typen und deren Varianten eingeteilt. Teilweise erfolgt, sofern zweckmäßig, eine Zusammenfassung mehrerer Varianten zu einem Typ.

Wesentliche Merkmale sind die Art der Bezugs-, wie auch der Zielenergie, wobei technisch verwertbare Verluste, meist Wärme, auch als Zielenergie bezeichnet werden. Die heute erreichten und zukünftig möglichen Wirkungsgrade zusammen mit den Leistungsgrößen (bei Speichern auch Speichergröße) runden die technischen Merkmale ab. Es sind, wenn erforderlich, Einzelwirkungsgrade von unterschiedlichen Systemkomponenten mit aufgeführt.

Die Technologiesteckbriefe beinhalten neben den Investitionskosten auch eine Abschätzung der zukünftigen Kostenentwicklung. Die Ist-Daten basieren auf Literaturauswertungen, die Kostenentwicklungen auf eigenen Annahmen. Insbesondere bei Wandlern, welche fossile Brennstoffe benutzen, sind die Betriebskosten und deren Entwicklung von den Rohstoffpreisen und deren Schwankungen abhängig. Darüber hinaus haben gerade bei diesen Wandlern politische und regulatorische Vorgaben (z.B. Steuern, Emissionshandel) einen großen Einfluss auf die Kosten und sind daher nicht angegeben. Weiterhin wurden Akzeptanzrisiken für die Technologien und der CO_2-Eintrag in die Atmosphäre bei Betrieb prinzipiell abgeschätzt.

Unter Bemerkungen werden Aussagen zu Besonderheiten der jeweiligen Technologie, ggf. Anforderungen an deren Weiterentwicklung und Trends als auch Forschungserfordernisse aufgezeigt.

2.2.1 Energie-Wandler

Der Begriff Wandler wird generalisiert betrachtet. Demzufolge sind Wandler Technologien, welche dem betrachteten Bilanzkreis Energie zuführen, Energie innerhalb des Bilanzkreises in eine andere Energieform umwandeln oder Energie aus dem Bilanzkreis abführen. Energie zuführende Wandler können z.B. aus „Umweltenergie“ (kinetische Energie von Wind oder Wasser, elektromagnetische Strahlung der Sonne), fossilen Energieträgern oder Kernenergie dem betrachteten Bilanzkreis Energie zur Verfügung stellen. Konditionierende Wandler führen eine Wandlung von einer in eine andere

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Energieform aus (z.B. Elektrolyseur wandelt Wasserstoff aus Elektrizität). Abführende Wandler entziehen dem Bilanzkreis Energie, um einen Bedarf zu decken. Dies trifft beispielsweise für Wärmepumpen zu. Somit sind auch alle elektrischen Haushaltsgeräte Wandler, werden hier aber nicht mit aufgelistet. Teilweise gibt es Mischformen, wenn z.B. beim konditionierenden Wandler die Wärmeverluste genutzt werden. In Tabelle 1 sind 17 Wandler nach der Einteilung Energie zuführende Wandler, Energie konditionierende Wandler und Energie abführende Wandler mit den Entwicklungspotenzialen zusammengestellt.

Die weiteren Kenngrößen sind im Anhang 1 dargestellt.

Tabelle 1: Wandler und deren Entwicklungspotenziale

Wandlerarten	**Entwicklungspotenziale**		
	niedrig	**mittel**	**hoch**
Energie zuführende Wandler	Onshore-WEA, Solarthermie, Wasserkraftwerke, therm. Kraftwerke	Offshore-WEA, PV-Anlagen, Geothermie	Klein-WEA
Energie konditionierende Wandler		motor. BHKW	Brennstoffzelle *Power2Gas:* Ammoniak-herstellung, Elektrolyse, Methanisierung
Energie abführende Wandler	Gaskessel, Wärmespeicher-heizung, Infrarot-Heizung	Wärmepumpen	

Neben den Wandlern, die eine Energieform in eine andere Form umwandeln, gibt es Wandler, die nur die Größen in einer Energieform verändern, beispielsweise für die Übertragung von Energie über lange Strecken. Da die genaue Ausgestaltung des jeweiligen Systems kein Bestandteil der Betrachtungen dieser Studie ist, werden diese Wandler hier nur kurz erwähnt. Zu diesen Wandlern gehören beispielsweise Transformatoren oder Leistungselektronik für das elektrische System oder Kompressoren für die Gasversorgung. Neben diesen Anlagen sind für die Übertragung der Energie entsprechende Leitungen (Kabel, Freileitungen, Rohrleitungen) erforderlich, in denen weitere Verluste auftreten. Die einzelnen Verluste und der technische Aufwand für unterschiedliche Konzepte[3] werden im Rahmen dieser Studie nicht beziffert; hier sind die Möglichkeiten der Ausgestaltung zu vielfältig.

3 Beispielsweise im elektrischen Netz unterschiedliche Betriebsfrequenzen (AC, DC), Spannungsebenen, Netztopologien, …

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

2.2.2 Energie-Speicher

Die Beschreibungen der Speichertechnologien beinhalten im Wesentlichen die eigentlichen Speichermedien. Teilweise sind die für Beladung und Entladung erforderlichen Wandler in den Steckbriefen enthalten, wenn diese ausschließlich dem Speicher zugeordnet sind. Eine allgemeine Einteilung von Speichern in Kurzzeitspeicher und Langzeitspeicher mit den Anwendungen, technischen Merkmalen, Selbstentladung, mögliche Zyklen und Beispielen ist in Tabelle 2 enthalten. Bei Kurzzeitspeichern wird nochmals zwischen Leistungsspeichern und Verschiebespeichern unterschieden.

Für diese Studie spielen Leistungsspeicher eine untergeordnete Rolle, da sie im heutigen elektrischen Netz für Regelleistung sowie Systemdienstleistungen oder in Anwendungen wie Fahrzeugen zur Energieeinsparung (beispielsweise regeneratives Bremsen) benutzt werden.

Tabelle 2: Einteilung der Speicher nach Charakteristiken in Anlehnung an [7]

	Kurzzeitspeicher		**Langzeitspeicher**
	Leistungsspeicher	*Verschiebespeicher*	*Saisonale Speicher*
Zeitraum	ms … min	min … h … d	d … Wochen
Anwendung	Regelleistung Systemdienstleistung	Ausgleich innerhalb eines Tages	langfristige Flauten saisonale Differenzen
technische Merkmale	großes Verhältnis von Leistung zu Speicherkapazität	geringe Be- und Entladeverluste	sehr große Speicherkapazität
Selbstentladung	hoch	gering	sehr gering
Zyklen	viele pro Tag	wenige pro Tag	wenige pro Jahr
Beispiele	Schwungradspeicher Kondensatoren Batterien	Batterien Druckluftspeicher Pumpspeicherwerke	chemische Speicher (Wasserstoff/Methan)

Verschiebespeicher sollen die Energiebilanz während eines Tages ausgleichen. Eine geringe Selbstentladung ist zulässig, wohingegen die Be- und Entladeverluste möglichst gering gehalten werden sollten. Die Verschiebespeicher durchlaufen wenige Zyklen am Tag. Die Langzeitspeicher, welche auch als saisonale Speicher bezeichnet werden, müssen langfristige Flauten und saisonale Differenzen bei Energiebereitstellung und Energieverbrauch ausgleichen. Daher ist eine sehr geringe Selbstentladung von Bedeutung.

Die in den Technologiesteckbriefen im Anhang 1 aufgelisteten Speicher haben häufig Elektrizität als Bezugs- und Zielenergie. Die Energieform des Speichers an sich ist jedoch meist abweichend eine andere Energieform[4], beispielsweise chemische Energie bei Batterien, potenzielle Energie bei

4 Daher sind üblicherweise Speichern entsprechende Wandler vor- und nachgeschaltet

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Pumpspeicherwerken oder Rotationsenergie bzw. kinetische Energie bei Schwungradspeichern.

Die Wirkungsgrade η für diese Speicher liegen zwischen 70 und 95%. Es ist jedoch auch die Selbstentladung zu bewerten. Die Selbstentladung wird in Prozent des gesamten Speichervermögens je Zeiteinheit angegeben und beschreibt den Verlust an nutzbarer Energie. Bei Schwungradspeichern beispielsweise sind die Reibungsverluste so groß, dass die Selbstentladung 5% bis 15% der gespeicherten Energie pro Stunde beträgt. Bei Doppelschicht-Kondensatoren kommt es aufgrund von Leckströmen zu Selbstentladungsraten mit 10% bis 20% pro Tag. Bei Batterien ist die Selbstentladung mit wenigen Prozent pro Monat im Vergleich sehr gering. Jedoch ist die Selbstentladung bei Batterien stark temperaturabhängig. Insbesondere hohe Temperaturen führen zu einer wesentlichen Erhöhung der Selbstentladung.

Weitere bedeutende Energiespeicher sind Gasspeicher. Dabei findet keine weitere Umwandlung statt, sondern das Gas wird als Energieträger mit dem jeweiligen Energiegehalt gespeichert. Dies ist der wesentliche Unterschied zur Elektrizität, welche nicht in großen Mengen direkt gespeichert werden kann. Eine wichtige Kenngröße, die Energiedichte, ist nicht die Eigenschaft des Gasspeichers, sondern des Gases an sich. In Tabelle 3 sind die Energiedichten von Wasserstoff und Erdgas bezogen auf Volumen bzw. auf Masse zusammengefasst. Für Wasserstoff sind die Energiedichten noch für verschiedenen Drücke aufgeschlüsselt. Als Referenz sind die Kennwerte für Benzin angegeben. Wasserstoff hat bezogen auf die Masse die höchste Energiedichte, jedoch ist die Energiedichte bezogen auf das Volumen eher gering.

Tabelle 3: Energiedichten nach Volumen und Masse für Wasserstoff, Erdgas und Benzin [8]

		bezogen auf Volumen	**bezogen auf Masse**
Wasserstoff	(flüssig)	2.360kWh/m³	33,3kWh/kg
	(70MPa)	1.855kWh/m³	
	(20MPa)	530kWh/m³	
	(Normaldruck)	3kWh/m³	
Erdgas	(20MPa)	2.580kWh/m³	13,9kWh/kg
Benzin		8.760kWh/m³	12,7kWh/kg

Im Vergleich zu anderen Speichern sind die Energiedichten von Gasen sehr hoch. Bleibatterien erreichen eine Energiedichte von nur 100kWh/m³ und Lithium-Ionen-Akkumulatoren 200kWh/m³. Bei Druckluftspeichern und Pumpspeichern ist die Energiedichte mit ca. 1kWh/m³ sehr gering.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Gasspeicher haben einen hohen Wirkungsgrad von über 99% und eine Selbstentladung ist zu vernachlässigen. Zudem ist die Lebensdauer sehr hoch.

Wärmespeicher runden die Speichermöglichkeiten ab. Sie werden dezentral nahe am Bedarf installiert, da Wärme als Energieträger für den überregionalen Energieausgleich nicht in Frage kommt.

2.3 Zwischenfazit

Konvergenz der Energieträger

Die technologischen Entwicklungen auf dem Gebiet der Energiewandler und Energiespeicher ermöglichen eine stärkere Konvergenz zwischen den Energieträgern. Zum einen gibt es ein weites Spektrum von Technologien, die eine anwendungsspezifische Applikation ermöglichen. Hierdurch wird es möglich, die jeweiligen Vorteile der Energieträger bei Energiebereitstellung, Übertragung, Verteilung, Speicherung und Anwendung zu optimieren. Zum Beispiel wird eine zeitliche Entkopplung der Nutzung von Wärme und Elektrizität durch thermische Speicher ermöglicht. Hierdurch ergeben sich für das Gesamtsystem vorteilhafte Betriebsweisen z.B. von Brennstoffzellen und Wärmepumpen, die beispielsweise Spitzenlasten der Elektrizitätsversorgung verringern und damit den Übertragungsbedarf senken können. Darüber hinaus kann die Gesamteffizienz des Energiesystems gesteigert werden.

Schlussfolgerung

Ein Teil der aufgeführten Wandler und Speicher haben ihre Einsatzpotenziale bisher nur im Labor bzw. in Pilotanlagen gezeigt. Durch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten müssen sichere, robuste, einfach handhabbare und preiswerte Produkte entwickelt werden, um die Marktreife zu erreichen.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

3 Energetische Betrachtungen zu einer nachhaltigen Energieversorgung in Deutschland

3.1 Betrachtungshorizont und -rahmen

Die Task Force gibt für den Betrachtungshorizont dieser Studie bewusst keine Jahreszahlen an. Das Erreichen eines möglichst hohen Anteils an regenerativen Energiequellen und somit eine nachhaltige, wirtschaftliche und sichere Versorgung ist weniger von der Technik an sich, sondern hauptsächlich durch politische Entscheidungen, öffentliche Akzeptanz und die gesellschaftliche Bereitschaft, dafür zu zahlen, geprägt. Die Ingenieurwissenschaften müssen sich somit im jeweiligen politischen und gesellschaftlichen Rahmen bewegen.

Die vorgestellten Konzepte werden unter dem Gesichtspunkt der Energiebereitstellung mit einem möglichst hohen Anteil an regenerativen Energien entwickelt. Darüber hinaus werden Effizienzsteigerungen bei den bisherigen Elektrizitätsanwendern erwartet. Insbesondere im industriellen Anwendungsbereich werden Möglichkeiten zur weiteren Steigerung der Effizienz genutzt werden. Der Wärmebedarf bei Wohngebäuden wird beachtlich reduziert und hat durch den Querverbund zwischen Elektrizität und Wärme (Wärmepumpen, Blockheizkraftwerken oder Brennstoffzellen) eine große Bedeutung für das Gesamtsystem. Auch die Mobilität spielt eine wichtige Rolle.

Mögliche Speicherpotenziale werden bei zahlreichen Anwendungen gesehen. Dies betrifft thermische Speicher für Raumwärme und Warmwasser. Der Einsatz von Batterien und Wasserstoff wird sowohl für mobile als auch für stationäre Anwendungsmöglichkeiten diskutiert.

Der Betrachtungsrahmen umfasst die Sektoren:

- Haushalte,
- Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
- Industrie.

Im Sektor Verkehr wurde lediglich die Elektromobilität im Sinne von Individualverkehr betrachtet.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Den größten Bedarf an Energie haben die Anwendungen:

- mechanische Energie,
- Raumwärme und
- Prozesswärme,

welche heute über 80% des gesamten Energiebedarfs ausmachen. Weitere Anwendungen sind die Bereiche Warmwasser, Kälte, Beleuchtung und die Informations- und Kommunikationstechnik.

3.2 Langfristige Reduzierung des Energiebedarfs

Endenergie[5] ist der Anteil der Primärenergie, welche den Verbrauchern nach Wandlungs- und Übertragungsverlusten zur Verfügung steht. Der Energiebedarf bestimmt die erforderliche Energiebereitstellung. Dabei bestimmen die Kosten für die Energie und deren Bereitstellung für viele, insbesondere große Verbraucher den Bedarf; insofern beeinflussen die Kosten auch die Bereitschaft bzw. die Notwendigkeit für den effizienten Einsatz von Energie. Neben dem Energiebedarf bestimmt der in der Regel schwankende Leistungsbedarf die Dimensionierung eines Energiesystems.

Die Task Force leitet aus dem Energiekonzept der Bundesregierung [1] mögliche Entwicklungspfade für den Energiebedarf ab. Die weiteren wesentlichen Informationen stammen aus den Energiedaten [9], welche vom BMWi zusammengestellt und veröffentlicht werden. Ausgangsgröße ist der Primärenergieeinsatz, welcher bis ins Jahr 2050 gegenüber 2008 um 50% reduziert werden soll [1]. Somit soll dieser von knapp 4.000TWh/a auf 2.000TWh/a sinken. Damit ist auch der Endenergiebedarf deutlich zu reduzieren.

Für die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Analysen werden die Endenergiebedarfe betrachtet. Der Endenergiebedarf setzt sich nach den Anwendungen in Tabelle 4 zusammen. In der Spalte „Endenergiebedarf 2013“ E_{2013} sind die Werte nach den Energiedaten [9] zusammengetragen. Der Grad der Reduzierung ist aus dem Energiekonzept der Bundesregierung abgeleitet [1]. Dort werden verschiedene Referenzjahre verwendet. Da die Energiebedarfe sich in den Jahren 2005 bis 2013 nicht wesentlich verändert haben[6], werden die Einsparziele jeweils für den Energiebedarf 2013 angewendet.

5 Die verschiedenen Energieformen sind im Glossar (S. 73) beschrieben.
6 Die Wirtschaftskrise 2009 hat zu einem Einbruch des Bedarfs geführt. Dies wird vernachlässigt, da es durch die wirtschaftliche Erholung wieder einen deutlichen Anstieg gab.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Im Energiekonzept der Bundesregierung wird bei der Reduzierung nicht genau nach den einzelnen Anwendungen unterschieden. Daher werden hier Annahmen getroffen. Es wird angenommen, dass die Reduzierung der mechanischen Energie um 40% zu erreichen ist, da der Endenergieverbrauch im Verkehrsbereich um 40% bis zum Jahr 2050 gesenkt werden soll. Allgemein wird ein großes Einsparpotenzial bei Gebäuden gesehen. Die Politik erwartet durch klimaneutrale Neubauten und Wärmedämmung bestehender Gebäude bis 2050 eine Reduzierung des Energieverbrauches aller Gebäude um 80% gegenüber dem Jahr 2008. Diese Werte werden als Annahmen für die Studie ohne weitere Bewertung übernommen.

Tabelle 4: Endenergiebedarf nach Anwendungsbereichen

Anwendung	E_{2013} in TWh/a [9]	Reduzierung nach [1]	E_A in TWh/a (Annahme TF)
mech. Energie	924	-40%	554
Raumwärme	627	-80%	125
sonst. Prozesswärme	550	-25%	413
Warmwasser	124	-25%	93
sonst. Prozesskälte	45		45
Beleuchtung	89	-50%	45
IKT	61		61
Klimakälte	9		9
Summe	2.420		1.335

Im Energiekonzept der Bundesregierung [1] werden folgende Reduzierungen angegeben:

- Reduzierung des Primärenergiebedarfs für Raumwärme
  bis 2020 um 20% und
  bis 2050 um 80%

- Reduzierung des Endenergieverbrauchs im Verkehrsbereich gegenüber 2005
  bis 2020 um 10% und
  bis 2050 um 40%

- Reduzierung des Gesamtstromverbrauchs gegenüber 2008
  bis 2020 um 10% und
  bis 2050 um 25%

Da die Anwendungen Kälte und IKT eine geringe Rolle spielen, wird für diese keine Reduzierung prognostiziert. Für die Task Force ergibt sich der in Tabelle 4 angegebene Endenergiebedarf von 1.335TWh/a und somit eine

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Reduzierung von ca. 45%. Eine Zielgröße zur Reduzierung des Endenergiebedarfs wird im Energiekonzept [1] nicht angegeben.

Der Nettostromverbrauch betrug in den letzten Jahren ca. 530 bis 550TWh/a. Die Task Force geht davon aus, dass der Nettostromverbrauch durch effizientere Geräte und Prozesse gesenkt werden kann. Die Reduzierung des Stromverbrauchs um 25% [1] wird als machbar eingeschätzt, jedoch ist durch die Substitution von fossilen Brennstoffen durch Elektrizität, insbesondere für mechanische Antriebe inklusive Elektromobilität und Wärme, von einer Steigerung des Stromverbrauchs auf ca. 650 bis 800TWh/a auszugehen. Unter Vernachlässigung der Verluste[7] wird im folgenden Abschnitt versucht, diesen Bedarf aus erneuerbarer Energie zu decken.

3.3 Bereitstellung aus regenerativen Energien

Die erforderliche Endenergie soll dem Energiesystem möglichst aus regenerativen Energiequellen zugeführt werden. Streng genommen findet eine Wandlung aus einer Umweltenergie in eine Sekundärenergie statt. Umweltenergie ist beispielsweise die kinetische Energie von Wind und Wasser oder die elektromagnetische Strahlung der Sonne. Sekundärenergie ist beispielsweise Elektrizität oder Wasserstoff. Energie wird in Form dieser Energieträger zum Verbraucher übertragen und ist dort direkt nutzbar. Diese Studie betrachtet die Energiebereitstellung durch:

- Offshore-Windenergieanlagen,
- Onshore-Windenergieanlagen,
- Photovoltaik-Anlagen,
- Biomassekraftwerke und
- Wasserkraftwerke,

welche Elektrizität erzeugen.

Die Energiebereitstellung ist mit diesen Technologien zum großen Teil stark abhängig von Tages- und Jahreszeiten sowie Wetterlagen.

Die Kapazitäten für die Energiebereitstellung der jeweiligen Umweltenergien sind durch die begrenzte Anzahl von möglichen Standorten und deren

7 Verluste in Energieübertragungssystemen sind stark technologieabhängig und im Rahmen der Studie nicht abschätzbar

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Potenzial beschränkt. In Tabelle 5 sind die derzeitig in Deutschland installierten Leistungen $P_{inst\ 2013}$ zur Bereitstellung von Elektrizität aus erneuerbaren Energien aufgeführt. Zudem sind die für diese Studie angenommenen installierten Leistungen $P_{inst\ A}$ in Anlehnung an das Energiekonzept der Bundesregierung [1] angegeben. Diese haben der Task Force als Grundlage für ihre Untersuchungen gedient.

Tabelle 5: Installierte Leistung zur Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien

Erneuerbare-Energien-Anlagen	$P_{inst\ 2013}$ in GW nach [9]	$P_{inst\ A}$ in GW (Annahme TF nach [1])
Offshore-WEA	0,3	10…50
Onshore-WEA	34,3	150…250
Photovoltaik-Anlagen	35,9	100…200
Biomassekraftwerke	8,1	10
Wasserkraftwerke	5,6	6
Summe	84,2	276…516

Es sei darauf hingewiesen, dass die von der Task Force abgeschätzte erforderliche installierte Leistung in einem Bereich von 276 bis 516GW etwa das Drei- bis Sechsfache der heutigen Spitzenlast von rd. 80GW ist.

Aus den angenommenen Werten für die elektrische Leistung $P_{inst\ A}$ werden in Tabelle 6 mithilfe von Erfahrungswerten für Volllaststunden der einzelnen Wandlungstechnologien deren Energiebereitstellung abgeschätzt.

Tabelle 6: Volllaststunden und Ertragspotenziale aus erneuerbaren Energien pro Jahr

Erneuerbare Energien	$P_{inst\ A}$ in GW	t_{voll} in h/a	E_A in TWh/a
Offshore-WEA	10…50	4.500	45…225
Onshore-WEA	150…250	1.500	225…375
Photovoltaik-Anlagen	100…200	1.000	100…200
Biomassekraftwerke	10	6.000	60
Wasserkraftwerke	6	5.000	30
Summe	276…516		460…890

Die Summe der aus erneuerbaren Energieträgern erzeugbaren elektrischen Energie liegt im Bereich von 460 bis 890TWh/a. Der für die Studie angenommene Stromverbrauch von 650-800TWh/a würde damit in etwa abgedeckt. Offen bleibt dabei zunächst, inwieweit die naturbedingte Fluktuation dieser Energiequellen mit dem zeitlichen Verlauf des Bedarfs in Deckung gebracht werden kann.

Es könnten etwa 50% der gesamten Endenergie von 1.335TWh/a (vgl. Tabelle 4) durch Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen bereitgestellt werden.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Eine Analyse, in welchem Maße durch den grenzüberschreitenden Transport von Gütern Energie nach Deutschland importiert oder aus Deutschland exportiert wird, ist nicht Gegenstand der Studie.

3.4 Fazit

- Für die Untersuchungen wurden im Wesentlichen die Eckdaten des Energiekonzeptes der Bundesregierung und des BMWi zugrunde gelegt, ohne jedoch einen Zeitrahmen festzulegen.

- Es wird auch eine Reduktion des Endenergiebedarfs um 50% zugrunde gelegt, erwartet wird jedoch eine Zunahme des Elektrizitätsbedarfs.

- Grundsätzlich wird die bilanzielle Deckung des gesamten Elektrizitätsbedarfs aus erneuerbaren Energiequellen für möglich gehalten.

- Der Zubau an erneuerbaren Energiequellen führt dazu, dass diese Leistung insgesamt etwa das Vierfache der heutigen Höchstlast beträgt. Dabei folgt die räumliche Verteilung den natürlichen Gegebenheiten (Sonne im Süden, Wind im Norden und offshore) und weniger der geographischen Verteilung des Bedarfs. Hiermit hängt auch die räumliche Verteilung bzw. Konzentration von Erzeugungsanlagen zusammen.

- Zur Ergänzung der wenig planbaren Erzeugungsleistungen aus erneuerbaren Energien mit hoher Fluktuation und steilen Gradienten müssen zusätzlich auf Abruf einsetzbare Erzeugungskapazitäten auf Basis konventioneller Energieträger vorgehalten werden, um auch in Zukunft die Ansprüche von Gesellschaft, Handel, Gewerbe, Industrie und Verkehr an eine hohe Versorgungssicherheit zu erfüllen.

- Zusätzlich werden Speicherkapazitäten zum zeitlichen Ausgleich zwischen Maxima und Minima auf Seiten von Verbrauch und Erzeugung benötigt.

- Außerdem sind Übertragungskapazitäten für den regionalen und überregionalen Ausgleich zwischen Gebieten mit Überschuss bzw. Mangel an Erzeugungsleistung erforderlich.

- Die Einbindung der großen Zahl an der Elektrizitätsversorgung beteiligten Elementen führt zu einer komplexen Betriebsführung. Hierfür sind

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

moderne Systeme zur Steuerung und Regelung (IKT) sowie der Informationsübertragung erforderlich.

- Fragen der Betriebsführung künftiger Netzstrukturen zur Elektrizitätsversorgung im Normalbetrieb wie im Störungsfall (wie Spannungshaltung, Frequenzhaltung, Blindleistungshaushalt, Leistungsreserve, Lastmanagement, Notmaßnahmen im Störungsfall, Netzwiederaufbaustrategien, Schwarzstartfähigkeit usw.) bedürfen der Klärung und einer Festlegung.

- Auch für die Betriebsführung künftiger Gasnetze bedarf es für den Normalbetrieb und den Störungsfall technischer Festlegungen (z.B. Gasdrücke, Beschaffenheit des Gases, Umkehr des Gasflusses).

- Die Frage der Verantwortung für die Führung des integrierten Gesamtsystems (bestehend aus elektrischen Netzen und Gasnetzen), das eine Vielzahl von Betreibern von Erzeugungsanlagen, Netzen und Speichern sowie Verbrauchern umfasst, behält auch in Zukunft einen hohen Stellenwert, um die gewünschte Bedarfsdeckung und Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

4 Lokale Versorgung – der Zellulare Ansatz

4.1 Die Grundidee des Zellularen Ansatzes

4.1.1 Einführung

Eine Energieversorgung, welche möglichst aus regenerativen Quellen erfolgen soll, benötigt aufgrund der volatilen Erzeugungscharakteristiken wesentlich höhere installierte Leistungen. Zum Ausgleich der Volatilität muss sich der Verbrauch an die Einspeisung anpassen, zusätzlich sind (saisonale) Speicher erforderlich. Auch die heutigen Energienetze müssen umstrukturiert werden. Hierfür müssen auch bisherige Grundsätze bei der Planung und dem Betrieb von Netzen in Frage gestellt werden. In der Studie wird untersucht, ob z.B. ein Zellularer Ansatz auf die künftige Planung- und den Betrieb von Energiesystemen angewandt werden kann.

4.1.2 Die Grundsätze der heutigen Netze

Nachfolgend werden zunächst einige Grundsätze zusammengestellt, die für die Planung und den Betrieb der bestehenden elektrischen Netze und Gasnetze wesentlich sind.

Einhaltung der Netzfrequenz von 50Hz

Eine wesentliche Zielgröße der Betriebsführung von elektrischen Netzen ist die Einhaltung einer stabilen Netzfrequenz von 50Hz in engen Grenzen. Auftretende Abweichungen sind Lastschwankungen geschuldet, die durch die Regelleistung der dafür vorgesehenen Kraftwerke ausgeglichen werden. Frequenzänderungen nach unten zeigen eine Untererzeugung, Änderungen nach oben eine Übererzeugung an. Diese Frequenzabweichungen werden von den Kraftwerken für die Leistungs-/Frequenzregelung eingesetzt.

Enge Grenzen bei der Spannungshaltung

Auf allen Spannungsebenen, von der Hoch- und Höchstspannung bis zur Niederspannung, wird versucht, die jeweilige Nennspannung in engen Grenzen zu halten. Alle Geräte müssen innerhalb der gegebenen Grenzen ohne Funktionseinschränkungen funktionieren. Insbesondere Überspannungen können zur Zerstörung oder zumindest zu verringerter Lebensdauer von Anlagen und Betriebsmitteln führen, Unterspannungen können Funktionseinschränkungen hervorrufen.

Einhaltung der Spannungsqualität

Als Spannungsqualität bezeichnet man die Übereinstimmung von Nennwerten der Netzspannung mit den aktuellen Größen. Dazu gehören neben den bereits beschriebenen Parametern Frequenz und Spannungshöhe

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

auch die Kurvenform und damit der Oberschwingungen sowie mögliche Störungen. Bei den Kurzzeitstörungen sind insbesondere Flicker zu erwähnen, die bei Kurzunterbrechungen zur Klärung atmosphärischer Störungen oder zyklischen Laständerungen auftreten.

Durchgängiger Einsatz von Wechselspannung
Wurde zu Beginn der Elektrifizierung teilweise sehr heftig über den Einsatz von Gleich- oder Wechselspannung diskutiert, hat sich im Laufe der Zeit der durchgängige Einsatz von Wechselspannung durchgesetzt.

Versorgungszuverlässigkeit durch zusammengeschaltete Netze
Die elektrischen Netze wurden unter der Annahme errichtet, dass Kraftwerke zur Erzeugung elektrischer Energie in ausreichender Zahl vorhanden, möglichst in der Nähe der Lastschwerpunkte platziert und fahrplanmäßig einsetzbar sind. In Verbindung mit der Zusammenschaltung der Verbund- und Verteilnetze sind dies die Eckpfeiler der heutigen Versorgungszuverlässigkeit. Hierzu trägt unter anderem das (n-1)-Planungs- und Betriebskriterium bei.

Sieht man von kritischen Anwendungen wie beispielsweise in Krankenhäusern, Rechenzentren oder Verkehrssteuerungen ab, die jeweils über eigene Notstromversorgungen verfügen, ist die heutige Versorgungszuverlässigkeit der Endverbraucher in Deutschland im internationalen Vergleich sehr hoch.

Netzstabilität durch Momentanreserve
Netze mit überwiegend fossil-gefeuerten Kraftwerken und Kernkraftwerken verfügen über große drehende Massen in Form von angeschlossenen Generatoren-Turbinen-Einheiten. Diese tragen in einem hohen Maße zur Kurzzeitstabilität der Netze bei. Erzeugungseinrichtungen, die über Leistungselektronik an die Netze angebunden sind, haben andere Eigenschaften und tragen nur bedingt zur Netzstabilität bei.

Unidirektionaler Betrieb von Gasnetzen
Gasnetze werden heute für eine unidirektionale Flussrichtung geplant. Die Rück-speisung in druckhöhere Netze wird nur ausnahmsweise, wie z.B. bei größeren Biogas-Einspeiseanlagen, vorgesehen.

Einheitliche Qualitätsparameter von Gas
Durch die volumetrische Gasabrechnung werden in größeren zusammenhängenden Netzgebieten einheitliche Qualitätsparameter wie bspw. der spezifische Energieinhalt, aber auch brenntechnische Parameter wie der Wobbewert, vorausgesetzt. Mögliche Freiheitsgrade durch moderne Mess- und Simulationsverfahren und flexible Anlagentechnik werden noch nicht genutzt. Das Potenzial der gleichzeitigen Übertragung verschiedener Brenngase durch z.B. höhere Wasserstoffanteile im Erdgas kann damit nicht genutzt werden.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass alle dargestellten Grundsätze ihre Bedeutung haben. Diese wurden über die Zeit immer weiter verfeinert und an sich ändernde Anforderungen angepasst. Vergleicht man diese aber mit den heute verfügbaren technischen Möglichkeiten, so findet man neue Technologien, die bisher bei der Betriebsführung und der Optimierung nur bedingt zum Einsatz kommen. Dazu zählen u.a. der großflächige Einsatz von Leistungselektronik, der Fragen zur Frequenz- und Spannungshaltung ändern könnte, die Breitbandkommunikation sowie moderne Methoden zur Regelung und Optimierung wie z.B. neuronale Netze.

4.1.3 Neue Prinzipien der Netzplanung und des Netzbetriebs

Automatisierungstechnik als Vorbild

Es wird heute allgemein anerkannt, dass die Zukunft der elektrischen Energieversorgung insgesamt dezentraler werden und eine größere Anzahl kleinerer Einheiten beinhalten wird. So haben wir heute bereits mehr als eine Million Erzeugungsanlagen in der Bundesrepublik Deutschland, die es in bestehende Netze mit nach wie vor hohem Anteil von großen Erzeugungseinheiten zu integrieren gilt. Es stellt sich die Frage, wie die Struktur der elektrischen Energieversorgung aussehen sollte, wenn der Anteil von dezentralen (erneuerbaren) Erzeugern noch weiter steigt.

Ein Vorbild für die Konzeption könnte die Automatisierungstechnik sein. In dieser Disziplin hat sich in den vergangenen Jahrzehnten auch ein massiver Wandel hin zu dezentralen intelligenten Einheiten, die miteinander vernetzt in einem System betrieben werden, vollzogen. Bei Planung und Betrieb solcher Strukturen haben sich zwei Grundsätze durchgesetzt, die auch in der Gestaltung elektrischer Netze der Zukunft hilfreich sein werden.

Der erste Grundsatz betrifft die Grundstruktur von Automatisierungssystemen. Man geht heute davon aus, dass dann eine optimale Struktur erreicht ist, wenn man in der Struktur der Leittechnik die des zu kontrollierenden Prozesses erkennt bzw. wiederfindet.

Der zweite Grundsatz betrifft die hierarchische Verarbeitung von Daten und Informationen. In der Automatisierungstechnik hat man gelernt, dass man jeweils eine Ver- bzw. Bearbeitung auf der niedrigsten Ebene durchführen sollte. Wenn man die Bearbeitung auf eine höhere Ebene schiebt, kann das schnell zu Kapazitätsengpässen oder Zeitverzögerungen führen.

Damit stellt sich die Frage, wie das Energiesystem der Zukunft gestaltet werden sollte, wenn man es auf den genannten Grundsätzen konzipieren möchte.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Das neue Grundprinzip für die Energieversorgung der Zukunft
Setzt man die beiden im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigten Grundsätze für Automatisierungssysteme als gegeben voraus und wendet sie auf Energieversorgungssysteme der Zukunft an, bedeutet dies

Erzeugung und Verbrauch von Energie auf der niedrigsten möglichen Ebene auszubalancieren.

Dieses Prinzip wird heute bereits oft dazu verwendet, sogenannte Microgrids [10] zu beschreiben, die im Inselbetrieb arbeiten. Dies ist aber ein anderer Kontext, der hier nicht weiter betrachtet werden soll.

4.1.4 Der Zellulare Ansatz

Es wird untersucht, ob das Prinzip von autarken Energiezellen über alle Ebenen der Energieversorgung realisiert werden kann. Das bedeutet, dass mehrere Zellen in einer Ebene sich auf der nächsthöheren Ebene wieder als eine einzelne Zelle abbilden und nach dem gleichen Grundprinzip behandelt werden. Es wäre also vorstellbar, dass sich die Struktur der Energieversorgung in Deutschland an örtliche Gegebenheiten und Verwaltungsebenen wie z.B. Haus, Straße, Ortsteil, Ort/Stadt, Kreis, Regierungsbezirk und Bundesland orientiert. Wichtig ist zu erwähnen, dass die Energiezelle selbst einem multi-modalen Ansatz folgt, d.h. es werden alle in der Zelle angewandten Energiearten wie z.B. Elektrizität und Wärme betrachtet.

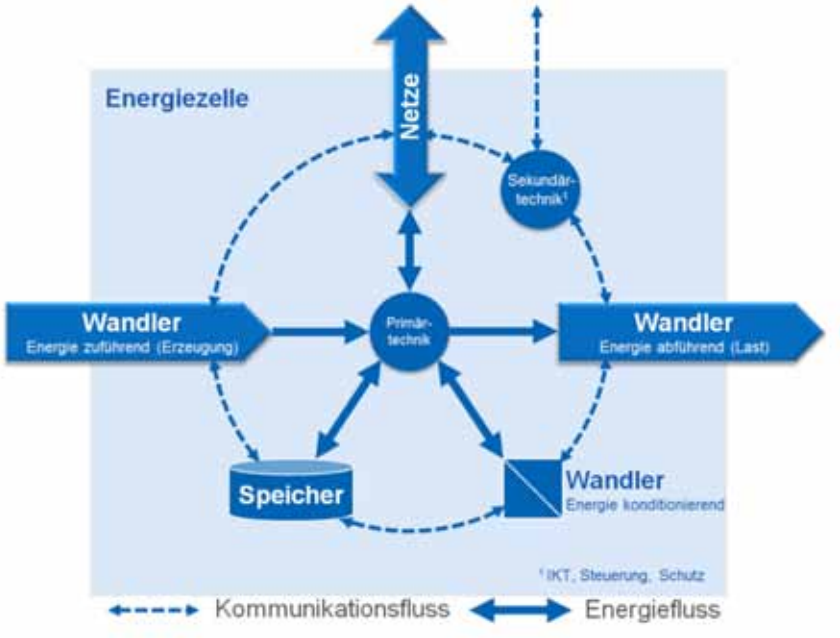


Bild 3: Prinzipielle Struktur einer Energiezelle

Bild 3 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Energiezelle. Als Obermenge kann jede Zelle über eigene Energie zuführende Wandler (im allgemeinen Sprachgebrauch Erzeugungseinheiten oder Erzeugung), Energie abführen-

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

de Wandler (Lasten) sowie einen oder mehrere lokale Speicher mit verschiedenen Technologien verfügen. Zudem ermöglichen konditionierende Wandler die Wandlung zwischen Energieformen im Bilanzkreis.

Zur Steuerung und Überwachung einschließlich notwendiger Schutzfunktionen kommt eine für die Zelle zuständige Einheit zum Einsatz. Diese übernimmt sowohl das gesamte Management der vorhandenen Einrichtungen als auch die kommunikationstechnische Verbindung mit benachbarten Zellen und der nächsthöheren Ebene. Teilmengen von Einrichtungen sind möglich. So würde eine konventionelle Installation eines Einfamilienhauses lediglich die Einheit „Last“ beinhalten. Steuerung und Überwachung würden wie bisher gelöst.

Nach außen bildet sich die Energiezelle mit wenigen Parametern ab. Für das Lastmanagement können das Leistungswerte sein, die im nächsten Betrachtungsintervall benötigt oder zur Verfügung gestellt werden. Fragen der Vertraulichkeit von Daten müssen konzeptionell gelöst werden.

Das neue Grundprinzip, also das Ausbalancieren von Erzeugung und Verbrauch auf einer möglichst niedrigen Ebene kann erheblichen Einfluss auf den Ausbau bzw. die Ertüchtigung von bestehenden Netzen haben sowie maßgeblich den Neubau bezüglich der zum Einsatz kommenden Energieträger beeinflussen.

Allgemeines Vorgehen

Die Task Force benutzt den Ansatz eines zellularen Konzepts, durchgeführt als Green-Field-Planung, zur Bewertung von Energienetzen zum möglichst lokalen Ausgleich von Energie. Hierzu werden drei typische Arten von Energiezellen:

- Haushalt
- Gewerbe-Handel-Dienstleistung (GHD)
- Industrie

betrachtet. In diesen drei Arten von Energiezellen werden der Energiebedarf und die mögliche Energiebereitstellung, jeweils nach Energieform, dargestellt und lokale Energieversorgungskonzepte erarbeitet und bewertet. Der zeitliche Verlauf von Erzeugung und Lasten wurde nur vereinfacht berücksichtigt.

Die Bewirtschafter der jeweiligen Energiezellen wählen mögliche Technologien aus, um die Versorgung autark oder ggf. mit einem Anschluss an Netze zu gewährleisten. Bewirtschafter sind beispielsweise für Energiezel-

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

len Haushalt die Hauseigentümer, welche sich für das passende Heizungssystem, Speicher, etc., nach verschiedensten Kriterien entscheiden.

Ziel des Zellularen Ansatzes ist es, den Energiebedarf mit der Energiebereitstellung in möglichst kleinen Einheiten auszugleichen. Die kleinste Einheit einer Energiezelle Haushalt ist somit ein Haus. Die Energiezellen stellen Energie selbst bereit, beispielsweise durch WEA oder PV-Anlagen. Überschüssige Energie kann vor Ort gespeichert, aber auch für andere Energiezellen im Nahbereich durch Energienetze genutzt werden. Für die lokale Versorgung der drei Energiezellen-Typen werden jeweils drei Szenarien untersucht:

- Energiezelle mit autarker Versorgung ohne Netzanschluss
- Energiezelle mit elektrischem Netzanschluss
- Energiezelle mit Gasnetzanschluss

Autarke Versorgung bedeutet in dieser Studie eine Versorgung ohne Netzanschluss; die bilanzielle Autarkie wird dabei nicht betrachtet. In Bild 4 sind eine Vielzahl der Technologien aus Kapitel 2 zur Versorgung von Energiezellen aufgezeigt. Die Energiezelle kann Energie in Form von Wärme, Elektrizität oder Gas aufnehmen, welches auf der linken Seite des Bildes dargestellt ist. Auf der rechten Seite ist der Bedarf in Form von Wärme, Mobilität und elektrischen Verbrauchern wie IKT, Beleuchtung oder mechanischen Anwendungen angedeutet. In der Mitte befinden sich verschiedenste Wandlungs- und Speichertechnologien.

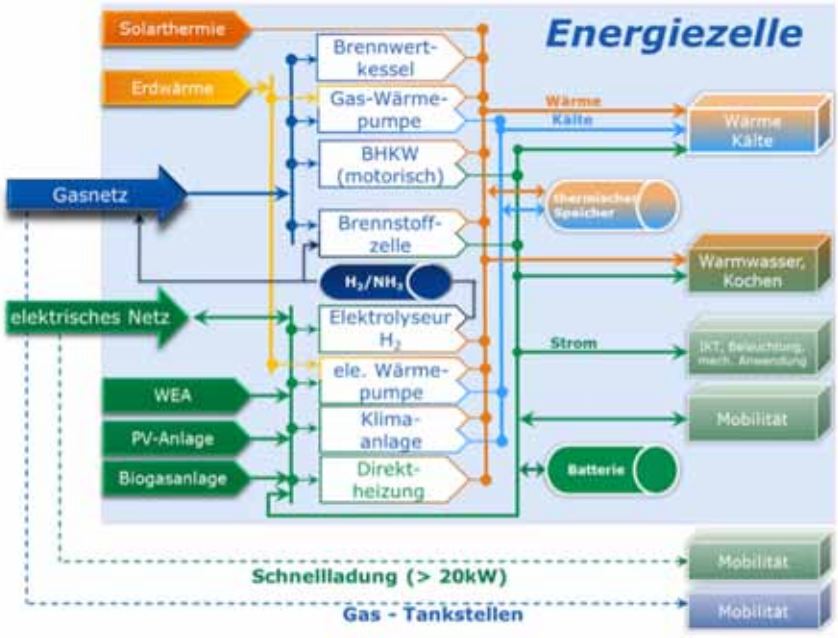


Bild 4: Technologieportfolio für den Zellularen Ansatz

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Der Energiebedarf für die Mobilität kann entweder aus der Energiezelle selbst oder außerhalb der Energiezellen durch Tankstellen gedeckt werden.

Es ist davon auszugehen, dass alle in Bild 4 gezeigten Technologien nicht in einer Energiezelle Haushalt oder Energiezelle GHD am gleichen Ort verwendet werden. Es wird verschiedene Vorzugsvarianten geben, welche sich durchsetzen. Bei großen Energiezellen Industrie mit verschiedensten Prozessen ist es eher vorstellbar, auf mehrere Technologien zu setzen. Die Erfordernisse der Industrie sind jedoch sehr individuell und daher sind allgemeine Aussagen schwer möglich.

4.2 Energiezelle Haushalt

Der Energiebedarf von Haushalten setzt sich aus Elektrizität, Wärme und Mobilität zusammen. Der Raumwärmebedarf soll sich in den nächsten Jahrzehnten deutlich reduzieren. Auch beim Elektrizitätsbedarf sind deutliche Reduzierungen möglich. Der Energiebedarf für die Mobilität kann ein neuer Verbraucher in der Energiezelle Haushalt werden. Eine Abschätzung, ob der Mobilitätsbedarf weiterhin im großen Maße mit eigenen Autos oder durch Car-Sharing, öffentlichen Verkehr, Fahrrad oder zu Fuß gedeckt wird, ist im Rahmen dieser Studie nicht angestrebt. Es ist jedoch vorstellbar, dass Elektroautos zumindest teilweise mit Elektrizität aus der Energiezelle Haushalt versorgt werden. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor oder Brennstoffzelle müssen jedoch an externen Tankstellen betankt werden.

In Tabelle 7 sind beispielhaft der jeweilige Bedarf einer Energiezelle Haushalt für heute und die für die Studie getroffenen Annahmen zusammengefasst. Die Spannweiten sind dabei beträchtlich und die vielen Einflussfaktoren auf den Energiebedarf machen eine Abschätzung sehr schwierig. Die Annahmen sind in Anlehnung an die Werte aus Tabelle 4 festgelegt.

Tabelle 7: Energiebedarf von Energiezellen Haushalt

Bedarf	Bedarf heute $E_{HH\ 2013}$	Bedarf Annahme $E_{HH\ A}$
Raumwärme	10.000 … 30.000kWh/a	2.000 … 6.000kWh/a
Warmwasser	3.000 … 6.000kWh/a	3.000 … 6.000kWh/a
Elektrizität	1.500 … 6.000kWh/a	1.000 … 2.000kWh/a
Mobilität	5.000 … 40.000 km/a	5.000 … 20.000 km/a

Der Bedarf an Mobilität wird in einer jährlich erforderlichen Fahrleistung angegeben. Eine Angabe der dafür erforderlichen Energie ist nicht ohne die Nennung des dazugehörigen Energieträgers möglich. Beispielsweise ist der

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Energiebedarf eines Elektroautos ca. 15kWh/100km. Ein modernes Dieselfahrzeug benötigt dafür ca. 4Liter Diesel und es ergibt sich ein Bedarf von 60kWh/100km.

Auch ist der Energiebedarf stark von den verschiedenen Technologien, welche in der Energiezelle Haushalt verwendet werden, abhängig. Beispielsweise benötigt ein Brennwertkessel mehr Energie aus Gas als eine Wärmepumpe elektrische Energie.

4.2.1 Autarke Energiezelle Haushalt

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten und im Anhang 2 dargestellten umfangreichen Untersuchungen zeigen, dass insbesondere Einfamilienhäuser und Reihenhäuser autark, d.h. ohne jeglichen Netzanschluss betrieben werden können. Die autarke Versorgung von Mehrfamilienhäusern kann jedoch nicht erreicht werden. Dafür sind die Potenziale der regenerativen Energiebereitstellung in diesen Energiezellen zu gering.

Eine autarke Versorgung erfordert ein hohes Maß an „Überdimensionierung“. Um eine sichere Versorgung zu gewährleisten, sind Back-Up-Systeme notwendig. Ein Netz kann zum einen als Back-Up für Ausfälle von technischen Anlagen im Haus dienen und zum anderen überschüssige Energie aufnehmen.

4.2.2 Energiezelle Haushalt mit elektrischem Netzanschluss

Im nächsten Schritt wird der Anschluss der Energiezelle Haushalt an das elektrische Netz untersucht. Die Anforderungen an das elektrische Netz können sich im Vergleich zu heute aufgrund der Wärmepumpen und Elektromobilität auf Verbraucherseite sowie PV-Anlagen und WEA auf Erzeugerseite deutlich erhöhen. Die relevanten Kriterien sind zum einen die maximale Leistung einer Energiezelle Haushalt und zum anderen die maximale Leistung mehrerer Energiezellen Haushalt im Verbund. Durch die zeitgleiche Einspeisung von Erzeugern bzw. den zeitgleichen Bezug von Wärmepumpen und Elektroautos erhöht sich die Gleichzeitigkeit signifikant.

Die Gleichzeitigkeit g ist ein Maß dafür, inwieweit alle Zellen zur gleichen Zeit Elektrizität benötigen oder einspeisen. Bei Haushalten mit den Standardgeräten (ausgenommen elektrische Heizungen und elektrische Warmwasserbereitung) wird heute mit einer Gleichzeitigkeit bei einer sehr großen Anzahl von Abnehmern g_{∞} von 0,1 bis 0,2 gerechnet [11]. Die Gleichzeitigkeit führt dazu, dass beispielsweise 1.000 Energiezellen Haushalt mit je einer maximalen Leistung von P_{max1} 10kW in Summe nicht 10.000kW benötigen. Bei einer Gleichzeitigkeit von 0,1 tendiert die Summenhöchstlast gegen 1.000kW und bei einer Gleichzeitigkeit von 0,2 gegen 2.000kW. Damit läge der Höchstlastanteil je Haushalt für eine sehr große Anzahl von

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Abnehmern $P_{max1}(n\rightarrow\infty)$ zwischen 1 und 2 kW. Daraus ergibt sich, dass die Betriebsmittel des Netzes kleiner dimensioniert werden können.

Zum Vergleich sind in der ersten Zeile der Tabelle 8 die heute üblichen Planungskriterien für eine teil-elektrische Versorgung aufgelistet. Beim Bezug ist zu sehen, dass sich der Höchstlastanteil für sehr viele Abnehmer $P_{max1}(n\rightarrow\infty)$ die Energiezellen Haushalt deutlich geringer ist, als die Höchstlast P_{max1}. Bei der Einspeisung ist die Gleichzeitigkeit sehr groß, da beispielsweise PV-Anlagen jeweils zur gleichen Zeit einspeisen und somit tritt der Effekt der Vergleichmäßigung der Belastung nicht auf.

Im Weiteren werden zwei Annahmen gemacht, um die Trends für die Erfordernisse an elektrische Netze durch die Energiezelle Haushalt aufzuzeigen. Dabei spielt die Implementierung und Verwendung des Verbrauchsmanagements (engl. Demand Side Management – DSM[8]) eine wichtige Rolle. Bei Annahme 1 wird davon ausgegangen, dass es kein DSM gibt. Beim Bezug ist eine deutliche Erhöhung der maximalen Leistung P_{max1} zu erwarten, welche durch Elektromobilität und Wärmepumpen verursacht wird. Damit steigen auch die Gleichzeitigkeit und der Höchstlastanteil an. Die Folge wäre ein hoher Netzausbaubedarf auf den niedrigen Spannungsebenen.

Bei Annahme 2 wird im Gegensatz dazu davon ausgegangen, dass es ein netzdienliches DSM gibt. Zusätzlich können durch Speicher Lastspitzen beim Bezug und bei der Einspeisung deutlich reduziert werden. Die Werte für die maximale Leistung können durch die Steuerung angepasst werden und haben hier einen beispielhaften Charakter. Der Höchstlastanteil kann mit DSM deutlich reduziert werden.

Tabelle 8: Trend Energiezelle Haushalt – Erfordernisse an elektrische Netze

	Bezug	**Einspeisung**
heute	g_{∞} = 0,1…0,2 P_{max1} = (5 … 10)kW $P_{max1}(n\rightarrow\infty)$ = (0,5 … 2)kW	g_{∞} = 0,8…1,0 P_{max1} = (1 … 30)kW $P_{max1}(n\rightarrow\infty)$ = (0,8 … 30)kW
Annahme 1 (kein DSM)	g_{∞} = 0,5…1,0 P_{max1} = (10 … 20)kW $P_{max1}(n\rightarrow\infty)$ = (5 … 20)kW	g_{∞} = 0,8…1,0 P_{max1} = (1 … 30)kW $P_{max1}(n\rightarrow\infty)$ = (0,8 … 30)kW
Annahme 2 (mit DSM)	g_{∞} = 0,8…1,0 P_{max1} = (1 … 2)kW $P_{max1}(n\rightarrow\infty)$ = (0,8 … 2)kW	g_{∞} = 0,8…1,0 P_{max1} = (1 … 2)kW $P_{max1}(n\rightarrow\infty)$ = (0,8 … 2)kW

4.2.3 Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss

Die Belastung des Gasnetzes wird sich nicht wesentlich verändern. Bisher wurden Gasnetze für die Versorgung von Haushalten in Abhängigkeit vom Wärmebedarf dimensioniert. Es ist zu erwarten, dass sich der Wärme-

8 Prozess, der die Menge oder das Verbrauchsmuster der durch die Endverbraucher zeitgleich konsumierten Energie beeinflussen soll.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

bedarf in den nächsten Jahren deutlich reduziert. Diese Reduzierungen werden durch die erweiterten Anwendungen kaum kompensiert.

Die Gleichzeitigkeit g_∞ ist beim Gasnetz bereits heute sehr groß; da z.B. im Winter alle Haushalte zur gleichen Zeit heizen, wird mit einer Gleichzeitigkeit von 0,8 bis 1,0 gerechnet. Eine Einspeisung ist dabei nicht vorgesehen.

Die Perspektive für die Energiezelle Haushalt unter Annahme 1 zeigt, dass sich die maximal erforderliche Leistung reduziert. Dies ist in Tabelle 9 zusammengetragen. Dies bedeutet, dass sich die Anforderungen für das Gasnetz perspektivisch bei Leistung und Energie beim Bezug kaum verändern. Jedoch ist es vorstellbar, dass zukünftig Gasnetze rückspeisefähig werden.

Eine Untersuchung der Gasnetze mit DSM wurde nicht durchgeführt, da DSM für Gasnetze nicht erforderlich ist.

Tabelle 9: Trend Energiezelle Haushalt – Erfordernisse an Gasnetze

	Bezug	**Einspeisung**
heute	g_∞ = 0,8…1,0 P_{max1} = (15 … 30)kW P_{max1} ($n\rightarrow\infty$) = (12 … 30)kW	nicht vorgesehen
Annahme 1	g_∞ = 0,5…1,0 P_{max1} = (5 … 15)kW P_{max1} ($n\rightarrow\infty$) = (2,5 … 15)kW	g_∞ = 0,8…1,0 P_{max1} = (5 … 15)kW P_{max1} ($n\rightarrow\infty$) = (4 … 15)kW

4.2.4 Zwischenfazit für die Energiezelle Haushalt

Insbesondere bei den Energiezellen Haushalt ist der Trend zu einem Zellularen Ansatz schon heute abzusehen. Dieser ist in einem großen Maße durch eine Selbstversorgung von unten geprägt.

Energiezelle Haushalt mit autarker Versorgung ohne Netzanschluss
Der Zellulare Ansatz zeigt, dass eine autarke Versorgung insbesondere für Einfamilienhäuser möglich ist. Eine autarke Versorgung erscheint aber aus Gründen der Überdimensionierung und Back-Up-Erfordernisse nicht als sinnvoll für die allgemeine Anwendung und wird daher nicht weiter betrachtet.

Energiezellen Haushalt können prinzipiell über elektrische Netze oder Gasnetze miteinander verbunden sein.

Es ist davon auszugehen, dass zukünftig für die meisten Energiezellen Haushalt ein einziger Netzanschluss in Form von Elektrizität oder Gas zur Versorgung ausreicht.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Energiezelle Haushalt mit elektrischem Netzanschluss
Die Auslegung der elektrischen Netze für hohe Last- und Einspeisespitzen ist nicht zweckmäßig. Um die maximale Leistung zu begrenzen, die das elektrische Netz an die Energiezelle Haushalt bereitstellen bzw. von der Energiezelle Haushalt aufnehmen müsste, wäre eine Kombination aus Lastverschiebung und Energiespeicher sinnvoll. Zudem muss geprüft werden, ob es zweckmäßig ist das 230/400-V-Drehstromsystem durch ein Drehstromsystem höherer Spannung oder durch ein Gleichspannungssystem zu ersetzen.

Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss
Das heutige Gasnetz kann auch zukünftig die Energiezelle Haushalt im ausreichenden Maße mit Energie versorgen. Eine Einspeisung von Energie der Energiezelle Haushalt auf unterster Ebene ist technologieabhängig grundsätzlich möglich und erscheint perspektivisch sinnvoll. Der Energiefluss in druckhöhere Netze und damit von größeren Energiemengen ist i.A. nur durch Verdichter an den Koppelstellen (Gasdruckregelanlagen) möglich. Diese sind heute nicht vorhanden.

Bei Anschluss der Energiezelle Haushalt an ein Gasnetz ist die Wärmeversorgung durch Kraft-Wärme-Kopplung zweckmäßig. Besonders interessant für die Zukunft sind reversible Brennstoffzellen, wobei die Kombination von Brennstoffzellen- und Elektrolysebetrieb in Verbindung mit einem Wasserstoffspeicher vorteilhaft erscheint.

4.3 Energiezelle Gewerbe-Handel-Dienstleistungen

Für die Energiezelle GHD gilt ebenfalls, dass sich der Trend zu einem Zellularen Ansatz deutlich verstärkt und dieser auch nicht mehr umkehrbar ist. Es ist eine zunehmende Selbstversorgung der einzelnen Branchen bzw. Betriebe durch die steigende Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik-Anlagen und BHKWs zu erkennen. Die Energiezelle GHD benötigt aufgrund des Energiebedarfs in den meisten Fällen einen Netzanschluss, da in diesen Zellen meist nicht genug Energie „geerntet“ werden kann, um eine bilanzielle Energieautarkie oder gar eine autarke Versorgung zu ermöglichen. Daher muss auch aus der Sicht der Versorgungszuverlässigkeit eine Energieversorgung von außen bereitgestellt werden. Die Anforderungen an die Versorgungszuverlässigkeit im Bereich der Energiezelle GHD liegen dabei deutlich oberhalb derer für die Energiezelle Haushalt. So weisen bspw. gerade die unter dem Bereich der Energiezelle GHD gefassten Supermärkte sogar aufgrund der Kühleinrichtungen zu gewissen Zeiten eine hohe Anforderung an die Versorgungszuverlässigkeit auf.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Der Netzanschluss ist prinzipiell sowohl über ein elektrisches Netz, als auch über ein Gasnetz möglich, die Berechnungen hierzu sind im Anhang 2 dargestellt.

In den Untersuchungen zur Versorgung der Energiezelle GHD hat sich jedoch gezeigt, dass der Bedarf der einzelnen Energiezellen GHD sehr stark von deren Ausstattung, aber auch von der Art der Zelle abhängig ist. Eine pauschale Annahme für die Energiezelle GHD kann daher nicht erfolgen. Ebenfalls kann keine allgemeingültige Aussage zu der Vernetzung von einzelnen Energiezellen getroffen werden.

Die nachfolgenden Beispiele beziehen sich ausschließlich auf die Analyse der Energiezelle eines Supermarktes.

4.3.1 Autarke Energiezelle GHD

Eine autarke Versorgungsstruktur ist in der Energiezelle GHD meist aufgrund der zu geringen Flächen für PV-Anlagen und WEA nicht möglich, sodass immer ein Anschluss an das elektrische Netz oder Gasnetz zur Verfügung stehen muss. Eine weitere Alternative könnte sich durch die Verknüpfung mit der Energiezelle Industrie oder der Energiezelle Haushalt ergeben. Auch hierbei muss fallbezogen differenziert werden, da die jeweiligen Anforderungen und die daraus resultierenden Bedarfe und Überschüsse von den unterschiedlichen Branchen abhängen. Bei kleinen Dienstleistungsunternehmen könnte es mit weiteren Entwicklungen in der Zukunft möglich werden, diese autark zu versorgen.

4.3.2 Energiezelle GHD mit elektrischen Netzanschluss

Der Anschluss der Energiezelle GHD an elektrische Netze weist keine grundsätzlichen Neuerungen auf. Die verschiedenen Konzepte sollen beispielhaft für einen Supermarkt erläutert werden, können jedoch auch auf andere Branchen im GHD-Bereich angewendet bzw. angepasst werden. Hierbei ist jedoch eine individuelle Betrachtung zu vollziehen, um die spezifischen Anforderungen der einzelnen Branchen im GHD-Sektor zu berücksichtigen.

Neben dem Anschluss an ein elektrisches Netz ist eine regenerative Versorgung der GHD Zelle über PV-Anlagen vorgesehen, jedoch ist eine vollständige Energiebedarfsdeckung aufgrund mangelnder Flächen nicht möglich. Im Falle einer hohen Erzeugung durch die vorgesehenen PV-Anlagen, die zu gewissen Zeitpunkten den aktuellen Bedarf der Zelle übersteigt, kann zum einen ein Speicher in Form von Batterien o.ä. realisiert werden, zum anderen aber auch eine Einspeisung in das elektrische Netz erfolgen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass hierbei im elektrischen Netz keine Grenzwerte verletzt werden.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Der Wärmebedarf der Energiezelle GHD kann mit Direktheizungen gedeckt werden. Theoretisch ist eine Wärmepumpe einsetzbar, jedoch muss diese auch in der entsprechend notwenigen Leistungsklasse >50kW zur Verfügung stehen. Es sollte zudem möglich sein, die ggf. überschüssig produzierte Wärme zu speichern, um eine netzdienliche Betriebsweise gewährleisten zu können. Der Wärmebedarf ist im Vergleich zum Elektrizitätsbedarf des beispielhaft untersuchten Supermarktes gering. In anderen Branchen des GHD-Sektors kann der Wärmebedarf jedoch auch den Strombedarf deutlich übersteigen. Eine pauschale Angabe kann hierzu nicht erfolgen.

Neben der Wärmebereitstellung kommt auch der Bereitstellung von Kälte für Kühlungen eine entscheidende Rolle zu. Zusätzlich ergibt sich künftig ein weiterer Energiebedarf durch die Berücksichtigung von Elektrofahrzeugen. Hierfür wurden Ladesäulen eingeplant, die wiederum direkt aus dem elektrischen Netz, bzw. über die vorhandene PV-Anlage versorgt werden. Dabei stehen die Ladesäulen hauptsächlich für Mitarbeiter zur Verfügung. Ladesäulen für Kunden (hier im Beispiel für einen Supermarkt) wurden in der Zelle nicht vorgesehen.

Insgesamt ist es möglich, mit der Energiezelle GHD, die über einen Anschluss an ein elektrisches Netz verfügt, ein netzdienliches Verhalten (DSM) zu realisieren. Durch den Einsatz von Speichern kann eine Lastverschiebung berücksichtigt werden. Hierfür bieten sich die in einem Supermarkt in einer Vielzahl vorhandenen Kühleinrichtungen an. Bei lokalem Energieüberschuss ist es möglich, die Kühleinrichtungen zur Lastverschiebung und damit als „Speicher“ zu betreiben, indem sie unter die standardmäßig vorgesehene Temperatur herunter gekühlt werden. Kommt es aufgrund von Netzengpässen oder einem hohen Verbrauch im restlichen Netz zu Versorgungsengpässen, so kann die Kühlung über einen Zeitraum von mehreren Stunden bis zu Tagen (abhängig von der thermischen Isolierung) abgeschaltet werden.

4.3.3 Energiezelle GHD mit Gasnetzanschluss

Bei einer alleinigen Versorgung mit einem Gas-Anschluss muss berücksichtigt werden, dass bei der betrachteten Energiezelle GHD für die meisten Anwendungen eine Versorgung mit elektrischer Energie erforderlich ist. Aus diesem Grund muss der Wandlungsprozess von Gas in Elektrizität nach dem elektrischen Bedarf erfolgen. Bei dieser Vorgehensweise tritt jedoch das Problem auf, dass häufig zu viel Wärme bereitgestellt wird. Diese kann nur an die übrigen vernetzten Energiezellen abgegeben und dort genutzt werden. Ein Speicher kann einen zeitweisen Produktionsüberschuss der Wärme aufnehmen und bei ggf. vorliegendem Bedarf abgeben, bietet jedoch keinen Vorteil, wenn der thermische Bedarf insgesamt nicht groß genug ist.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Die Wärme- und Elektrizitätsbereitstellung erfolgt durch Wandlung des Gases durch ein motorische BHKWs oder Brennstoffzellen. Brennstoffzellen scheinen grundsätzlich für die Anforderungen der Energiezellen GHD besser geeignet als motorische BHKWs, da die Verteilung der Elektrizitäts- zur Wärmebereitstellung für den geforderten Einsatz dichter am Nutzungsprofil liegt.

Neben dem Einsatz des motorischen BHKWs ist auch im Falle der Berücksichtigung des Gasanschlusses bei den durchgeführten Untersuchungen (siehe Anhang 2) eine PV-Anlage vorgesehen. Auch in diesem System ist die Speicherung der elektrischen Energie notwendig, um einen möglichst hohen Anteil des Energiebedarfs durch regenerative Energien zu decken.

Eine bilanzielle Energieautarkie ist hierbei nicht möglich, da aufgrund des nur geringen Anteils an regenerativen Energiequellen die Versorgung der Energiezelle GHD nicht möglich ist.

4.3.4 Zwischenfazit für die Energiezelle GHD

Für die zukünftige Energieversorgung der Energiezellen GHD ist der Trend zu einem Zellularen Ansatz zu sehen, der in einem großen Maße durch eine Selbstversorgung von unten geprägt ist. Für die Netzbetreiber resultiert daraus eine vollständige Neuausrichtung der Planungsgrundätze hin zu einer zellularen Versorgung. Dabei müssen politisch-regulatorische Rahmenbedingungen geschaffen und die Fördergelder für die Entwicklung von innovativen Versorgungskonzepten bereitgestellt werden.

Energiezelle GHD mit autarker Versorgung ohne Netzanschluss
Eine autarke Versorgung der hier untersuchten Energiezelle GHD ist nicht möglich.

Die Deckung des Energiebedarfs kann nicht rein autark erfolgen, da die Energiebereitstellung aus regenerativen Energiequellen nicht ausreicht. Da Leistungsbedarf und Energiebereitstellung aus regenerativen Energiequellen nicht immer deckungsgleich sind, kann zu bestimmten Zeitpunkten, wenn keine direkte Speicherung in der Zelle realisiert werden kann, auch eine Rückspeisung aus der Energiezelle GHD in das überlagerte Netz notwendig werden. Die überschüssige Energie kann damit an andere Energiezellen GHD oder aber auch an Energiezellen Haushalt bzw. Industrie abgegeben werden. Auch aus dieser Sicht ist eine Kopplung der Energiezellen über ein Netz als sinnvoll anzusehen, so dass in jedem Fall ein Netzanschluss für die Energiezelle GHD erforderlich wird.

Insbesondere im Bereich der Dienstleistungen sind autarke Energiezellen, ähnlich denen im Bereich Haushalt, grundsätzlich möglich.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Energiezelle GHD mit elektrischem Netzanschluss
Ein Netzanschluss für die Energiezelle GHD ist in jedem Fall erforderlich, um den Energiebedarf der Zelle vollständig decken zu können. Dieser kann dabei über elektrischer Anschluss ausgeführt werden, der einem heutigen Mittelspannungsnetzanschluss bzw. je nach Ausstattung der Energiezelle einem heutigen Niederspannungsnetzanschluss entspricht. Dabei gilt es die Vernetzung der einzelnen Zellen untereinander sicher zu stellen. Die Anschlussleistung wird, wie im Anhang 2 zu sehen ist, über dem heutigen Niveau liegen.

Die Energienetzplanung muss dabei mit der Raumordnungs- bzw. Bebauungsplanung kombiniert werden, damit diese aufeinander abgestimmt erfolgen können. Speicher sind in jedem Fall zur Lastverschiebung vorzusehen, jedoch müssen regulatorische Rahmenbedingungen für Speicher angepasst werden.

Energiezelle GHD mit einem Gasnetzanschluss
Die Versorgung der Energiezelle GHD über einen Gasanschluss ist prinzipiell möglich und die aktuell vorhandene Netztechnik ist für die vorgesehene Versorgungsaufgabe als ausreichend anzusehen. Innerhalb der Gebäude gerade mit Blick auf die zu erfüllende Versorgungsaufgabe sind einige Anpassungen notwendig. Hierfür wird die Weiterentwicklung der Energiewandler erforderlich, um eine höhere Effizienz, hinsichtlich der Wandlung in elektrische Energie, zu erzielen. Dabei ist entscheidend, welche Entwicklungen seitens der Hersteller zu dem notwendigen Zeitpunkt vorliegen (beeinflussbar durch die politische Förderung) und wie diese im Allgemeinen für die jeweilige Zelle eingesetzt werden können. Das Gasnetz könnte grundsätzlich notwendige Rückspeisungen aufnehmen.

4.4 Energiezelle Industrie

Industriebetriebe können eine Vielzahl verschiedener Formen und Ausprägungen und damit sehr unterschiedliche Bedarfscharakteristika aufweisen. Welche Energieformen und -bedarfe im Detail notwendig sind, hängt von der Art der Produkte und Herstellungsprozesse ab. Analog zur Zelle für Gewerbe, Handel und Dienstleistungen kann auch bei der Energiezelle Industrie nicht eindeutig und pauschal ein einziges Versorgungsszenario angenommen werden. Dies ist im Abschnitt 4.4.1 dargestellt. Daher werden in diesem Kapitel nur typische Beispiele von Energiezellen verschiedener Größe betrachtet. Diese sind

- der kleine Industriebetrieb,
- das Industriegebiet und
- der Industriepark.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Für jede dieser Energiezellen werden charakteristische Kenngrößen genannt und verschiedene Eigenschaften bezüglich Energieverbrauch, zukünftiger Möglichkeiten der Energieerzeugung sowie Speicherformen und typische Lastprofile dargestellt. Außerdem werden die zukünftigen Entwicklungen der Anforderungen der Betriebe beschrieben und ein mögliches Zukunftskonzept skizziert.

Bei steigender Größe der Energiezelle Industrie und damit höherer Energieintensität der Versorgungsaufgabe wird deutlich, dass diese immer mehr auf die Versorgung mit Energie von außerhalb der Zelle angewiesen ist und der Bedarf nicht lokal gedeckt werden kann.

4.4.1 Gesamtenergiebedarf der Industrie

Die folgenden Angaben zum Energiebedarf und zur Energiebereitstellung in der Industrie basieren auf einer Studie der AG Energiebilanzen e.V. (AGEB) für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aus dem Jahr 2013 [11]. Die grafischen Darstellungen befinden sich im Anhang 2.

Endenergieverbrauch der Industrie

Der Endenergieverbrauch der Industrie betrug im Jahr 2012 rund 722TWh. Das sind rund 29% des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland. Damit liegt die Industrie an der Spitze, dicht gefolgt von dem Verkehrssektor mit Schienen-, Straßen- und Luftverkehr sowie der Küsten- und Binnenschifffahrt mit 28%. Danach folgen die Haushalte mit 27% und schließlich der Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) mit 16%.

Der Endenergieverbrauch in der Industrie ist im Wesentlichen durch die jeweiligen branchen- und unternehmensspezifischen Produktionsprozesse geprägt. Die Energieverbräuche für Klimatisierung, Beleuchtung, Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), Raumwärme und Warmwasser sind dagegen gebäude- und beschäftigungsbezogen. Sie unterscheiden sich über die Industriebranchen kaum.

Im Jahr 2012 entfielen - wie in den Vorjahren auch - rund 70% des industriellen Endenergieverbrauchs auf energieintensive Industriezweige wie die Herstellung von Metallen, die Grundstoffchemie, das Papiergewerbe, Ernährung und Tabak, die Verarbeitung von Steinen und Erden sowie von Nichteisenmetallen. Bei diesen Industriebranchen entfallen rund 85% des Energieverbrauchs auf die Bereitstellung von Prozesswärme und mechanischer Energie. Diese Aussage gilt qualitativ für die ganze Industrie.

Die wichtigsten Energieträger für die Versorgung der Industrie

Die wichtigsten Endenergieträger für die Versorgung der Industrie in Deutschland sind heute zu fast gleichen Teilen fossile Gase und elektrische Energie, gefolgt von Kohlen. Diese drei Energieträger tragen zu rund 80%

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

zur Energieversorgung bei, die restlichen 20% verteilen sich auf Mineralöl (abnehmend), Fernwärme, Erneuerbare und sonstige Energieträger.

Aus elektrischer Energie wird zu etwas mehr als zwei Dritteln mechanische Energie erzeugt. Zur Deckung des Wärmebedarfs werden vornehmlich fossile Gase herangezogen. Für Kälteprozesse, die Bereitstellung mechanischer Energie, den IKT-Bereich und die Beleuchtung kommt praktisch nur elektrische Energie in Betracht.

Der Gesamtverbrauch an elektrischer Energie in Deutschland betrug im Jahr 2012 rund 519TWh. Davon verbrauchte die Industrie rund 226TWh bzw. 43,5%. Die Haushalte verbrauchten 26,4%, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen 27%. Der Verkehr hatte nur einen Anteil von 3,2%.

In den Jahren von 2008 bis 2012 gab es keine grundlegenden Veränderungen in der Struktur des Energieverbrauchs nach Anwendungsbereichen. Auch hat sich der Endenergieverbrauch in diesen Jahren ebenfalls nicht wesentlich verändert. Lediglich im Jahr 2009 machte sich der deutlich geringere Auftragseingang als Folge der Finanzkrise im Jahr 2007 auch im Energieverbrauch der Industrie spürbar bemerkbar.

4.4.2 Energiezelle „Kleiner Industriebetrieb“

Beschreibung

Kleine Industriebetriebe sind zwar etwas größer als die Gewerbeunternehmen, die im vorangegangenen Kapitel in Zusammenhang mit der Energiezelle GHD beschrieben werden, sie ähneln diesen aber in ihrem Verhalten. Dieser Betrieb stellt ein typisches Beispiel für mittelständische Unternehmen dar, die oft in Industriegebieten außerhalb der Stadtzentren angesiedelt sind.

In Tabelle 10 sind die charakteristischen Kenngrößen dieser Zelle in Bezug auf Mitarbeiterzahl, Leistungsspitze und Energiebedarf sowie Mobilität zusammengestellt.

Tabelle 10: Typische Daten eines kleinen Industriebetriebs (eigene Abschätzung)

Charakteristika	Einheit	Wert
Zahl der Beschäftigten	-	~50
Max. el. Anschlussleistung	kW	50-100
Jährlicher el. Energiebedarf	MWh/a	40
Jährlicher Wärmebedarf	MWh/a	130
Mobilitätsbedarf	-	7-10 Fahrzeuge
Eigenerzeugung	kW	100-200

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Typische Lastgänge für die Energiezelle Industrie zeigen an Werktagen ähnliche Profile und einen geringeren Verbrauch am Sonntag. Damit sind die Lastgänge sehr ähnlich zu denen der Energiezelle GHD. Standardlastprofile sind für Industrieunternehmen aufgrund ihrer starken Unterschiede nicht verwendbar, da der individuelle Produktionsprozess den Bedarf und das daraus folgende Leistungsprofil bestimmt.

Gleichfalls kann der Wärmelastgang nicht als Standardprofil vorgegeben werden, da auch hier große Unterschiede im Wärmebedarf und den Spitzenlastzeiten auftreten. Eine Aussage kann also nur pro Betrieb nach einer Analyse durchgeführt werden.

Verbrauch, Erzeugung und Speicherung von Energie

Für die Zelle „Kleiner Industriebetrieb“ können die in Tabelle 11 zusammengestellten möglichen Technologien für die Energieversorgung verwendet werden.

Tabelle 11: Ausstattung Industriebetrieb-Zelle

Wandler	Technologien	Potenziale
Energie zuführende Wandler	Dieselgenerator PV-Anlage Biogasanlage	einsatzbereit Kostenreduzierung zu erwarten einsatzbereit
Energie konditionierende Wandler	Brennstoffzelle Umrichter	hoher Entwicklungsaufwand einsatzbereit
Energie abführende Wandler	motorische Last chemische Prozess	einsatzbereit einsatzbereit
Speicher	thermischer Speicher Batterie	einsatzbereit Kostenreduzierung zu erwarten

Bild 5 zeigt das Energieflussbild mit den verschiedenen Energieformen in dieser Zelle.

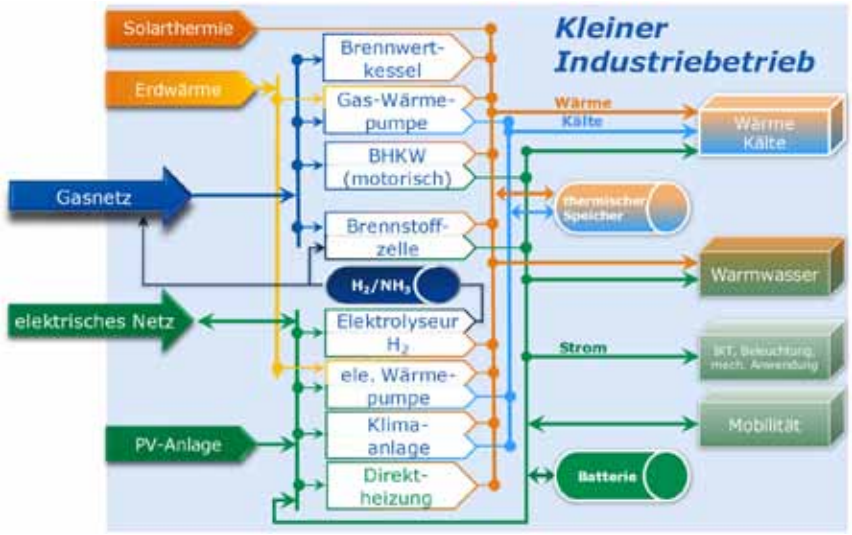


Bild 5: Energie- und Technologieportfolio für die Energiezelle Kleiner Industriebetrieb

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Zukünftige Anforderungen und Lösungsansätze

In Zukunft stellen sich die folgenden Anforderungen und Ziele an diese Zellen, die sich aber nicht wesentlich von den Anforderungen der heutigen Betriebe unterscheiden:

- günstiger Energiebezug
- Reduzierung des Energiebedarfs
- hohe Versorgungszuverlässigkeit
- Umweltfreundlichkeit

Daraus folgt, dass sich die meisten Anforderungen aus rein wirtschaftlichen Überlegungen ableiten lassen. Diese Ziele können durch verschiedene Maßnahmen erreicht werden, wie z.B.

- Anlagen- und Kostenoptimierung
- Erhöhung des Anteils elektrischer Energie
- Verbrauchsmanagement

Eine Flexibilisierung der Last wird in den meisten Fällen nur sehr begrenzt möglich sein, da die elektrischen und Wärmelasten auf den Produktionsprozess abgestimmt sind und daher meist nur ein kleiner Anteil der Last beeinflusst werden kann.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

4.4.3 Energiezelle „Industriegebiet“

Beschreibung

Eine Vielzahl kleiner Industriebetriebe und Gewerbeunternehmen sowie andere Typen aus der Energiezelle GHD zusammengefasst, kann in verschiedenen Zusammensetzungen das Verhalten eines Industriegebiets darstellen. Sie sind häufig außerhalb der Stadtzentren angesiedelt. Dabei hat in Zukunft ein übergeordneter Betreiber oder Versorger für diese Zelle die Möglichkeit, den Energiebedarf und dessen Bezug bzw. Eigenerzeugung zu optimieren.

In Tabelle 12 sind die wichtigsten charakteristischen Kenngrößen dieser hinsichtlich Mitarbeiterzahlen, Leistungsspitzen und Energiebedarfe sowie Mobilität zusammengestellt.

Tabelle 12: Typische Daten eines Industriegebiets (eigene Abschätzung)

Charakteristika	Einheit	Wert
Zahl der Beschäftigten	-	200-1.000
Max. el. Leistung	MW	5
Jährlicher el. Energiebedarf	MWh/a	1.000-2.000
Jährlicher Wärmebedarf	MWh/a	3.000
Mobilitätsbedarf	-	50-200 Fahrzeuge
Eigenerzeugung	MW	5-10

Bild 6 zeigt typische Lastprofile für die elektrische Leistung über einen Tag bzw. eine Woche. Sie zeigen einen gleichmäßigen Bedarf an elektrischer Energie zwischen 7Uhr morgens und 18Uhr abends, der von Montag bis Freitag fast identisch ist und sich vom Wochenende stark abgrenzt.

Ein Standardlastprofil für den Elektrizitäts- oder den Wärmebedarf ist aufgrund der starken Unterschiede nicht sinnvoll anwendbar.

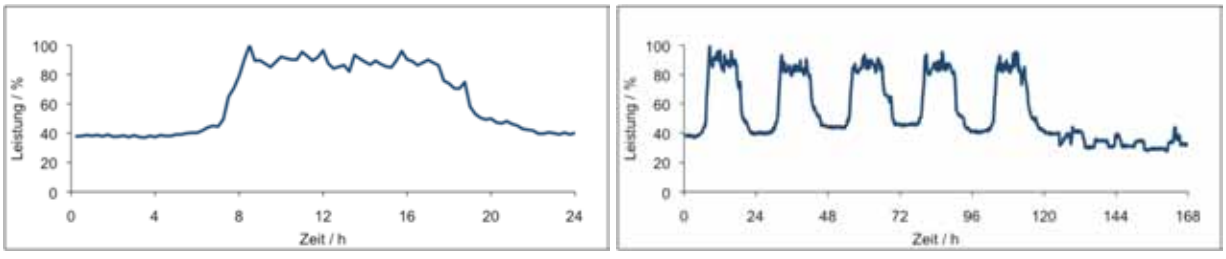


Bild 6: Typische Lastprofile für die Energiezelle Industriegebiet

Verbrauch, Erzeugung und Speicherung von Energie

Tabelle 13 zeigt mögliche Technologien für die Energieversorgung eines Industriegebiets. Der Wärme- und Gasbedarf ist nur gering und auf Warmwasser und Erdgas für kleine Gasturbinen bzw. Mikroturbinen und Gasthermen begrenzt.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Tabelle 13: Ausstattung Energiezelle Industriegebiet

Wandler	Technologien	Potenziale
Energie zuführende Wandler	Dieselgenerator Windanlage PV-Anlage Biogasanlage	einsatzbereit einsatzbereit Kostenreduzierung zu erwarten einsatzbereit
Energie konditionierende Wandler	Brennstoffzelle Elektrolyseur Umrichter	hoher Entwicklungsaufwand hoher Entwicklungsaufwand einsatzbereit
Energie abführende Wandler	motorische Last chemischer Prozess	einsatzbereit einsatzbereit
Speicher	thermischer Speicher Batterie Wasserstoffspeicher	einsatzbereit Kostenreduzierung zu erwarten hoher Entwicklungsaufwand

Bild 7 zeigt das Energieflussbild mit den verschiedenen Energieformen in der Energiezelle Industriegebiet.

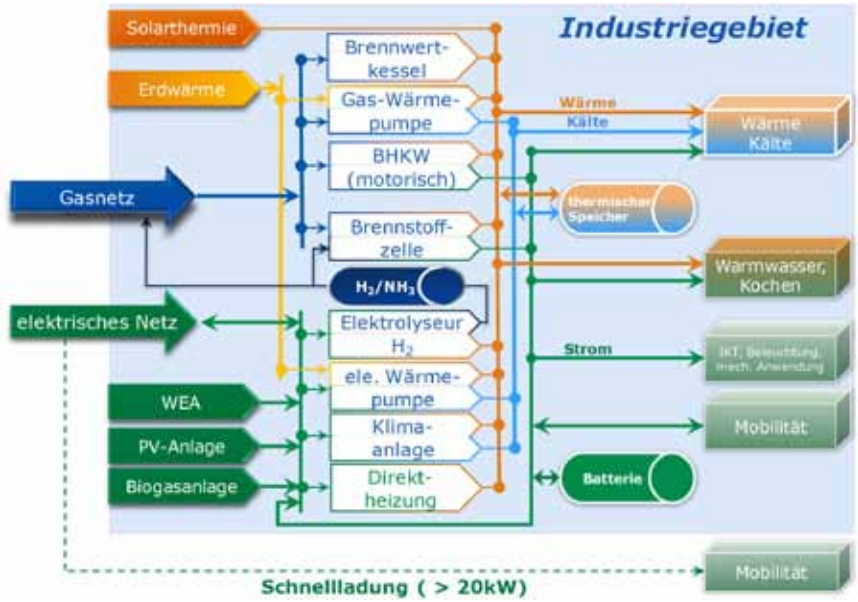


Bild 7: Energie- und Technologieportfolio für die Energiezelle Industriegebiet

Zukünftige Anforderungen und Lösungsansätze

Die Anforderungen und Ziele der Energiezelle Industriegebiet unterscheiden sich nicht von denen der Energiezelle kleiner Industriebetrieb.

Wie beim Industriebetrieb ist eine Flexibilisierung der Last nur sehr begrenzt möglich. Hier können z.B. größere Lasten an thermischem Energiebedarf mit inhärentem oder zusätzlich eingebautem Speichervermögen genannt werden.

Aus dem Lastgang ist zu sehen, dass das Erzeugungsprofil von PV-Anlagen gut zum Verbrauch passt und somit einen nennenswerten Beitrag leisten kann, einen Teil der elektrischen Last lokal zu decken.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Die Lösungsansätze können durch zusätzliche Maßnahmen ergänzt werden. Auch hier werden die Maßnahmen heute und in Zukunft fast ausschließlich durch wirtschaftliche Überlegungen definiert, wie z.B.

- Reduzierung der Leistungsspitze
- Erhöhung der Effizienz und Reduzierung der Umwandlungsverluste
- (Zeitweiser) Betrieb als Insel- oder Mikronetze
- Verwendung von Abwärme/KWK

4.4.4 Energiezelle „Industriepark“

Beschreibung

Die Energiezelle Industriepark steht exemplarisch für große Industrieanlagen, die einen sehr großen Bedarf insbesondere an Prozesswärme haben. Wie Tabelle 14 zeigt, ist der Bedarf an elektrischer Energie ebenfalls sehr hoch.

Typischerweise haben diese Großanlagen auch eigene Kraftwerke, die neben elektrischer Energie auch Wärme erzeugen (Kraft-Wärme-Kopplung, KWK). Die Erzeugungsanlagen werden häufig als GuD-Anlagen ausgeführt. Für die Energiebereitstellung und die verschiedenen industriellen Prozesse sind häufig Gasnetze auf dem Industriepark installiert. Zusätzlich benötigen die Unternehmen weitere Energieträger und Grundstoffe, wie z.B. Wasserstoff in der Chemieindustrie.

Der Energiebedarf und die teilweise dadurch bedingten Erzeugungsanlagen sind individuell abhängig von der Art der Produktionsanlagen. Sie können hier nur beispielhaft aufgezeigt werden. Nur eine genaue Analyse einzelner Industrieparks kann detailliertere Kenngrößen liefern.

Tabelle 14: Typische Daten für die Energiezelle Industriepark (eigene Abschätzung)

Charakteristika	Einheit	Wert
Zahl der Beschäftigten	-	mehrere 1.000
Max. el. Leistung	MW	500-1.000
Jährlicher el. Energiebedarf	GWh/a	3.000-7.000
Jährlicher Wärmebedarf	GWh/a	6.000-20.000
Mobilitätsbedarf	-	200+ Fahrzeuge
Eigenerzeugung	MW	200-500

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Bild 8 zeigt einen typischen Lastgang einer Energiezelle Industriepark für einen Tag und eine Woche. Es ist gut zu sehen, dass es kaum Fluktuationen über den Tag gibt und dass die Werktage sich nicht vom Wochenende oder dem Sonntag unterscheiden.

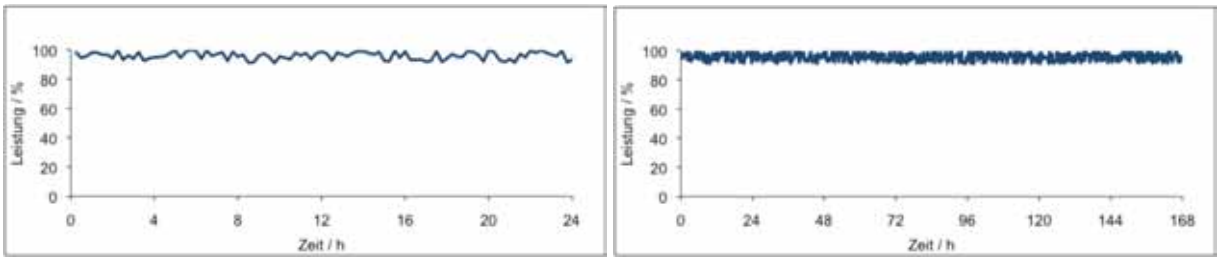


Bild 8: Typisches Lastprofil der Energiezelle Industriepark

Verbrauch, Erzeugung und Speicherung von Energie

Mögliche Technologien für die Energieversorgung eines Industrieparks sind in Tabelle 15 zusammengestellt. Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Energiezellen „Kleiner Industriebetrieb“ und „Industriegebiet“ ist hier der Wärmebedarf deutlich größer als der Elektrizitätsbedarf.

Tabelle 15: Ausstattung Industriepark-Zelle

Wandler	Technologien	Potenziale
Energie zuführende Wandler	Gasturbine Kraft-Wärme-Kopplung Windanlage Solarthermie	einsatzbereit einsatzbereit einsatzbereit teuer
Energie konditionierende Wandler	Brennstoffzelle Elektrolyseur Umrichter	hoher Entwicklungsaufwand hoher Entwicklungsaufwand einsatzbereit
Energie abführende Wandler	motorische Last Prozessdampf chemischer Prozess	einsatzbereit einsatzbereit einsatzbereit einsatzbereit
Speicher	thermischer Speicher Erdgasspeicher Wasserstoffspeicher	einsatzbereit einsatzbereit hoher Entwicklungsaufwand

Bild 9 zeigt das Energieflussbild mit den verschiedenen Energieformen in dieser Zelle.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

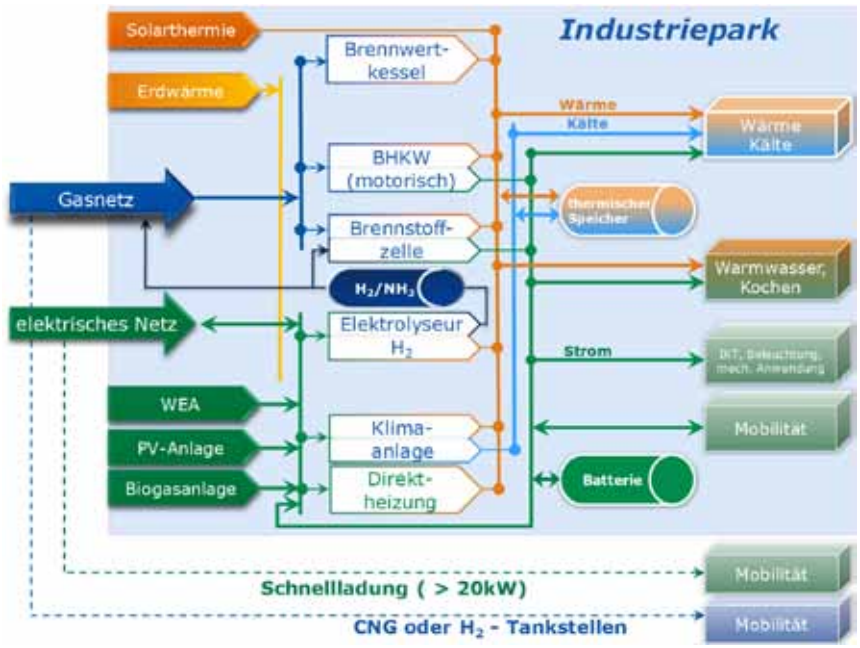


Bild 9: Energie- und Technologieportfolio für die Energiezelle Industriepark

Zukünftige Anforderungen und Lösungsansätze

In Zukunft stellen sich die folgenden Anforderungen und Ziele an diese Zelle, die sich aber nicht wesentlich von der Situation der heutigen Betriebe unterscheidet:

- Wirtschaftlichkeit / günstiger Energiebezug
- Effizienzerhöhung der gesamten Prozessabläufe
- Hohe Zuverlässigkeit
- Verschiedene Primärenergiequellen

Aufgrund der enormen Bedarfe an Elektrizität und Gas werden Industrieparks auch künftig auf einen Anschluss an die Übertragungsnetze Netze für Gas und Elektrizität angewiesen sein. Dabei sind Gas und Elektrizität als Energieform in sehr großen Mengen für industrielle Großanlagen nur begrenzt kompatibel, d.h. sie können sich nicht gegenseitig ersetzen sondern nur ergänzen.

Es kann weiterhin davon ausgegangen werden, dass sich die Energieverbrauchscharakteristik großer Industrieparks künftig nur wenig ändern und sich wie heute an den Produktionsprozessen orientieren wird. Der Endenergieverbrauch der Industrie wird sich infolge von weiteren Energieeffizienzmaßnahmen etwas verringern, der Elektrizitätsverbrauch bleibt dagegen nahezu unverändert und gewinnt dadurch im Energiemix der Industrie zunehmend an Bedeutung [12]. Entsprechende technische Lösungen sind heute schon verfügbar, über deren Anwendung werden die Industrieunter-

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

nehmen aber stets aus rein wirtschaftlichen Gründen entscheiden. Ausgenommen hiervon sind sensitive technische Prozesse und für die Produktion besonders wichtige Teile.

Daraus folgt, dass sich die meisten Anforderungen aus rein wirtschaftlichen Überlegungen ableiten lassen. Diese Ziele können durch verschiedene Maßnahmen erreicht werden, wie z.B.

- Reduzierung der Leistungsspitze
- Eigenerzeugung
- Reduzierung der Umwandlungsverluste
- (Zeitweiser) Betrieb als industrielles Inselnetz
- Last- und Erzeugungssteuerung zum Abfahren eines vorgegebenen Fahrplans

4.4.5 Zwischenfazit Energiezelle Industrie

Der Endenergieverbrauch in der Industrie ist im Wesentlichen durch die jeweiligen branchen- und unternehmensspezifischen Produktionsprozesse geprägt. Dabei stehen die Deckung des Wärmebedarfs mit einem Anteil von rund drei Vierteln und die Bereitstellung mechanischer Energie mit einem Anteil von rund einem Fünftel am Gesamtenergiebedarf im Vordergrund.

Heute sind fossile Gase und elektrische Energie die wichtigsten Energieträger in der Industrie. Aus letzterer wird überwiegend mechanische Energie erzeugt, während erstere der Erzeugung insbesondere von Prozesswärme dienen. Für die nahe Zukunft ist der sukzessive Ersatz fossiler Gase durch Biogase und über Power-to-Gas-Anlagen gewonnenes Methan (Methanisierung) und Wasserstoff (Elektrolyse) zu erwarten, hat allerdings keine unmittelbare Auswirkung auf die grundsätzliche Auslegung der Versorgungsnetze. Der Ersatz anderer für die Industrie wichtiger fossiler Energieträger wie z.B. Öl und Kohle für die lokale Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser durch aus lokalen erneuerbaren Energiequellen (Photovoltaik und Wind) erzeugte elektrische Energie (Power-to-Heat) gewinnt auch in der Industrie zunehmend an Bedeutung. Der Anteil der elektrischen Energie im Energiemix einer Industriezelle wird damit ansteigen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit zunehmender Zellengröße und damit höherer Energieintensität der Versorgungsaufgabe der Energiebedarf nicht mehr lokal aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt werden kann. Für die grundsätzliche Auslegung neuer Netze bedeutet

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

dies, dass kleine und mittelgroße Industriezellen auch künftig auf einen Anschluss an das elektrisches Netz und/oder Gasverteilnetz und große Industriezellen an die Übertragungsnetze für Gas und/oder Strom angewiesen sein werden.

4.5 Gesamtfazit zum Zellularen Ansatz

Die in dieser Studie durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass eine autarke Versorgung von Energiezellen nur bei Haushalten und ausgewählten Energiezellen im Bereich Dienstleistungen möglich ist. Die weiteren Energiezellen GHD und insbesondere Industrie erfordern zwingend eine Vernetzung, zumindest auf regionaler Ebene. Inwiefern großräumige Energieübertragung erforderlich wird, kann erst mit den Untersuchungen im nächsten Kapitel bewertet werden.

Für die Vernetzung der Energiezellen stehen neben den elektrischen Netzen auch Gasnetze zur Verfügung. Für elektrische Netze können sich deutlich höhere Belastungen ergeben. Durch eine netzdienliche Betriebsweise von Speichern und Verbrauchern und eine daraus resultierende Vergleichmäßigung der Belastung kann dies abgemildert werden. Bei Gasnetzen lassen sich neue Freiheitsgrade erreichen, wenn die bidirektionale Flussrichtung sowie Flexibilität in räumlicher und zeitlicher Beschaffenheit und Art des Gases, z.B. des Anteils an Wasserstoff, genutzt werden.

Durch die Integration erneuerbarer Energieträger entsteht ein erhöhter Übertragungsbedarf. Dieser kann durch den Zellularen Ansatz reduziert werden.

Der Zellulare Ansatz unterstützt und erfordert ein neues Marktdesign und Geschäftsmodelle, welche bereits in den VDE-Studien Aktive Energie-Netze im Kontext der Energiewende [13] bzw. Flexibilitätsmärkte [14] betrachtet werden.

Zu guter Letzt muss auch die Frage zur Diskussion gestellt werden, wer die Verantwortung für das sich ergebende Gesamtsystem übernimmt und dieses für die neuen Rahmenbedingungen weiterentwickelt.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

5 Grundsätzliche Überlegungen zum überregionalen Energieausgleich

Kapitel 4 hat aufgezeigt, dass die autarke Versorgung aller Energiezellen nicht zu realisieren ist. Die Industrie sowie Metropolen und Ballungsräume, aber auch Städte mit dichter Bebauung können ihren Energiebedarf nicht selbst in ausreichendem Maße lokal bereitstellen. Daher benötigen diese Energiezellen Energieimporte. Es wird exemplarisch abgeschätzt, welche Energiemengen zukünftig in einem Jahr in Deutschland bei zwei unterschiedlichen Ansätzen mit unterschiedlich stark ausgeprägten zellularen Strukturen zu übertragen sind.

Da beide Ansätze auf Annahmen beruhen, wird an dieser Stelle kein hoher Detailierungsgrad dargestellt. Aussagen zu verwendeten Energieformen, Energieübertragungssystemen oder gar systemspezifischen Nebenbedingungen könnten nur unter zahlreichen weiteren Annahmen getroffen werden und werden hier nicht betrachtet.

5.1 Methodik

Im Folgenden wird die Methode zur Bestimmung der Übertragungskorridore und deren Übertragungskapazitäten beschrieben, die sich aus den in den vorausgehenden Kapiteln beschriebenen Annahmen ableiten lassen.

Gemäß Abschnitt 3.2 wird für die Untersuchungen angenommen, dass sich der jährliche Bedarf an elektrischer Energie in Deutschland zukünftig erhöhen wird. Für die folgenden Berechnungen wurde ein mittlerer Nettobedarf von 700TWh/a gewählt. Diese Energiemenge soll für die modellhafte Untersuchung vollständig durch erneuerbare Energiequellen in Deutschland - aufgeteilt in Regionen - bereitgestellt werden.

Die Methode besteht aus fünf Schritten. Es werden Regionen (5.2) definiert, zwischen denen Verbindungskorridore (5.3) verlaufen. Jeder Region wird ein Bedarf (5.4) und eine Bereitstellung (5.5) an elektrischer Energie zugewiesen. Durch eine Optimierung werden die Übertragungskorridore (5.6) gefunden, über die tatsächlich Energie übertragen wird.

Im Ergebnis wird anschaulich dargestellt, wieviel Energie zwischen benachbarten Regionen ausgetauscht werden muss.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

5.2 Regionen

Im ersten Schritt werden die Regionen definiert. Als Regionen werden die Flächen der Bundesländer sowie die Nordsee und die Ostsee bezeichnet. Zur Vereinfachung werden Berlin und Brandenburg sowie Bremen und Niedersachsen zu je einer Region zusammengefasst, wonach sich 16 Regionen ergeben. Eine Erweiterung auf kleinere Einheiten, wie z.B. Regierungsbezirke oder Kreise, ist für diese Untersuchung nicht erforderlich. Weiterhin unterstützt die grobe Auflösung die Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit der Methode und deren Ergebnisse.

5.3 Verbindungskorridore

Im zweiten Schritt werden die Verbindungskorridore bestimmt, welche zusammengeschaltet ein überlagertes Netz bilden. Verbindungskorridore sind direkte Verbindungen zwischen benachbarten Regionen. Jede Region besitzt einen zentralen Übergabepunkt, an dem das überlagerte Netz mit dem unterlagerten Netz verbunden ist. Die Übergabepunkte an Land werden in den Flächenschwerpunkt der jeweiligen Region gelegt. In Nordsee und Ostsee entsprechen die Übergabepunkte den Zentren der aktuell installierten und geplanten Offshore-WEA-Leistung. Aus den so definierten Punkten wird mittels Delaunay-Triangulation [15] ein Dreiecksnetz von Verbindungskorridoren erstellt. Bild 10 zeigt die so gefundenen Verbindungskorridore und deren Längen.

5.4 Annahmen zum Bedarf an elektrischer Energie

Im dritten Schritt wird jedem Übergabepunkt der jährliche Bedarf an elektrischer Energie zugewiesen. Es wird angenommen, dass sich zukünftig der erhöhte Nettobedarf von 700TWh/a proportional zum Referenzjahr 2011 auf die Regionen verteilt. Die Fläche innerhalb der schwarzen Kreislinien in Bild 12 und Bild 13 zeigt den Bedarf an elektrischer Energie in den Regionen.

5.5 Annahmen zur Bereitstellung der elektrischen Energie

Im vierten Schritt dient der EEG-Statistikbericht 2011 [16] als Ausgangslage zur Untersuchung der zukünftigen Energiebereitstellung. Darauf basierend werden hier zwei Ansätze untersucht, die von gleichen Energiebedarfen ausgehen. Der größte Teil mit 610TWh/a wird in beiden Ansätzen durch

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

PV-Anlagen sowie Onshore- und Offshore-WEA bereitgestellt, die räumliche und mengenmäßige Aufteilung ist dabei verschieden. Der Energieanteil durch Biomassekraftwerke steigt von ca. 28 auf 60TWh/a und durch Wasser von ca. 5 auf 30TWh/a. Der geringe Beitrag aus Geothermie und Deponie-, Klär- und Grubengas wird vernachlässigt. Die Zusammensetzung der bereitgestellten elektrischen Energie je Region ist Bild 12 (Ansatz A) bzw. Bild 13 (Ansatz B) zu entnehmen.

5.5.1 Ansatz A

Im Ansatz A wird neben der Weiterschreibung des EE-Zubaus ein massiver Zubau von Offshore-WEA verfolgt. In Anlehnung an das Energiekonzept der Bundesregierung werden Leistungen von 40GW in der Nordsee und 10GW in der Ostsee festgelegt. Bei angenommenen Volllaststunden von 4.500h/a können so 225TWh/a bereitgestellt werden. Für den verbleibenden Bedarf von 385TWh/a wird die installierte Leistung der PV-Anlagen und Onshore-WEA in 2011 aus Tabelle 16 soweit erhöht, bis der Bedarf gedeckt werden kann. Alle betrachteten Anlagen an Land werden proportional zur Verteilung in 2011 den Regionen zugeordnet. Bild 12 zeigt die regionale Energiebereitstellung nach Energieträgern und den Energiebedarf.

5.5.2 Ansatz B

Im Gegensatz zu Ansatz A wird im Ansatz B das Ziel verfolgt, einen möglichst verbrauchernahen EE-Zubau zu erreichen. Daher werden Offshore-WEA nur moderat zugebaut. In der Nordsee wird eine Leistung von 10GW und in der Ostsee von 2,5GW festgelegt. Dies entspricht mit 4.500 Volllaststunden einer Energie von 56,25TWh/a. Für die benötigten PV-Anlagen und Onshore-WEA wird die potentiell nutzbare Fläche bewertet. Die Flächendaten der einzelnen Regionen werden über CORINE Land Cover 2006 (CLC06) [17] bereitgestellt.

Für die PV-Installation werden drei Flächentypen vorgesehen: Die Fläche mit *durchgängig städtischer Prägung*[9] wird zu 10% mit PV-Anlagen versehen. Beispielsweise beträgt in Hamburg die durchgängig städtische Prägung etwa 1% der Stadtfläche. In Gebieten *nicht durchgängig städtischer Prägung* werden auf 5% und in *Industrie- und Gewerbeflächen* auf 25% der Grundfläche PV-Anlagen installiert.

Für alle PV-Anlagen werden eine flächenbezogene Leistung von 0,1kW_p/m^2 und Volllaststunden von 1.000h/a festgelegt. Unter diesen Annahmen werden in Deutschland 176TWh/a eingespeist. Die verbleibenden 378TWh/a müssen durch Onshore-WEA gedeckt werden.

9 Definition nach [16]

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Aus Winddaten des Deutschen Wetterdienstes [18] wird für jede Region eine mittlere Windgeschwindigkeit berechnet. Unter der vereinfachten Annahme, dass eine WEA mit dieser mittleren Windgeschwindigkeit dauerhaft betrieben wird, kann aus der Leistungskennlinie auf eine zu erwartende Jahresenergie pro WEA geschlossen werden. Zur Installation von WEA werden die CLC06-Kategorien *Ackerland* sowie *Wiesen und Weiden* vorgesehen. Die benötigte Energie kann bereitgestellt werden, wenn deutschlandweit auf *Ackerland* 0,7WEA/km^2 sowie auf *Wiesen und Weiden* 0,2WEA/km^2 installiert werden. Die regionale Energiebereitstellung nach Energieträgern und der Energiebedarf sind Bild 13 zu entnehmen.

Eine Auflistung der eingespeisten Energie beider Ansätze nach Regionen ist in Tabelle 17 zu finden.

Eine Gegenüberstellung von Elektrizitätsbedarf und -verbrauch ist in Bild 11 dargestellt.

Tabelle 16: Eingespeiste Energie 2011 der EEG-Anlagen in GWh [16][10]

	Wasser-kraft-werke	Biomas-sekraft-werke	Deponie-, Klär-, Gruben-gas	Geother-mie	Onshore-WKA	PV-Anla-gen	Offshore-WKA	Gesamt
Baden-Württemberg	1217	2865	54	0	628	3288	0	8052
Bayern	2370	5653	30	8	778	7147	0	15986
Berlin	0	142	0	0	6	36	0	184
Brandenburg	16	2052	143	0	7886	776	0	10873
Bremen	0	23	1	0	257	13	0	294
Hamburg	0	154	1	0	82	13	0	250
Hessen	214	920	62	0	886	944	0	3026
Mecklenburg-Vor-pommern	9	1576	31	0	3087	264	0	4967
Niedersachsen	196	5385	50	0	12145	1486	0	19262
Nordrhein-Westfalen	224	2883	865	0	4880	2025	0	10877
Rheinland-Pfalz	107	691	30	11	2105	940	0	3884
Saarland	34	45	387	0	220	179	0	865
Sachsen	266	1061	42	0	1653	637	0	3659
Sachsen-Anhalt	85	1498	77	0	6159	523	0	8342
Schleswig-Holstein	9	1809	23	0	6190	735	0	8766
Thüringen	97	1222	16	0	1349	341	0	3025
Nordsee	0	0	0	0	0	0	443	443
Ostsee	0	0	0	0	0	0	125	125
Gesamt	4844	27979	1812	19	48311	19347	568	102880

10 Die Quelle beinhaltet ausschließlich EEG-Anlagen und dient hier hauptsächlich als Maß für die räumliche Verteilung der Energieanlagen auf die Regionen. Insb. die eingespeiste Energie aller Wasserkraftwerke (auch nicht-EEG) liegt um ein Vielfaches höher. [9] Aktuellere länderbezogene Zahlen lagen bei Drucklegung der Studie leider nicht vor.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Bild 10: Verbindungskorridore und deren Länge zwischen den Regionen

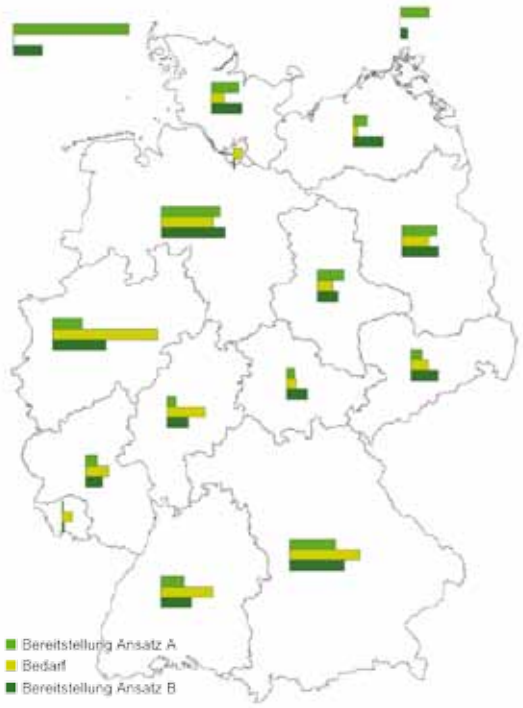


Bild 11: Bedarf und Bereitstellung nach den untersuchten Ansätzen A und B

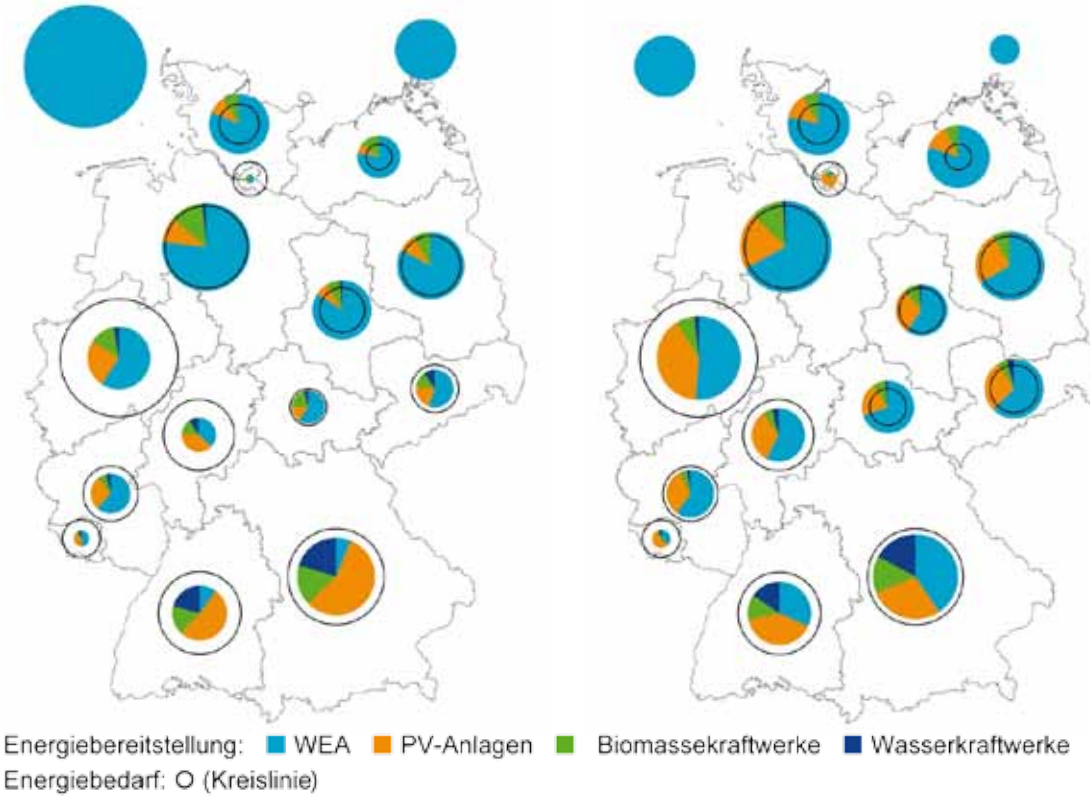


Bild 12: Ansatz A – Bereitstellung und Bedarf nach Regionen (massiver Zubau Offshore-WEA und linearer Zubau an Land seit 2011)

Bild 13: Ansatz B – Bereitstellung und Bedarf nach Regionen (moderater Zubau Offshore-WEA und Zubau an Land gem. Potenzialflächen)

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

5.6 Übertragungskorridore

Im fünften und letzten Schritt wird berechnet, welche Verbindungskorridore unter den gewählten Annahmen zum Energieausgleich genutzt werden. In jedem Übergabepunkt müssen sich Energiebereitstellung und Energieaufnahme ausgleichen. Daraus ergibt sich ein lineares Gleichungssystem, welches so optimiert wird, dass das Summenprodukt aus übertragener Energie und Länge über alle Verbindungskorridore minimiert wird. Dies entspricht dem Ziel, insgesamt möglichst wenig Energie über möglichst kurze Entfernungen zu übertragen. Im Ergebnis wird über viele Verbindungskorridore keine Energie übertragen. Alle anderen Verbindungskorridore werden genutzt und daher als Übertragungskorridor bezeichnet. Die sich ergebenden Übertragungskorridore sind in Bild 14 und Bild 15 gezeigt.

In beiden Ansätzen muss Energie von Nord nach Süd und von Ost nach West transübertragen werden. In Ansatz A müssen erhebliche Energiemengen aus der Nordsee nach Nordrhein-Westfalen übertragen werden. Der dafür erforderliche Übertragungskorridor muss eine Übertragungsfähigkeit von 180TWh/a bei einer Länge 377km haben. Die größte erforderliche Übertragungsaufgabe im Ansatz B zwischen Thüringen und Hessen beträgt 64TWh/a über eine Entfernung von 145km.

Im Ansatz A muss pro Jahr eine Energiemenge von 602TWh, im Ansatz B hingegen nur 394TWh ausgeglichen werden. Damit muss im Ansatz B lediglich 55% der Energiemenge von Ansatz A übertragen werden.

Die Angaben zur Energiemenge können mit der Länge des Übertragungskorridors gewichtet werden. Es ergeben sich in Ansatz A 141.390TWhkm/a und in Ansatz B 78.936TWhkm/a. Damit kann gezeigt werden, dass sich im Ansatz B der Aufwand für den Ausgleich von Energie um ca. 45% reduziert.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Bild 14: Ansatz A – Übertragungskorridore mit dem notwendigen jährlichen Energieausgleich

Bild 15: Ansatz B – Übertragungskorridore mit dem notwendigen jährlichen Energieausgleich

Tabelle 17: Eingespeiste Energie im Zukunftsszenario in GWh

	Wasserkraftwerke	Biomassekraftwerke	Photovoltaik-Anlagen		Windkraftanlagen		Gesamt	
			Ansatz A	Ansatz B	Ansatz A	Ansatz B	Ansatz A	Ansatz B
Baden-Württemberg	7537	6144	18710	19447	3574	15322	35965	48450
Bayern	14678	12123	40669	24104	4427	34738	71897	85643
Berlin-Brandenburg	99	4705	4621	14095	44908	37693	54333	56593
Hamburg	0	330	74	2539	467	271	871	3140
Hessen	1325	1973	5372	10990	5042	19189	13712	33477
Mecklenburg-Vorpommern	56	3380	1502	6092	17566	37820	22504	47348
Niedersachsen- Bremen	1214	11597	8530	20084	70572	67163	91913	100058
Nordrhein-Westfalen	1387	6182	11523	33430	27769	42816	46861	83815
Rheinland-Pfalz	663	1482	5349	8749	11978	16057	19472	26950
Saarland	211	97	1019	2485	1252	1506	2579	4300
Sachsen	1647	2275	3625	11802	9406	26194	16953	41918
Sachsen-Anhalt	526	3212	2976	9357	35047	19090	41761	32185
Schleswig-Holstein	56	3879	4182	6131	35223	36629	43340	46695
Thüringen	601	2621	1940	6846	7676	23176	12838	33244
Nordsee	0	0	0	0	180000	45000	180000	45000
Ostsee	0	0	0	0	45000	11250	45000	11250
Gesamt	30000	60000	110092	176151	499907	433914	700000	700000

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

5.7 Fazit

Die vorgestellte Methode zeigt unter verschiedenen Annahmen, was an Energiebereitstellung und Energieausgleich notwendig wird, um den Bedarf an elektrischer Energie vollständig aus erneuerbaren Energiequellen zu decken. Je nach räumlicher Verteilung der Energiebereitstellung variieren der benötigte Energieausgleich und damit der Bedarf an Übertragungskapazitäten zwischen den zwei betrachteten Ansätzen deutlich. Die Tatsache, dass in beiden Ansätzen ein Energieausgleich benötigt wird, zeigt weiterhin, dass die Energiewende nicht allein in regionalem Maßstab, heute orientiert an den Bundesländern, umgesetzt werden kann. Es bedarf zwingend einer überregionalen Betrachtungsweise bzgl. Energiebereitstellung und Energieübertragung.

Auf Möglichkeiten der Energieübertragung des Energietransports wurde an dieser Stelle nicht eingegangen. Die Studie [4] der RWTH Aachen bietet hierzu eine übersichtliche Aufbereitung.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

6 Zusammenfassung

Durch den weiteren Ausbau von kleinen dezentralen Erzeugungseinheiten mit bis zu einem Anteil von 80 % erneuerbarer Energien werden neue Strukturen der Energienetze erforderlich. In der vorliegenden Studie wird untersucht, inwieweit es möglich ist, Verbrauch und Erzeugung von Energie lokal auszubalancieren. Damit soll der Austausch mit benachbarten Zellen und Regionen möglichst gering gehalten werden bei entsprechend niedrigem Bedarf an Leitungskapazitäten. Dieser Ansatz macht weitgehend Gebrauch von neuen Technologien zur Erzeugung, Wandlung und Speicherung von Energie in der jeweils günstigsten Form, soweit diese Technologien heute bereits einsetzbar bzw. ihre Anwendung absehbar ist.

Bei diesem Zellularen Ansatz werden sogenannte Energiezellen gebildet, bei welchen der Energiehaushalt sowie der Energieaustausch untereinander plan- und steuerbar sind. Die lokalen Energiezellen sind durch Energienetze und Kommunikationssysteme untereinander verbunden und bilden übergeordnete größere Energiezellen. Diese größeren Energiezellen besitzen wiederum die in dieser Studie beschriebenen Schnittstellen und Eigenschaften. Das Zusammenfassen von Energiezellen erfolgt dabei über mehrere Ebenen. Der Zellulare Ansatz ist sowohl auf kleine als auch auf größere Einheiten und Systeme anwendbar. Eine vollständige Energiezelle besteht aus den Komponenten Erzeuger, Wandler, Speicher, Netzanschluss, Last sowie Schutz- und leittechnischen Einrichtungen. Es sind auch Untermengen der Energiezellen möglich und können u.a. zur Beschreibung konventioneller Anlagen benutzt werden.

Aus energetischer Sicht gibt es unter- und überbilanzierte Energiezellen sowie - im Idealfall - ausbilanzierte Energiezellen, wobei dies nicht für alle Energiezellen aufgrund nicht ausreichender lokaler Erzeugung möglich ist. Diese unterbilanzierten Energiezellen benötigen Energie von überbilanzierten Zellen. Damit wird deutlich, dass trotz des Zellularen Ansatzes eine Energieübertragung zum Ausgleich zwischen mehreren Energiezellen erforderlich ist.

Die Anwendung dieses Konzeptes führt zu den folgenden wesentlichen Ergebnissen und Schlussfolgerungen der Studie.

6.1 Schlussfolgerungen

Der Zellulare Ansatz - Grundlage für eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung

Zellulare Ansätze werden bereits heute z.B. in der Kommunikationstechnik erfolgreich angewendet. Auch in der Energieversorgung stellt der Zellula-

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

re Ansatz eine konsequente gesamtsystemische Weiterentwicklung der heute schon vorhandenen Praxis von dezentraler Energieerzeugung, bzw. -wandlung und lokalem Speichern dar. Bei diesem Ansatz wird explizit die stärkere Konvergenz der unterschiedlichen Energieträger berücksichtigt und ermöglicht.

Entsprechend des Zellularen Ansatzes wird in Zukunft das Gleichgewicht zwischen lokaler Erzeugung und Verbrauch auf den niedrigsten machbaren Ebenen angestrebt. Hierdurch ergeben sich wesentliche Chancen, den Besonderheiten regenerativer Energiequellen gerecht zu werden und diese bestmöglich in das Energieversorgungssystem zu integrieren.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich durch die lokale Bilanzierung der Erzeugung und des Verbrauchs in den einzelnen Energiezellen der notwendige Energieübertragungsbedarf erheblich reduziert.

Der Zellulare Ansatz – Technische Innovation und Motor für eine elektrische Energieversorgung aus erneuerbaren Energieträgern
Durch den Zellularen Ansatz entstehen aktive Teilsysteme, die auf die Anforderungen des übergeordneten Gesamtsystems in geeigneter Weise reagieren können. Hierdurch ergeben sich neue Optionen für den Betrieb von Energiesystemen, die von der Bereitstellung von Systemdienstleistungen bis hin zum temporär autarken Betrieb von Teilsystemen reichen. Dieses Konzept trägt inhärent zur Erhöhung der Robustheit des Gesamtsystems bezüglich Systemstabilität und Versorgungszuverlässigkeit bei. Zusätzlich wird durch die Aggregation und zusammenhängende Anonymisierung von Daten der Prosumer deren Vertraulichkeit gewahrt.

Der dargestellte lokale Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch reduziert die durch die volatile Erzeugung von erneuerbaren Energieträgern hervorgerufenen Anforderungen für das gesamte Energiesystem. Dadurch wird die Integration der erneuerbaren Energieträger in Energieversorgungssysteme erheblich erleichtert. Der Zellulare Ansatz bildet damit die Grundlage einer nachhaltigen auf erneuerbaren Energieträgern basierenden Energieversorgung der Zukunft.

Der Zellulare Ansatz ermöglicht eine kontinuierliche Transformation vom bestehenden in ein neues Energieversorgungssystem. Hierdurch können beide Systeme übergangsweise parallel betrieben werden.

Der Zellulare Ansatz – Förderung der Konvergenz zwischen Energieträgern
Das Konzept des Zellularen Ansatzes zeichnet sich dadurch aus, dass es sowohl offen für alle Energieträger als auch für neue Technologien ist. Die technische Umsetzung ist unabhängig von genutzten Energieträgern, wie z.B. Gas oder Elektrizität, und den angewendeten Energiewandlungs-

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

und -speichertechnologien. Jeder Energieträger hat spezifische Vor- und Nachteile, die im Rahmen des Zellularen Ansatzes optimal genutzt werden können.

So bietet elektrische Energie grundsätzlich die Vorteile, dass diese sehr einfach und im Allgemeinen mit gutem Wirkungsgrad in alle anderen Energieformen umgewandelt werden kann und daher bei regenerativer Erzeugung als sehr saubere Energieform angesehen wird. Der große Nachteil besteht darin, dass elektrische Energie nicht gut gespeichert werden kann und daher andere Energieformen zur Speicherung eingesetzt werden müssen. Zudem findet der Neubau elektrischer Leitungen oftmals nur geringe Akzeptanz.

Gas ist als Energieträger sehr leicht zu speichern und kurzzeitige Schwankungen der Leistung können direkt durch das inhärente Speichervermögen des Gasnetzes selbst gepuffert werden. Langzeitspeicher mit Gas sind einfach zu realisieren. Der Hauptnachteil des Energieträgers Gas besteht darin, dass Gas nur mit geringem Wirkungsgrad in Elektrizität umgewandelt werden kann. Zudem muss „regeneratives“ Gas erst durch Elektrolyse aus Elektrizität hergestellt werden.

Thermische Energie kann einfach und kostengünstig gespeichert werden. Nachteile sind, dass eine Umwandlung in andere Energieformen nur mit geringem Wirkungsgrad möglich ist und außerdem eine Übertragung über mittlere und weite Strecken nicht sinnvoll erscheint, da die Verluste zu hoch sind.

Durch Nutzung geeigneter Wandlungstechnologien kann der für die jeweilige Aufgabe optimale Energieträger eingesetzt werden. Dabei können sowohl großtechnische Lösungen in übergeordneten Energiezellen als auch technische Lösungen auf lokaler Ebene angewendet werden.

Diese Lösungen zeichnen sich durch ihre hohe Flexibilität gegenüber jeglicher Art von Veränderungen, seien es technische, wirtschaftliche oder auch regulatorische, aus.

Der Zellulare Ansatz – Basis für eine nachhaltige Akzeptanz der Energiewende

Der Zellulare Ansatz stellt durch die lokale Zuordnung einen direkten Bezug zwischen den Anwendern und der für die Energieversorgung notwendigen Technik her. Es hat sich in den vergangenen Jahren gezeigt, dass hierdurch die Akzeptanz erheblich steigt.

Darüber hinaus besitzen Anwender auf lokaler Ebene durch die Flexibilität des Systems ein hohes Maß an Selbstbestimmung. Anwender können selbst entscheiden, welche Technologien in welchem Maße eingesetzt und in welchem Umfang systemstützende Dienstleistungen aus den Energiezellen heraus angeboten werden.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Der Zellulare Ansatz – Ermöglicht die Reduzierung der Energieübertragung

Mit der Reduzierung der Residuallast der Energiezellen durch den Zellularen Ansatz wird auch die erforderliche Energieübertragung vermindert. Der Zellulare Ansatz ermöglicht auf lokaler Ebene die Balance zwischen Erzeugung und Verbrauch innerhalb einer Zelle und zwischen benachbarten Zellen. Dieser lokale Ausgleich ist jedoch nur in begrenztem Rahmen möglich; Energiezellen mit Gewerbe und Industrie sowie dichter Wohnbebauung sind in der Regel auf Energieimporte angewiesen. Darüber hinaus macht die gegebene räumliche Trennung zwischen Erzeugungsanlagen im Norden und Verbrauchschwerpunkten im Süden jedoch auch weiterhin in Deutschland einen Energietransport notwendig.

Der Zellulare Ansatz – Motor für wirtschaftliches Wachstum und neue Marktmodelle

Der Zellulare Ansatz ermöglicht die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle und Märkte. Durch klar definierte Schnittstellen der Energiezellen können der Betrieb der Energiezellen, aber auch die Auswahl der Technik und deren Installation durch neue Dienstleister oder auch Investoren am Markt angeboten werden.

6.2 Handlungsempfehlungen

Aus den dargestellten Ergebnissen der Studie ergeben sich die folgenden Handlungsempfehlungen:

- Entwicklungspläne für zukünftige Energienetze in allen Ebenen müssen sämtliche Energiearten wie Strom, Gas, Wärme etc. berücksichtigen.
- Die Entwicklung von Speichertechnologien in einem großen Energiespektrum muss weiter unterstützt werden, um die Integration erneuerbarer Energien in das Energiesystem voranzubringen.
- Die Entwicklung von Technologien zur effizienten Wandlung muss gefördert werden, um die Vorteile verschiedener Energieformen zu nutzen.
- Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um bei einer Umsetzung des Zellularen Ansatzes offene Fragen der Verantwortung für Planung und Betrieb des Gesamtsystems zu klären.
- Vorgeschlagen werden Felderprobungen zur Machbarkeit des Zellularen Ansatzes.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

7 Literaturverzeichnis

[1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Energiekonzept der Bundesregierung, 2010.

[2] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „Integration of Renewable Energie Sources into the German Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015-2020 mit Ausblick auf 2025 (dena-Netzstudie II),“ 2010.

[3] VDE, „Smart Energy 2020: vom Smart Metering zum Smart Grid,“ Frankfurt, 2010.

[4] P3 energy and storage GmbH, IFHT der RWTH Aachen, „Szenarien für eine langfristige Netzentwicklung, Schlussbericht zur Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie,“ 2012.

[5] Green field network, designing future networks ignoring existing constraints (Cigre Working Group WG C1-19), 2009.

[6] CIGRE Working Group C1.19, „Green field network, designing future networks ignoring existing constraint (579),“ 2014.

[7] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Speichertechnologien,“ 2014. [Online]. Available: http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Speicher/speichertechnologien. [Zugriff am 27 08 2014].

[8] K.-H. Grote und J. Feldhusen, Hrsg., Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, 23. Hrsg., 2012.

[9] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Energiedaten: Zahlen und Fakten,“ 2014. [Online]. Available: http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/gesamtausgabe.

[10] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani und C. Marnay, „Microgrids,“ Power and Energy Magazine, IEEE, pp. 78-94, 2007.

[11] W. Kaufmann, Planung öffentlicher Elektrizitätsverteilungs-Systeme, 1. Hrsg., Frankfurt am Main: Verlags- und Wirtschaftsges. d. Elektrizitätswerke, 1995, p. 254.

[12] Schlesinger, M. et. al., „Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose (Projekt Nr. 57/12, Studie im Auftrag des BMWi),“ Prognos AG, EWI Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH (GWS): Basel, Köln, Osnabrück, 2014.

[13] VDE, „Aktive Energie-Netze im Kontext der Energiewende,“ Frankfurt, 2013.

[14] VDE, „Regionale Flexibilitätsmärkte - Ergebnisse der Task Force „RegioFlex“,“ Frankfurt, 2014.

[15] M. Joswig und T. Theobald, Algorithmische Geometrie: Polyedrische und Algebraische Methoden, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2008.

[16] Bundesnetzagentur, „EEG-Statistikbericht 2011,“ Bonn, 2013.

[17] European Environment Agency, „CORINE Land Cover 2006, Version 17,“ http://www.eea.europa.eu.

[18] Deutscher Wetterdienst, „Windgeschwindigkeiten 1981-2000 100m,“ ftp://ftp.dwd.de/pub/CDC/grids_germany, Offenbach, 2014.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CLC06	CORINE Land Cover 2006
DSM	Demand Side Management (engl. für Verbrauchsmanagement)
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
Power2Gas	Umwandlung elektrischer Energie zu Gas
PSW	Pumpspeicherkraftwerk
PV	Photovoltaik
TF	Task Force
WEA	Windenergieanlage

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Glossar

Energie
Primärenergie … sind Energiequellen, die in der Natur vorkommen.
z.B. Erdöl, Kohle Erdgas, Wasserkraft, Holz, Biomasse, Wind, Solarstrahlung, etc.

Umweltenergie … erneuerbare Primärenergie
z.B. Wasserkraft, Holz, Biomasse, Wind, Solarstrahlung, etc.

Sekundärenergie … ist eine von der Primärenergie abweichende Energieform, um Energie leichter übertragen oder speichern zu können.
z.B. Mineralöle, Steinkohlenkokos, Strom, etc.

Endenergie … Energie beim Endnutzer.
z.B. siehe Sekundärenergie

Nutzenergie … Energie, welche die Bedürfnisse des Abnehmers erfüllt.
z.B. Wärme, Kälte, Licht, mech. Energie

Energiewandler … Gerät oder Anlage, in der Energie von einer Form in eine andere gebracht wird (z.B. Gas zu Elektrisch, aber auch Umformung rein elektrischer Energie wie die Veränderung der elektrischen Spannung)
Im Sinne dieser Studie werden Energiewandler in drei Arten unterteilt: dem Bilanzkreis zuführende Wandler, aus dem Bilanzkreis abführende Wandler und Energie konditionierende Wandler.

Prosumer (engl.) … bezeichnet hier Betreiber von Energiezellen, die gleichzeitig Konsumenten, also Verbraucher (englisch: „consumer“), als auch Produzenten, also Hersteller (englisch: „producer“), von Energie sind.

Anhang 1: Technologiesteckbriefe

Der Anhang 1 kann als Zip-Datei hier heruntergeladen werden:

www.vde.com/GANN

Zum Entpacken der Datei benötigen Sie das Passwort TS-GANN

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Anhang 2: Detailuntersuchungen

A2.1 Exemplarische Untersuchungen zur Energiezelle Haushalt

Die Versorgung einer Energiezelle Haushalt wird am Beispiel eines Einfamilienhauses aufgezeigt. Ausgangspunkt hierfür sind die Bedarfe für Elektro- und Wärmenergie sowie für Mobilität. Ziel ist es, die Bedarfe so gut wie möglich durch die Erzeugung in den Energiezellen zu decken und die Energieaufnahme sowie Energierückspeisung im Falle des Stromnetzanschlusses möglichst gering zu halten.

In einem ersten Schritt werden die zur Anwendung kommenden Technologien für die verschiedenen Netzanschlüsse aufgezeigt. Ziel hierbei ist es, den Umfang der technischen Lösung möglichst gering zu halten. Bewertet wird die gefundene Versorgungslösung anhand des gezeigten Schemas in Bezug auf die Technologiekomplexität und das jeweilige Potenzial.

Anschließend wird aufbauend auf der technischen Lösung die Berechnungsgrundlage diskutiert. Hierzu zählt zum einen die Umsetzung der Szenarien für die Betrachtung der Energiezelle Haushalt, die zur Anwendung kommenden Lastgänge sowie die Kenndaten der verschiedenen Erzeugertechnologien.

A2.1.1 Technologieeinsatz für Energiezellen Haushalt

Grundlage für den Zellularen Ansatz ist die Festsetzung der zu erfüllenden Bedarfe. Im Bereich der Energiezelle Haushalt ist die zunehmende Klimatisierung der Gebäude aus Sicht der Autoren nicht gegeben, wodurch sich der Bedarf auf den Elektro-, den Wärme- und den Mobilitätsbedarf reduzieren lässt. Für die Reduktion der Energieaufnahme aus Versorgungsnetze der Zelle ist grundsätzlich im Bereich der Energiezelle Haushalt eine PV-Anlage vorgesehen.

Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss

Hauptbestandteil der Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss ist ein motorisches BHKW (vgl. Bild A1). Mit diesem können elektrischer und thermischer Energie erzeugt werden, welche der Bedarfserfüllung zur Verfügung stehen. Standardmäßig werden BHKWs mit einem Wärmespeicher hydraulisch eingebunden, um kurzzeitige Differenzen zwischen Erzeugung und Verbraucher auszugleichen.

Ergänzend ist eine Direktheizung implementiert. Die Notwendigkeit lässt sich durch zwei Tatsachen ableiten. BHKWs besitzen heute ein festes Verhältnis zwischen Bereitstellung von thermischer und elektrischer Energie.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Hierdurch ist die Elektro- und Wärmeenergieerzeugung fest miteinander gekoppelt. Aufgrund der jahreszeitlichen Schwankungen im Heizwärmebedarf ergibt sich hiermit bei Erfüllung des Wärmebedarfs im Winter ein Überschuss an Elektrizität, und im Sommer ein Überschuss an Wärme. Umgekehrt ist die PV-Einspeisung im Sommer wesentlich größer als im Winter. Durch die Direktheizung kann im Sommer somit die benötigte Wärme durch die PV-Einspeisung bereitgestellt werden. Im Winter wiederum stellt das BHKW zu großen Anteilen sowohl die Elektro- als auch Wärmeenergie bereit.

Um die dargebotsabhängige Elektroenergieerzeugung auszugleichen, ist zusätzlich ein Batteriespeicher implementiert.

Die Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss ist durch die starken Abhängigkeiten zwischen den Bedarfen, der Größe der PV-Anlage, den Speichergrößen sowie den elektrischen und thermischen Wirkungsgraden des BHKWs gekennzeichnet. Begründet liegt dies in der fehlenden Möglichkeit der Rückspeisung in das Gasnetz. Die Abhängigkeiten sind insbesondere bei der Dimensionierung der Anlagen für die verschiedenen Szenarien zu beachten. Um die Komplexität zu verringern, bleiben die Kenndaten der Erzeugertechnologien und Speicher für die Szenarien unverändert, einzig die Spitzenleistung der PV-Anlage wird entsprechend der Bedarfe angepasst.

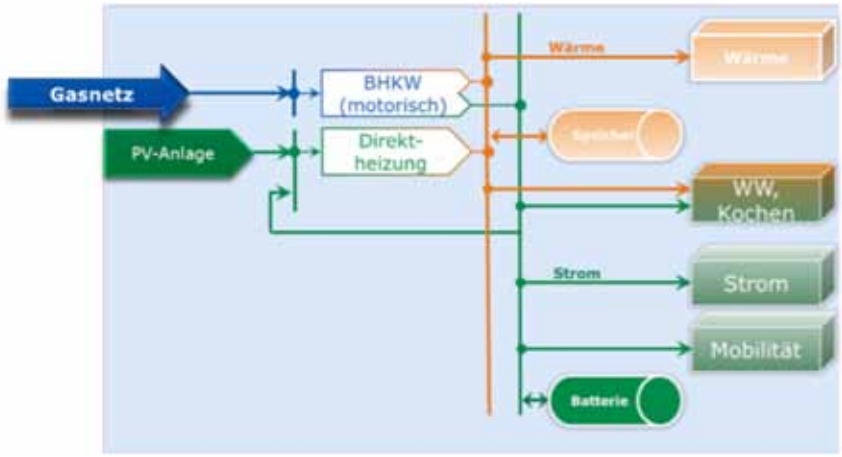


Bild A1: Grundausstattung - Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss

Energiezelle Haushalt mit Stromnetzanschluss

Im Gegensatz zur Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss ist die Realisierung einer Energiezelle Haushalt mit Stromnetzanschluss unproblematisch. Gegenwärtig ist die Bedarfserfüllung über Elektroenergie bereits Stand der Technik.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Aus Effizienzgründen wird für die Wärmeerzeugung eine elektrische Wärmepumpe vorgesehen. Ergänzt wird diese durch einen thermischen Speicher. Die Integration eines Elektroenergiespeichers ist aufgrund der Möglichkeit des bidirektionalen Leistungsflusses im Stromnetz nicht notwendig.

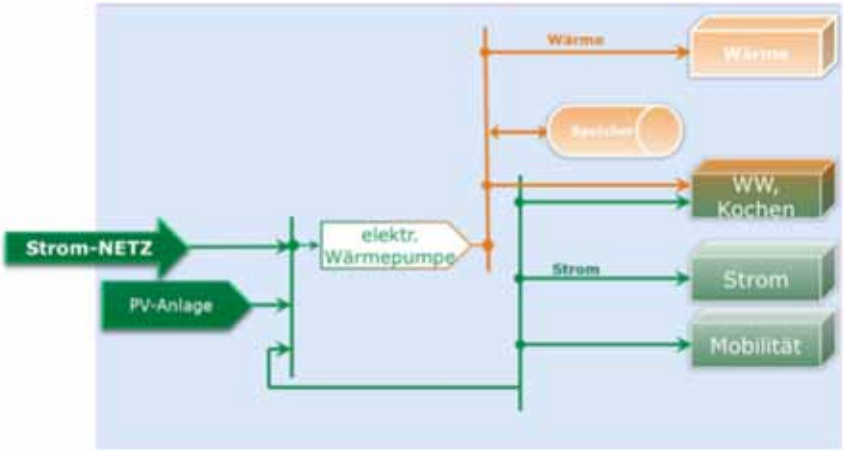


Bild A2: Grundausstattung – Energiezelle Haushalt mit Stromnetzanschluss

Netzautarke Energiezelle Haushalt

Die einfachste Technologielösung für die netzautarke Energiezelle Haushalt stellt eine Erweiterung der Energiezelle Haushalt mit Stromnetzanschluss um den Elektroenergiespeicher dar (vgl. Bild A3). Die Versorgung Energiezelle Haushalt erfolgt hierbei einzig durch die der Energiezelle Haushalt zugehörige PV-Anlage. Der Wärmebedarf wird durch eine Wärmepumpe bereitgestellt.

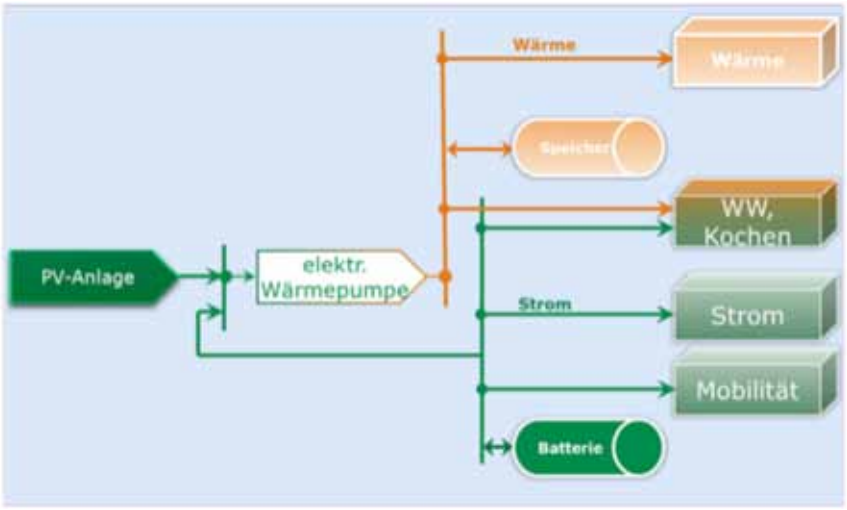


Bild A3: Grundausstattung – netzautarke Energiezelle Haushalt

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

A2.1.2 Berechnungsgrundlagen für die Energiezelle Haushalt

Die Varianten für verschiedene Netzanschlüsse sind unter zwei Gesichtspunkten zu betrachten, der technologischen Machbarkeit und des Einflusses auf die Versorgungsnetze Gas und Strom. Die Umsetzung erfolgt anhand Berechnungstools, welche die Machbarkeit nachweisen und die Ermittlung verschiedener Kenngrößen für die Bewertung des Einflusses auf Netze erlauben. Nachfolgend sollen die Berechnungsgrundlagen sowie die gemachten Vereinfachungen aufgezeigt werden. Hierzu zählt die Umsetzung der Szenarien, die zur Anwendung gekommenen Lastgänge und anschließend Kenndaten für die Erzeugungsanlagen.

Umsetzung der Szenarien

Zur Reduktion der Komplexität wurden, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, drei Bedarfsszenarien erstellt. Diese sind durch zwei wesentliche Einflüsse im Bereich der Energiezelle Haushalt geprägt, der Durchdringung des Individualverkehrs mit Elektrofahrzeugen (Szenario B) und der zunehmenden Gebäudesanierung (Szenario C), welche erhebliche Auswirkungen auf den Heizwärmebedarf des Gebäudes hat.

Daten der Szenarien

Das Szenario A stellt das Ausgangsszenario dar. Der Mobilitätsbedarf wird hierbei nicht in der Energiezelle Haushaltgedeckt. Der Heizwärmebedarf der Zelle entspricht einem Bestandsgebäude entsprechend der Wärmeschutzverordnung 77 (WSVO 77). Hierdurch kann der große Anteil von etwa 12 Mio. unsanierter Ein- und Zweifamilienhäuser beschrieben werden (Gesamtzahl 15 Mio.) [Shell BDH Hauswärmestudie]. Zusätzlich zum Heizwärmebedarf wird der Trinkwasserwärmebedarf in die Betrachtung integriert. Dieser bleibt in den drei Szenarien unverändert. Für den Elektroenergiebedarf werden zwei Haushalte betrachtet, welche durch einen hohen bzw. niedrigen Elektroenergieverbrauch gekennzeichnet sind. Diese Betrachtung wird in Szenario B und C äquivalent verfolgt. Eine Verbrauchsreduzierung im Bereich der Haushalte wird von den Autoren nicht erwartet, eine Veränderung der Lastgänge erfolgt hierdurch nicht. Effizienzsteigerungen werden durch eine häufigere Nutzung der jeweiligen Geräte und zusätzlicher Geräte egalisiert.

Szenario B erweitert Szenario A um die Elektromobilität. Hierbei wird von täglichen Fahrstrecken von 50 km ausgegangen, wodurch sich eine Jahresfahrleistung von etwa 18.250 km ergibt. Die Ladung erfolgt ausschließlich zu Hause ab 20 Uhr.

Aufbauend wird in Szenario C der zweite wesentliche Entwicklungstrend, die Gebäudesanierung, in die Betrachtungen integriert. Hierfür wird ein

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Niedrigenergiehaus nach Energieverordnung 2009 KfW-Effizienzhaus 55 (EnEV 2009 KfW 55) mit derselben Architektur wie in Szenario A betrachtet. Hierdurch wird der Jahresheizwärmebedarf um etwa das 7fache reduziert. Der Trinkwasserbedarf bleibt davon unbeeinflusst.

Lastgänge für die Szenarien

Für belastbare Aussagen ist es dringend notwendig, realitätsnahe Lastgänge in möglichst hoher zeitlicher Auflösung zur Verfügung zu haben. Für den Elektroenergiebedarf sowie den Wärmebedarf (Heiz- und Trinkwasser) liegen Lastgänge mit einer 15-minütigen Auflösung vor.

Die elektrischen, probabilistisch erzeugten Lastgänge beschreiben einen Haushalt mit zwei nicht werktätigen Personen. Der Lastgang wird dabei durch die Synthese von Lastverläufen verschiedenster Haushaltsgeräte (Waschmaschine, Wasserkocher, etc.) mit festgelegten Nutzerkenndaten wie Benutzungsdauer und mögliche Einschaltzeiten mit hinterlegten Wahrscheinlichkeitskenngrößen erzeugt [9]. Für die Berechnung wird ein Lastgang mit niedrigem (E_{NV} = 3.275 kWh/a) und hohem Elektroenergieverbrauch (E_{HV} = 5.825 kWh/a) verwendet. Die Jahresspitzenleistung liegt bei $P_{NV\,max\,a}$ = 3.64 kW $\hat{P}_{NV\,a}$ = 3,64 kW für den Haushalt mit niedrigem Verbrauch und $P_{NV\,max\,a}$ = 8,25 kW bei hohem Verbrauch.

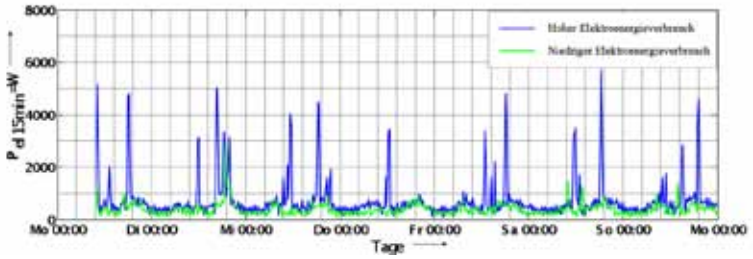


Bild A4: Elektrischer Wochenlastgang (Beispielwoche) für Haushalt mit niedrigem und hohem Verbrauch

In Szenario B und C wird zusätzlich die Elektromobilität betrachtet. Für diesen wird eine tägliche Fahrstrecke von 50 km angenommen. Die gesamte Batterieladung von 23 kWh wird innerhalb von 7 h geladen, wodurch sich die Ladeleistung zu P_{lade} = 3,3 kW ergibt. Die Ladung erfolgt in den Abendstunden und beträgt für die festgelegte Fahrstrecke 2,3 h. In Bild A5 ist als Beispiel der sich ergebende Lastgang für die Szenarien mit Elektromobilität dargestellt, unter Annahme eines hohen Energieverbrauchs in der Energiezelle Haushalt.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

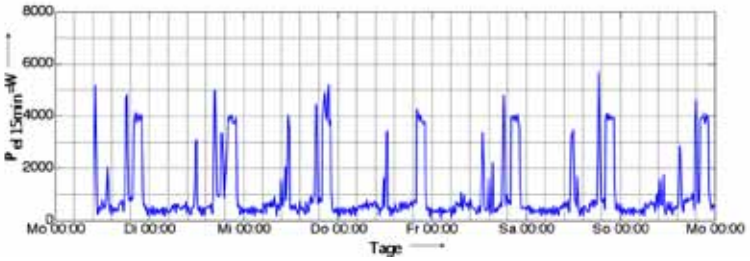


Bild A5: Elektrischer Wochenlastgang (Beispielwoche) für Haushalt mit hohem Verbrauch und Elektrofahrzeug

Neben dem Elektroenergiebedarf ist der Wärmebedarf eine weitere relevante Größe. Hierfür werden Ergebnisse aus einer Gebäudesimulation herangezogen. In dieser wird das Gebäude als 3-D Modell mit vorgegebenen Wärmeübergangskoeffizienten, sowie einem mit hohem Detailierungsgrad integrierten Heizsystem hinterlegt. Anhand realer Wetterdaten aus dem Jahr 2001 wird der Heiz- und Warmwasserbedarf bestimmt. In die Simulation geht neben der Außentemperatur u.a. auch die Sonnenbestrahlung, Luftdruck und sowie Windrichtung und -stärke ein.

Für die Berechnungen wurde somit ein Wärmelastgang nach WSVO 77, welcher repräsentativ für unsanierte Bestandsgebäude ist, erzeugt. Der Gesamtwärmebedarf liegt bei $Q_{\text{WSVO 77}}$ = 40,465 kWh/a. Für die vollsanierte Energiezelle Haushalt nach EnEV 2009 KfW 55 ergibt sich hingegen ein deutlich reduzierter Gesamtwärmebedarf von $Q_{\text{EnEV 2009}}$ = 8,455 kWh/a. Beide Kenngrößen beinhalten den Warmwasserbedarf von Q_{WW} = 2,978 kWh/a. Der Jahreslastgang für den Gesamtwärmebedarf ist in Bild A6 für 24 h Mittelwerte dargestellt und Bild A7 zeigt den Wochenlastgang des Warmwasserbedarfs.

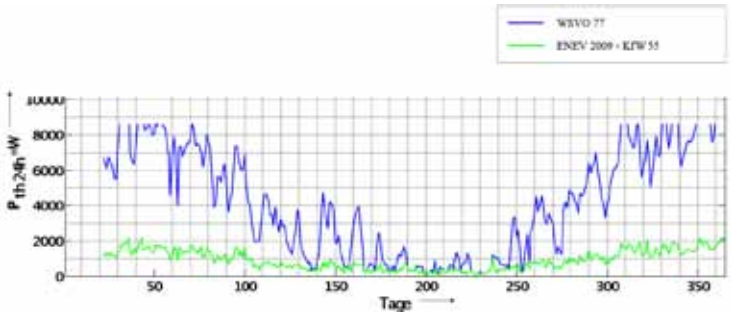


Bild A6: Thermischer Jahreslastgang für Gesamtwärmebedarf einer Energiezelle Haushalt gemäß Energiestandard WSVO 77 und EnEV 2009 KFW 55

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

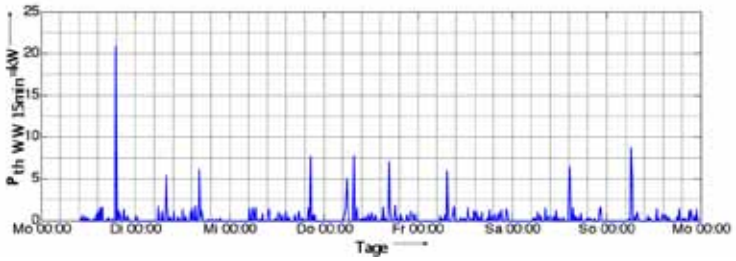


Bild A7: Wochenlastgang Warmwasserbedarf (Beispielwoche)

Zusätzlich zu den Bedarfen wurde auch die Erzeugung durch die PV-Anlage realitätsnah mit Hilfe eines Beispielerzeugungsgangs (Bild A8) bestimmt. Die Größe der PV-Anlage variiert entsprechend den berechneten Kombinationen. Um den Einfluss unterschiedlicher PV-Einspeisung bei gleichzeitig stark verändertem Wärmebedarf zu zeigen, wurden zwei extreme Wochen untersucht. Die Einspeisung in der betrachteten Sommerwoche (17.07.-22.07.) ist somit etwa 35mal höher als in der untersuchten Winterwoche (08.01.-14.01.). Neben der Wochenbetrachtung wurde zusätzlich eine Jahresberechnung durchgeführt.

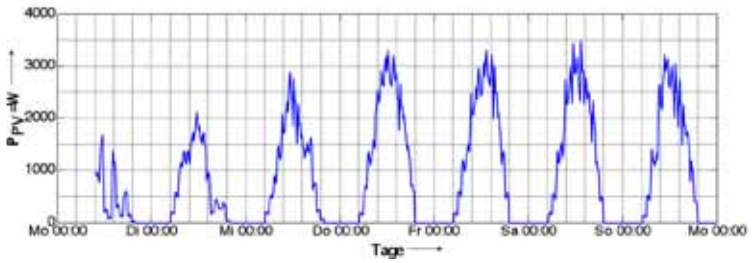


Bild A8: Wochenlastgang PV-Einspeisung (Beispielwoche)

Erzeuger und Speicher in der Energiezelle Haushalt

Modellierung der Speicher

Warmwasser- und Elektroenergiespeicher werden in den Berechnungen vereinfacht nachgebildet. Eine Betrachtung von Lade- und Entladezeiten ist nicht implementiert. Ebenso werden Verluste nicht berücksichtigt.

Der Elektroenergiespeicher hat ein Speichervermögen von 45 kWh. Der Minimalwert ist auf 10 % festgesetzt, wodurch sich der nutzbare Speicher auf 40,5 kWh reduziert.

Der thermische Speicher wird durch die Gleichung

$$Q_{SP} = m \cdot c_w \cdot \Delta T$$

beschrieben. Grundlage ist eine Temperaturdifferenz von 40 K. Für die Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss ist ein Volumen von 1500 l erforderlich, wodurch sich ein Speichervermögen von ca. 70 kWh ergibt. Für die Energiezelle Haushalt mit Stromnetzanschluss kann aufgrund der

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

erhöhten Flexibilität und der Unabhängigkeit von Elektro- und Wärmebedarfserfüllung der thermische Speicher kleiner (1000 l) ausgeführt werden. Das Speichervermögen ergibt sich mit ca. 47 kWh.

Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss

Die Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss ist durch drei Erzeugeranlagen gekennzeichnet. In Tabelle A1 und Tabelle A2 sind die Kenndaten dargestellt. Um einen taktenden Betrieb von BHKW und Direktheizung zu vermeiden, wurde eine minimale Betriebszeit festgelegt. Im Falle einer dadurch hervorgerufenen Verletzung der Speichergrenzen ist jedoch jederzeit eine Abschaltung möglich. Zusätzlich wurden mehrere Leistungsstufen eingeführt, welche linear zwischen minimaler und maximaler Leistung verteilt sind. Die Dimensionierung der Anlagen bleibt aufgrund der Einführung verschiedener Leistungsstufen und der damit verbundenen Leistungsanpassung an die Versorgungsaufgabe in den verschiedenen Szenarien unverändert. Die Berechnung erfolgt rein bilanztechnisch. Der Einfluss des dynamischen Verhaltens, wie zum Beispiel der Anfahrvorgang des BHKWs, kann aus Sicht der Autoren aufgrund der zeitlichen Auflösung von 15 min vernachlässigt werden.

Tabelle A1: Kenndaten Blockheizkraftwerke und Direktheizung

	Blockheizkraftwerk	**Direktheizung**
Maximale Leistung	$P_{el\,max}$ = 4 kW $P_{th\,max}$ = 11,2 kW	$P_{th\,max}$ = 6 kW
Minimale Leistung	$P_{el\,min}$ = 0,5 kW $P_{th\,min}$ = 1,4 kW	$P_{th\,min}$ = 1 kW
Anzahl Leistungsstufen inkl. AUS	4	4
Wirkungsgrad(e)	η_{el} = 25% η_{th} = 70%	η_{th} = 98%
Minimale Betriebszeit	1 h	1 h

Aufgrund der sich in den Szenarien verändernden Bedarfe ist es notwendig, die PV-Anlage bzgl. der Dimensionierung anzupassen. Dies ist insbesondere dem erhöhtem Elektroenergiebedarf durch Elektromobilität (Szenario B und C) als auch dem Haushalt mit hohem Bedarf an Elektrizität geschuldet.

Tabelle A2: Dimensionierung der PV-Anlage

	Szenario A		**Szenario B und Szenario C**	
Elektroenergieverbrauch	niedrig	hoch	niedrig	hoch
PV-Anlage	P_r = 3,8 kW_p	P_r = 5,1 kW_p	P_r = 5,1 kW_p	P_r = 6,3 kW_p

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Energiezelle Haushalt mit Stromnetzanschluss

Die Energiezelle Haushalt mit Stromnetzanschluss besitzt als Erzeugeranlage eine Wärmepumpe (Tabelle A3) und die PV-Anlage. Analog zur Zelle mit Gasnetzanschluss werden für die Wärmepumpe mehrere Leistungsstufen integriert. Die minimale Betriebszeit wird zugunsten einer erhöhten Flexibilität für die Fahrplanerstellung reduziert.

Die PV-Anlage kann im Falle des Stromnetzes unabhängig vom Szenario dimensioniert werden. Die Größe beträgt P_{rPV} = 11,3 kW_p

Tabelle A3: Kenndaten Wärmepumpe

	Wärmepumpe
Maximale Leistung	$P_{th\,max}$ = 20.000 W
Minimale Leistung	$P_{th\,min}$ = 1.000 W
Anzahl Leistungsstufen inkl. AUS	5
Leistungszahl	4,52
Minimale Betriebszeit	0,5 h

A2.1.3 Betrieb der Energiezelle Haushalt

Im nachfolgenden Kapitel soll die Methodik zur Modellierung des Betriebes dargestellt werden. Konkretes Ziel für die Zellen mit Netzanschluss ist sowohl die Minimierung des Energiebezugs bzw. der Energieeinspeisung, als auch die Reduzierung der Spitzenleistung. Hierfür ist eine gezielte Fahrplanerstellung erforderlich. Wie diese erfolgt, ist im Folgenden dargestellt.

Grundlage für den Betrieb

Grundlage für die Fahrplanerstellung sind die Bedarfe. Ein anschauliches Werkzeug für die Beschreibung der bis zu einem Zeitpunkt erzeugten Energie (Wärme bzw. Elektro) ist die kumulierte Summe über die in jedem Intervall benötigte Energie. Beachtet man zusätzlich den Anfangsspeicherzustand, so ergibt sich die in Bild A9 dargestellte Kennlinie Q_{min}. Zusätzlich ist der Speicher in die Betrachtung zu intergieren. Hierdurch ergibt sich die parallel verschobene Gerade Q_{max}. Diese gibt die maximal zu erzeugende Energie bis zu einem Intervall an, ohne dass eine Überladung des Speichers erfolgt. Der von beiden Geraden eingeschlossene Bereich stellt den Handlungsspielraum für die Fahrplanerstellung dar. Die Betrachtung kann analog für den Gesamtelektroenergiebedarf durchgeführt werden, wodurch sich die Kennlinien E_{min} und E_{max} ergeben. Für den Fall eines fehlenden Speichers (Stromnetzanschluss) ist die minimal und maximal zu erzeugende Energie identisch.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

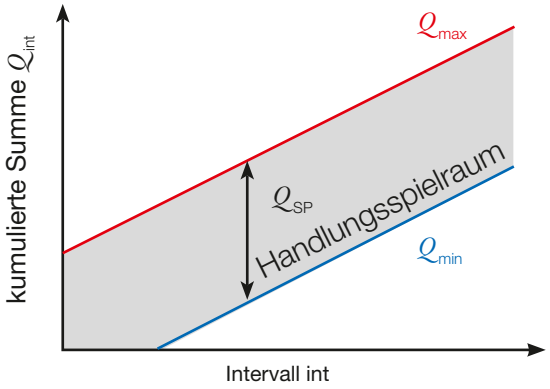


Bild A9: Grundlage Fahrplanerstellung am Beispiel Wärmebedarf

Fahrplanerstellung Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss
Die Fahrplanerstellung für die Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss ist durch fest vorgegebene Wirkungsgrade geprägt. Hierdurch ergibt sich eine gegenseitige Abhängigkeit bei der Fahrplanerstellung zwischen dem Wärme- und Elektrizitätsbedarf. Diese führt dazu, dass der Fahrplan des BHKWs von der PV-Einspeisung bzw. dem Fahrplan der Direktheizung abhängig gemacht werden muss. Ziel für die durch das BHKW zu erzeugende Elektro- (E_{min}) und Wärmeenergie (Q_{min}) muss daher sein, dass diese dem Wirkungsgradverhältnis elektrisch zu thermisch entspricht. Sollte das Verhältnis Elektro- zu Wärmeenergiebedarf größer als das Wirkungsgradverhältnis sein, so wird die Grenze für die maximale zu erzeugende Wärmeenergie verletzt.

Der Betrieb des BHKWs gemäß der dargebotsabhängigen Erzeugung aus PV minimiert gleichzeitig die Einsatzdauer sowie den Energiebezug.

Fahrplanerstellung Energiezelle Haushalt mit Stromnetzanschluss
Im Falle des Stromnetzes wird die Belastung des Stromnetzes im Wesentlich durch die Wärmeversorgung als auch durch die Rückspeisung der PV-Anlage in Schwachlastzeiten geprägt. Durch den Wärmespeicher ergibt sich hierbei die Möglichkeit, die Einspeisung der PV-Anlage in das Netz zu reduzieren, indem die durch die PV-Anlage erzeugte Energie möglichst in Wärmeenergie umgewandelt wird. Dies ist Zielstellung bei der Fahrplanerstellung.

A2.1.4 Berechnungsergebnisse für Energiezelle Haushalt

Basierend auf den gemachten Analysen soll zum einen die technische Machbarkeit als auch die Auswirkungen auf das jeweilige Versorgungsnetze dargestellt werden. Nachfolgend werden die Ergebnisse kurz dargelegt.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss

Eine Versorgung der Energiezelle Haushalt durch einen Gasnetzanschluss mit der im Kapitel 4 dargestellten Lösung ist für Szenario A und B möglich. Dies ist auf den sehr hohen Wärmebedarf zurückzuführen, wofür konventionelle BHKWs auf Basis von Verbrennungsmotoren konzipiert sind. Die Elektrizität für die Elektromobilität in Szenario B wird hauptsächlich durch die größer ausgelegte PV-Anlage bereitgestellt, wie aus dem nur leicht erhöhten Gasbedarfs in Tabelle A4 hervorgeht.

Die Verbesserung des Wärmestandards in Szenario C führt dazu, dass das BHKW als Erzeuger nicht eingesetzt werden kann. Dies liegt an den bereits diskutierten Abhängigkeiten in der Erzeugung. Für Szenario C ist problematisch, dass der Wärmebedarf deutlich zurück geht, der Elektrobedarf jedoch gleich bleibt. Eine Wärmeerzeugung mit dem BHKW führt speziell im Winter dazu, dass der Elektroenergiebedarf durch das BHKW nicht gedeckt werden kann. Wird die PV-Anlage basierend auf dem zu deckenden Elektroenergiebedarf in den Winterwochen ausgelegt, so führt dies zu einem Überangebot an Tagen hoher PV-Einspeisung im Sommer. Szenario C ist somit mit der vorgestellten technologischen Lösung nicht realisierbar.

Im Rahmen der Wochenbetrachtung (Tabelle A6) wurde die PV-Anlage basierend auf dem Strombedarf im Sommer ausgelegt. Hier zeigt sich, dass im Szenario C im Sommer bereits Netzautarkie bei geringem Elektroenergieverbrauch in der betrachteten Woche existiert. Im Winter jedoch können nur bei niedrigem Elektroenergieverbrauch der Gesamtbedarf erfüllt werden, ohne dass ein Speicherüberlauf auftritt.

Tabelle A4: Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss – Jahresbetrachtung für gewählte Technologielösung

Szenario - Jahresbetrachtung	**A**		**B**		**C**	
Elektroenergieverbrauch	niedrig	hoch	niedrig	hoch	niedrig	hoch
Energiebedarf Gas E_{Gas}/kWh/Woche	43.441	45.167	45.380	47.101	-	-
Spitzenleistung $P_{max\,G}$/kW	16	16	16	16	-	-
Mittlere Leistung $\bar{P}_G$/kW	5	5,2	5,2	5,4	-	-
$\bar{P}_G/P_{max\,G}$	0,31	0,33	0,33	0,34	-	-

Alternativ hierfür kann statt dem BHKW eine Brennstoffzelle mit erhöhtem elektrischen Wirkungsgrad und dafür reduziertem thermischen Wirkungsgrad in das System integriert werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle A5 dargestellt.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Tabelle A5: Energiezelle Haushalt mit Gasnetzanschluss – Szenario C bei Verwendung einer Brennstoffzelle

Szenario - Jahresbetrachtung	**C** h_{el} **= 45 %,** h_{th} **= 45 %**	
Elektroenergieverbrauch	niedrig	hoch
Energiebedarf Gas E_{Gas}/kWh/Woche	12.204	14.029
Spitzenleistung $P_{max\,G}$/kW	8,9	8,9
Mittlere Leistung $\bar{P}_G$/kW	1,4	1,6
$\bar{P}_G/P_{max\,G}$	0,16	0,18

Tabelle A6: Zelle mit Gasnetzanschluss – Wochenbetrachtung für gewählte Technologielösung

	Szenario – Wochen-betrachtung	**A**		**B**		**C**	
	Elektroenergie-verbrauch	niedrig	hoch	niedrig	hoch	niedrig	hoch
Winter	Energiebedarf Gas E_{Gas}/kWh/Woche	1.762	1.818	1.820	1.870	442	-
	Spitzenleistung $P_{max\,G}$/kW	16	16	16	16	9	-
	Mittlere Leistung P_G/kW	10,5	10,8	10,8	11,1	2,63	-
	$\bar{P}_G/P_{max\,G}$	0,66	0,68	0,68	0,69	0,29	-
Sommer	Energiebedarf Gas E_{Gas}/kWh/Woche	5	19	9	20	0	6
	Spitzenleistung $P_{max\,G}$/kW	2	2	2	2	0	2
	Mittlere Leistung P_G/kW	0,03	0,113	0,053	0,116	0	0,35
	$\bar{P}_G/P_{max\,G}$	0,015	0,0565	0,0265	0,058	-	0,175

Tabelle A4 und Tabelle A6 geben Rückschlüsse auf die Auswirkungen einer Versorgung der Haushaltszelle über einen Gasnetzanschluss. Von besonderem Interesse ist hier der Unterschied zwischen Sommer und Winter. Im Sommer reduziert sich sowohl die Spitzenleistung als auch die mittlere Leistung deutlich. Da insbesondere die mittlere Leistung gegen null tendiert, kann man davon ausgehen, dass durch eine optimierte Dimensionierung der Speicher im Sommer Netzautarkie erreicht werden kann.

Benötigt wird das Gasnetz insbesondere im Winter. Die mittlere Leistung ist sehr hoch in Bezug auf die Spitzenleistung. Daraus lässt sich schließen, dass sich eine sehr hohe Gleichzeitigkeit für den Anschluss von Haushaltszellen an das Gasnetz ergibt.

Die Spitzenleistung wird vorgegeben durch die Winterwochen. Sie ist jedoch für das Gasnetz unkritisch.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Zelle mit Stromnetzanschluss

Die technische Realisierung der Versorgung einer HauZelle durch einen Stromnetzanschluss ist bereits seit mehreren Jahrzehnten Stand der Technik. Unabhängig vom betrachteten Szenario mit den gegebenen Randbedingungen ist die Realisierung aufgrund der Möglichkeit des bidirektionalen Leistungsflusses im Stromnetz unproblematisch.

Die Berechnungen für die HauZelle mit Stromnetzanschluss erfolgten unter der Randbedingung, dass die PV-Anlage gleich groß bleibt. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erhöht.

Anhand der Ergebnisse in Tabelle A7 und Tabelle A8 ist ersichtlich, dass der Energiebezug durch die Elektromobilität deutlich um ca. 30 % zunimmt. Dies führt auch zu einer Erhöhung der Spitzenleistung für den Strombezug bei niedrigem Elektroenergieverbrauch. Bei hohem Elektroenergiebezug ist jedoch keine Auswirkung ersichtlich, was darauf schließen lässt, dass es zu keinem gleichzeitigen hohen Verbrauch und einer Ladung der Elektrofahrzeuge kommt.

Von hoher Bedeutung für die Interpretation der Ergebnisse ist der maximale Beitrag der Wärmepumpe an der Spitzenleistung. Für den hohen Wärmeverbrauch bei Gebäuden nach WSVO 77 beträgt die maximale thermische Leistung ca. $P_{\text{th max}}$ = 10,5 kW, wodurch sich eine elektrische Spitzenleistung von 2,32 kW ergibt. Betrachtet man in diesem Kontext die maximalen Verbrauchsspitzen gemäß Kapitel 4, so zeigt sich, dass sich die Spitzenleistung durch die Überlagerung von maximaler Wärmeerzeugung (Wärmepumpe) und einer Spitze im Grundverbrauch ergibt. Dies erfolgt in den Winterwochen, in denen die Wärmepumpe fast durchgängig in Betrieb ist.

Tabelle A7: Zelle mit Stromnetzanschluss - Jahresbetrachtung

Szenario – Jahresbetrachtung	**A**		**B**		**C**	
Elektroenergieverbrauch	niedrig	hoch	niedrig	hoch	niedrig	hoch
Energiebezug Strom $E_{\text{el bez}}$/kWh/a	8.723	10.621	11.480	13.384	5.529	7.309
Einspeisung Strom $E_{\text{el einsp}}$/kWh/a	4.474	3.823	4.476	3.830	5.607	4.837
Spitzenleistung Bezug $P_{\text{max E bez}}$/kW	6,5	10,1	8,4	10,1	6,9	10,8
Spitzenleistung Einspeisung $P_{\text{max E einsp}}$/kW	10	10	10	9,8	10	10

Im Szenario C reduzieren sich der Wärmebedarf und damit auch der Energiebezug aus dem Stromnetz deutlich. Gleichzeitig steigt die PV-Einspeisung an. Die Spitzenleistung bei niedrigem Elektroenergieverbrauch

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

wird durch den veränderten Wärmelastgang reduziert. Bei hohem Grundverbrauch bleibt dieser in etwa konstant.

Tabelle A8: Zelle mit Stromnetzanschluss - Wochenbetrachtung

	Szenario – Wochen-betrachtung	**A**		**B**		**C**	
	Elektroenergiever-brauch	niedrig	hoch	niedrig	hoch	niedrig	hoch
Winter	Energiebezug Strom $E_{el\ bez}$/kWh/a	414	461	467	521	177	230
	Einspeisung Strom $E_{el\ einsp}$/kWh/a	1	1	1	1	1	1
	Spitzenleistung Bezug $P_{max\ E\ bez}$/kW	4,9	7,9	7,6	8,2	5,8	7,9
	Spitzenleistung Ein-speisung $P_{max\ E\ einsp}$/kW	1	1	1,1	0,9	1,1	0,8
Sommer	Energiebezug Strom $E_{el\ bez}$/kWh/a	23	52	76	105	75	104
	Einspeisung Strom $E_{el\ einsp}$/kWh/a	268	237	268	237	271	239
	Spitzenleistung Bezug $P_{max\ E\ bez}$/kW	0,8	6,2	4,1	6,2	4,1	6,2
	Spitzenleistung Ein-speisung $P_{max\ E\ einsp}$/kW	7,6	7,4	7,9	7,3	7,9	7,2

Abschließend sind die Ergebnisse noch in Bezug auf die Gleichzeitigkeit bei der Betrachtung mehrerer Zellen zu bewerten. Die Wärmeversorgung ist in diesem Fall durch einen sehr hohen Gleichzeitigkeitsfaktor geprägt, da das Heizungssystem im Winter fast durchgängig in Betrieb ist. Eine Reduktion durch PV-Einspeisung ist nicht gegeben.

A2.2 Gewerbe-Handel-Dienstleistungs-Zelle

Gemäß der Energiezelle Haushalt wird im Folgenden der Zellulare Ansatz für die Bereiche Gewerbe, Handel und Dienstleistung (Energiezelle GHD) untersucht. Dabei sollen dieselben Randbedingungen eingehalten werden, die auch als Grundlage für die Haushaltszelle angesetzt wurden. Die einzelne Zelle soll so versorgt werden, dass keine überschüssige Energie (bspw. in Form von Wärme) nach außen an andere Zellen abgegeben werden muss. Daher ist es von zentraler Bedeutung die Versorgung der Zelle an ihrem spezifischen Verbrauch zu orientieren.

Das Versorgungsfeld im Bereich der Energiezelle GHD ist weit gestreut und kann daher nicht pauschalisiert werden. Im Bereich des Gewerbes ist der Energieverbrauch neben der Größe auch sehr stark von der Art des

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Betriebes abhängig. Gleiches gilt für den Bereich der Dienstleistungen. Für beide Bereiche kann nicht eindeutig und pauschal ein Versorgungsszenario angenommen werden, da deutliche Unterschiede im Energiebedarf vorliegen können. Aus diesen Gründen wird im Bereich der Energiezelle GHD auf eine ausführliche Analyse für Gewerbe- und Dienstleistungsunternehmen verzichtet, da hierfür spezifische Versorgungskonzepte zur Bedarfsdeckung entwickelt werden müssen. Ansätze für den Energiebedarf werden jedoch nachfolgend vorgestellt.

Im Bereich der Energiezelle GHD soll an dieser Stelle die Versorgung des Handels genauer untersucht werden, da in diesem Sektor pauschalere Annahmen für einen Energiebedarf getroffen werden können. Der Bedarf hängt auch in diesem Bereich von der Größe des Handelsunternehmens sowie der Art des Unternehmens (Food, Non-Food) ab, jedoch lassen sich die grundsätzlichen Auslegungen auf die unterschiedlichen Sparten übertragen.

A2.2.1 Lastgänge

Für die Abschätzung der jeweiligen Bedarfe der Teilnehmer innerhalb der Energiezelle GHD sind die jeweiligen Lastgänge differenziert zu betrachten. Dabei muss zwischen Gewerbe, Handel und Dienstleistung unterschieden werden. Gerade im Bereich der Gewerbe- und Dienstleistungsunternehmen muss auch zwischen den einzelnen Sparten und häufig auch unternehmensspezifisch unterschieden werden, da der Energiebedarf der Unternehmen sehr unterschiedlich ist.

Lastgang Gewerbe

Als allgemeiner Stromlastgang für ein Gewerbeunternehmen kann der Lastverlauf gemäß des Standardlastprofils G0 der BDEW [1] angenommen werden. Dieses repräsentiert das allgemeine Gewerbe und kann gewerbespezifisch gemäß dem jährlichen Verbrauch angepasst werden. Auf eine Verallgemeinerung, wie sie nachfolgend für einen Supermarkt durchgeführt wird, wird an dieser Stelle, wie beschrieben, verzichtet, da keine allgemeingültigen Aussagen für Gewerbeunternehmen getroffen werden können. Die Verbrauchswerte für einzelne Unternehmen sind sehr unterschiedlich und lassen daher keinen allgemeingültigen Rückschluss auf ein Versorgungskonzept bzw. eine zellulare Versorgungsstruktur zu. Das nachfolgende Bild A10 zeigt den grundsätzlichen Lastgang für den Bereich Strom für Gewerbeunternehmen nach BDEW unterschieden nach Sommer (S), Winter (W) und Übergangszeit (Ü) [1].

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

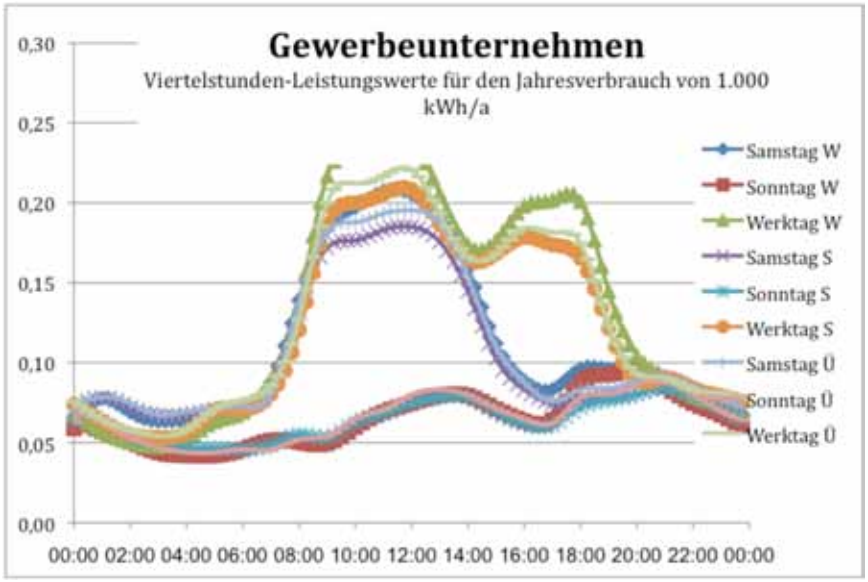


Bild A10: Standardlastprofil G0 für Gewerbeunternehmen [1]

Der Wärmelastgang kann nicht als Standardprofil vorgegeben werden, da in dem Bereich des Wärmebedarfs große Unterschiede gerade auch bezüglich der Spitzenlastzeiten auftreten. Hier müssen unternehmensspezifische Analysen durchgeführt werden um eine genaue Aussage zur Versorgung treffen zu können, die im Rahmen dieser Studie nicht vorgesehen sind.

Lastgang Dienstleistung

Für Dienstleistungsunternehmen kann das Standardlastprofil G1 nach BDEW [1] als Grundlage dienen. Das Standardlastprofil G1 gilt für Gewerbeunternehmen mit einer Arbeitszeit von 8-18Uhr, ist jedoch nach Beschreibung z.B. für Büros, Arztpraxen, Werkstätten, Verwaltungseinrichtungen vorgesehen. Demnach ist es sinnvoll dieses für die einzelnen Dienstleistungsunternehmen vorzusehen. Auch bei den Dienstleistungseinrichtungen besteht ein großer Unterschied bezüglich des Energiebedarfs. Dieser hängt stark von der Dienstleistungsart ab. Aus diesem Grund kann auch für den Bereich der Dienstleistungen keine Verallgemeinerung bezüglich des zellularen Energieversorgungsansatzes getroffen werden. Die Art der Gebäudenutzung (privat, mehrere Dienstleistungsunternehmen, etc.) spielt auch eine entscheidende Rolle für die Energieversorgung über den Zellularen Ansatz. So kann beispielsweise bei Mehrfachnutzung eines Gebäudes durch unterschiedliche Dienstleistungsunternehmen nicht die gesamte Dachfläche für eine Photovoltaikanlage eines einzelnen Dienstleistungsunternehmens genutzt werden, sodass hierbei die Versorgung der einzelnen Unternehmen nicht klar abgegrenzt werden kann. Das entsprechende für Dienstleistungsunternehmen nutzbare Standardlastprofil für Strom, unterschieden nach Sommer (S), Winter (W) und Übergangszeit (Ü), kann Bild A11 entnommen werden und entsprechend des Jahresverbrauchs als Grundlage für den jeweiligen zellularen Versorgungsansatz dienen.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

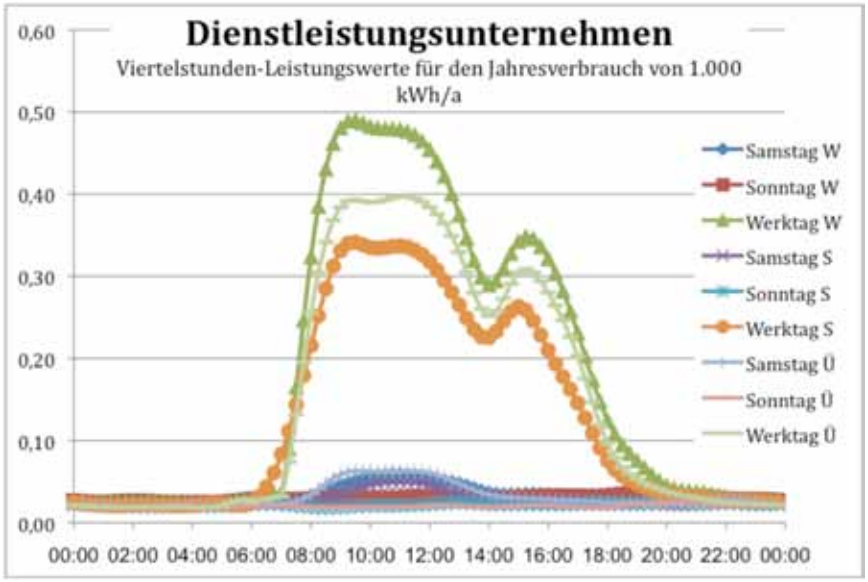


Bild A11: Standardlastprofil G1 für Dienstleistungsunternehmen [1]

Auch für Dienstleistungsunternehmen ist es nicht möglich einen Lastgang des Wärmebedarfs nachzubilden, da, wie auch bei Gewerbeunternehmen, große Unterschiede in Bezug auf Wärmebedarf und Spitzenlastzeiten bestehen.

Lastgang Handel

Repräsentativ für den Bereich Handel soll ein Supermarkt angenommen werden, der im Folgenden auch für die weiteren Analysen der Energiezelle GHD herangezogen werden soll.

Um den Lastverlauf eines Supermarktes nachzubilden, wurden ebenfalls die BDEW Standardlastprofile zugrunde gelegt. Hierbei wurde für den Supermarkt das Standardlastprofil G4 Laden/Friseur genutzt und entsprechend der Größe des Supermarktes, die hier als Annahme getroffen wurde, angepasst. Hierzu wurde der Energiebedarf, der nachfolgend in Abschnitt A2.2.2 genauer betrachtet wird, mit den entsprechenden Werten aus den BDEW Standardlastprofilen verrechnet. Somit ergibt sich eine realitätsgerechte Verteilung des Strombedarfs für den entsprechenden Supermarkt mit einer Grundfläche von 800 m². Das nachfolgende zeigt den entsprechenden Lastgang unterschieden nach Jahreszeiten (W: Winter; S: Sommer; Ü: Übergangszeit).

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

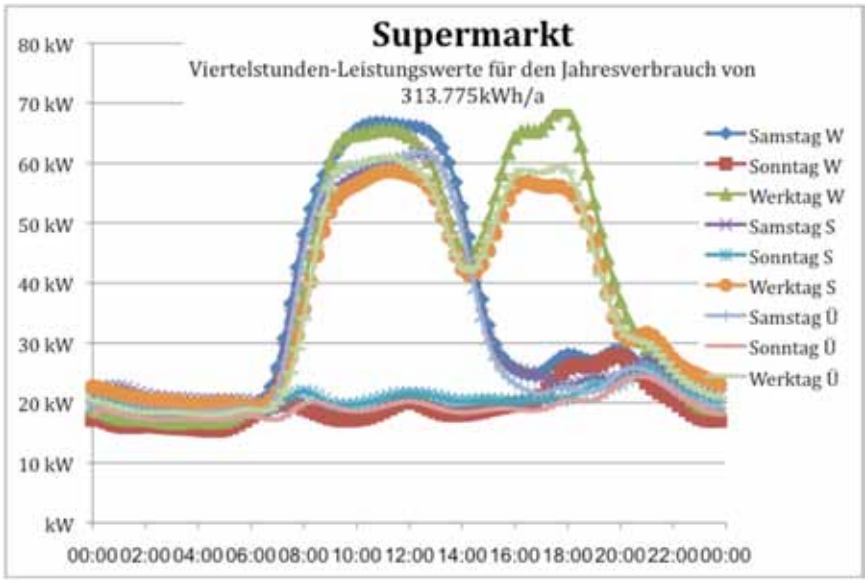


Bild A12: Standardlastprofil G4 für einen Supermarkt [1]

Ein expliziter Wärmelastgang für einen Supermarkt kann an dieser Stelle ebenfalls nicht angegeben werden, jedoch kann anhand des Wärmebedarfs eines Supermarktes eine Analyse zur Bedarfsdeckung durchgeführt werden. Der Wärmebedarf in einem Supermarkt steigt in den Wintermonaten gemäß den Erwartungen an und muss dementsprechend in der weiteren Analyse berücksichtigt werden.

A2.2.2 Energiebedarf eines Supermarktes

Grundsätzlich muss der Energiebedarf zwischen dem der klassischen Einzelhändler (bis 300 m²) und dem der Supermärkte (bis 2000 m² Food/Non-Food) unterschieden werden.

Wie bereits beschrieben soll im Folgenden der zellulare Versorgungsansatz für einen Supermarkt mit einer Grundfläche von 800 m² untersucht werden.

Für den elektrischen Energiebedarf des Supermarktes gibt es unterschiedliche Annahmen die verschiedenen Analysen bestehender Supermärkte entnommen werden können und nachfolgend dargestellt sind.

Strombedarf Supermärkte über 300 m²:

- 375 kWh/m²a [2]
- 238 kWh/m²a [3]
- 344 – 477 kWh/m²a [4]
- 200 – 330 kWh/m²a [5]
- 356 – 536 kWh/m²a [6]

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Selbst die Verbrauchswerte der in den Studien aufgeführten Supermärkte weisen eine deutliche Streuung auf. Es müssen daher für die Ermittlung des realen Energiebedarfs geeignete Annahmen getroffen werden, um die Versorgung des Supermarktes analysieren zu können. Als ein sinnvoller Ansatz werden die Zahlen des Bundesamtes für Bauwesen und Bauordnung angesehen. Dort sind Benchmarks für die Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden aufgestellt worden, wodurch eine Vergleichbarkeit geschaffen wird. Da dieser Wert auch nahe dem Mittelwert aller aufgeführten Stromverbräuche für Supermärkte liegt, wird dieser im Folgenden weiter verwendet.

Im Bereich des Wärmebedarfs von Supermärkten über 300m² liegen deutlich weniger Daten vor. Auch hier soll aber der Wert des Bundesamtes für Bauwesen und Bauordnung als Referenzwert dienen, um einen eindeutigen Vergleichswert heranzuziehen. Der Wärmebedarf bei einem Supermarkt über 300 m² liegt bei 135 kWh/m²a. [2]

Als zusätzlicher Energiebedarf muss der Bereich der Elektromobilität betrachtet werden. Dabei sollen keine Ladestationen für Kunden berücksichtigt werden, jedoch sind diese für die Mitarbeiter vorzusehen. Dabei soll, wie auch in der Energiezelle Haushalt, ein täglicher Fahrweg von 50km/Mitarbeiter vorgesehen werden bei einem spezifischen Verbrauch von 15 kWh/100km und Mitarbeiter. Der Ladezeitraum wird auf Grund der Dienstzeiten pauschal von 8:00-16:00 Uhr vorgesehen, da hierbei die größten Auswirkungen in Bezug auf die Spitzenlast zu erwarten sind. Aus den Annahmen resultiert ein Energiebedarf von 2755 kWh/a und Mitarbeiter in Bezug auf die Ladung des Elektrofahrzeugs am Arbeitsplatz.

In dem nachfolgenden Beispiel soll ein typischer Supermarkt analysiert werden der eine Grundfläche von 800 m² und einen Parkplatz mit einer Fläche von ebenfalls 800 m² aufweist. Dabei werden folgende Versorgungsszenarien analysiert: vollständig autarke Energiezelle GHD; Energiezelle GHD mit elektrischem Anschluss; Energiezelle GHD mit Gasnetzanschluss.

Aus den zuvor dargestellten Zusammenhängen ergibt sich der nachfolgend aufgelistete jährliche Bedarf für einen Supermarkt mit einer Fläche von 800 m²:

- Strombedarf: 313.775 kWh
- Wärmebedarf: 108.000 kWh

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Tabelle A9: Energiebedarf von Energiezelle GHD

Bedarf	Energiebedarf heute	Perspektive: Energiebedarf
Wärme	135 kWh/m² a	135 kWh/m² a
Elektrizität	200 … 536 kWh/m² a	368 kWh/m² a
Mobilität	5.000 … 12.000 km/a Mitarbeiter	5.000 … 12.000 km/a Mitarbeiter

A2.3 Versorgungsszenarien

A2.3.1 Autarke Energiezelle GHD

Soll die Energiebereitstellung für die Energiezelle GHD autark erfolgen, so können die in Tabelle 27 dargestellten Technologien eingesetzt werden, wobei nicht abzusehende technologische Neuentwicklungen zu anderen Versorgungskonzepten führen können.

Tabelle A10: Ausstattung Energiezelle GHD – autarke Versorgung

Wandler	Technologien	Potenziale
Energie zuführende Wandler	WKA PV-Anlage Solarthermie	zu teuer Einsatzbereit Einsatzbereit
Energie konditionierende Wandler	Gasturbine Elektrolyseur	Einsatzbereit hoher Entwicklungsaufwand
Energie abführende Wandler	elektr. Wärmepumpe Direktheizung	Einsatzbereit Einsatzbereit
Speicher	thermischer Speicher Batterie Wasserstoffspeicher	Einsatzbereit zu teuer hoher Entwicklungsaufwand

Die Analysen haben jedoch gezeigt, dass eine vollständig autarke Lösung nicht möglich ist. Die zuführenden Wandler (WKA, PV-Anlage und Solarthermie) stellen nicht genügend Energie bereit, um eine autarke Versorgung der Energiezelle GHD vollständig zu gewährleisten.

Nachstehend ist der Energieflussplan mit allen zur Verfügung stehenden Optionen dargestellt (Bild A13), die theoretisch für eine autarke Energieversorgung zur Verfügung stehen würden. Hierbei wurden neben der PV-Anlage auch eine solarthermische Anlage sowie drei kleine Windkraftanlagen vorgesehen. Damit wurde die gesamte zur Verfügung stehende Fläche des Supermarktes rechnerisch vollkommen ausgenutzt.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

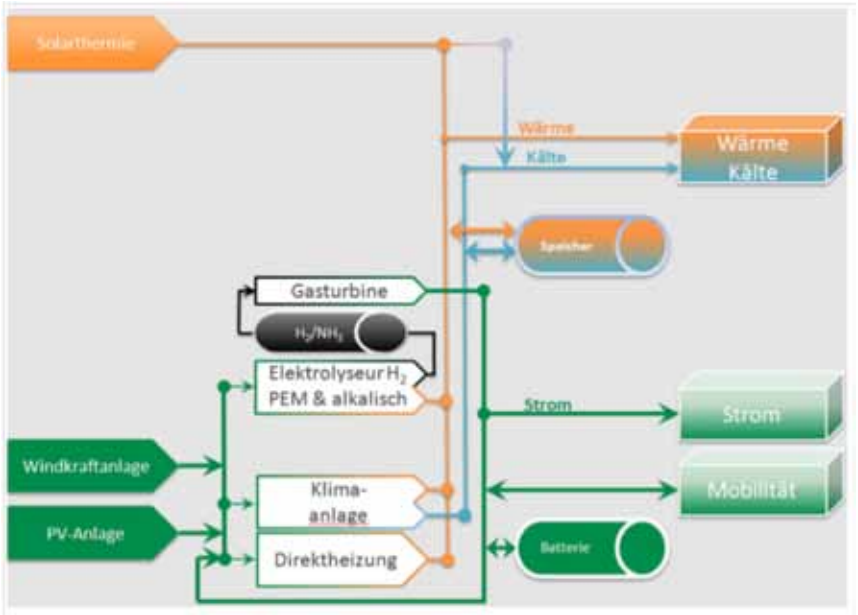


Bild A13: Energieflussplan autarke Versorgung mit allen Optionen

Gemäß dem Bedarf wurden entsprechende Leistungen für Klimaanlage und Direktheizung vorgesehen. Die zusätzliche solarthermische Anlage wurde mit einer Fläche von 100 m² angesetzt, wodurch sich jedoch die nutzbare Fläche für die geplante Photovoltaikanlage auf 1100 m² im Vergleich zu allen weiteren Versorgungskonzepten (800m² Parkplatzfläche+ 400 m² Dachfläche) reduziert. Es ergibt sich damit im Durschnitt eine Spitzenleistung von 137kW_P bei einem Energieertrag von 105.000 kWh/a für eine Photovoltaikanlage dieser Größe.

Die zusätzlich installierte solarthermische Anlage mit einer Fläche von 100 m² liefert eine Energiemenge von 60.000 kWh/a. Damit ist es jedoch nicht möglich den Wärmebedarf des Supermarktes ausreichend zu decken. Zwar könnte die Fläche für die solarthermische Anlage vergrößert werden, jedoch würde dies zu einer weiteren Verkleinerung der Photovoltaikanlage führen, was wiederum nicht zielführend ist. Die Stromerzeugung über Windkraftanlagen ist auf Grund der niedrigen Nennwindgeschwindigkeiten und der Verwirbelungen, die in Nabenhöhe der Kleinwindkraftanlagen stark ausgeprägt sind, nur bedingt technisch sinnvoll. Der Energiebedarf an Strom kann, wie auch der Wärmebedarf, nicht über ein rein autarkes Versorgungskonzept erfolgen. Die Erzeugungsleistung reicht für die Bedarfsdeckung nicht aus.

Die maximal mögliche Versorgungsstruktur kann dem nachfolgenden Bild A14 entnommen werden.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

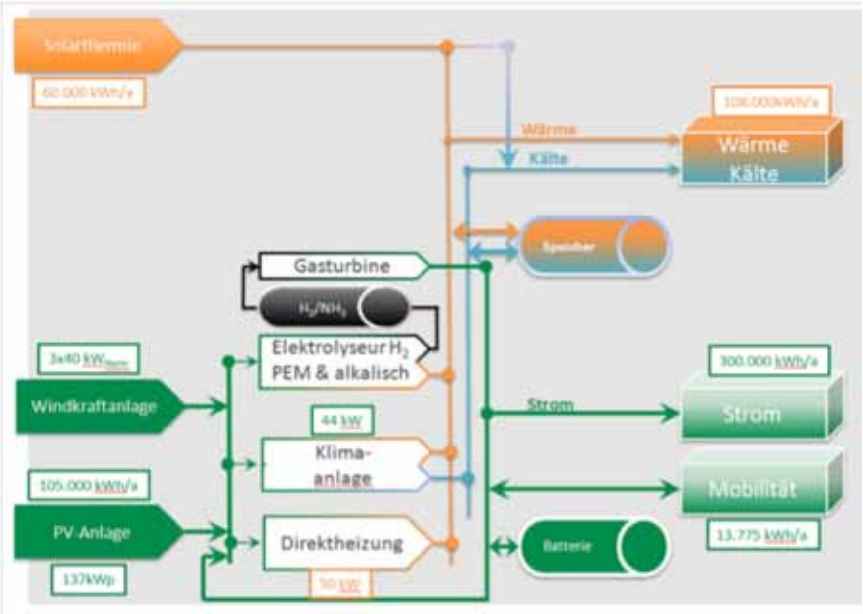


Bild A14: Energieflussplan autarke Versorgung mit maximaler Grundausstattung

Da die autarke Versorgungsstruktur in der Energiezelle GHD allein nicht möglich ist, ist immer ein Strom- oder Gasanschluss vorzusehen. Eine weitere Alternative könnte sich durch die Verknüpfung mit der Energiezelle Industrie oder der Energiezelle Haushalt ergeben. Mögliche Energieüberschüsse in den weiteren Zellen könnten dann in der Energiezelle GHD genutzt werden, jedoch muss auch hierfür ein Netz zur Verfügung stehen. So könnte bspw. der Wärmebedarf der Energiezelle GHD aus den Überschüssen der übrigen Zellen gedeckt werden. Diese Zusammenhänge müssen nachfolgend weiter untersucht werden und sind nicht Bestandteil der hier durchgeführten Untersuchungen.

A2.3.2 Energiezelle GHD mit elektrischem Netzanschluss

In diesem Versorgungsszenario soll die Energiezelle GHD ausschließlich an das Strom-Netz angeschlossen werden. Neben dem Strom-Anschluss soll zudem eine regenerative Versorgung der Zelle vorgesehen werden, um den Bedarf aus dem Strom-Netz möglichst gering zu halten.

Die Energiebereitstellung für die Energiezelle GHD mit elektrischem Netzanschluss ist beispielsweise über die in der Tabelle A11 aufgelisteten Technologien möglich. Hierbei wurden nur diejenigen betrachtet, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zum Einsatz kommen.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Tabelle A11: Ausstattung Energiezelle GHD mit elektrischem Netzanschluss

Wandler	Technologien	Potenziale
Energie zuführende Wandler	WKA PV-Anlage Solarthermie	zu teuer Einsatzbereit Einsatzbereit
Energie konditionierende Wandler	Gasturbine Elektrolyseur	Einsatzbereit hoher Entwicklungsaufwand
Energie abführende Wandler	elektr. Wärmepumpe Direktheizung	Einsatzbereit Einsatzbereit
Speicher	thermischer Speicher Batterie Wasserstoffspeicher	Einsatzbereit zu teuer hoher Entwicklungsaufwand

In Bild A15 sind die möglichen einsetzbaren Technologien aufgezeigt, wobei auch hier, wie auch für die Technologien in der Energiezelle Haushalt, teilweise ein erheblicher Entwicklungsaufwand notwendig ist, um einen Einsatz zu ermöglichen. Wie auch für die Energiezelle Haushalt liegen die Kosten für Klein-WKA, die auch heute schon verfügbar sind, für einen flächendeckenden Einsatz deutlich zu hoch.

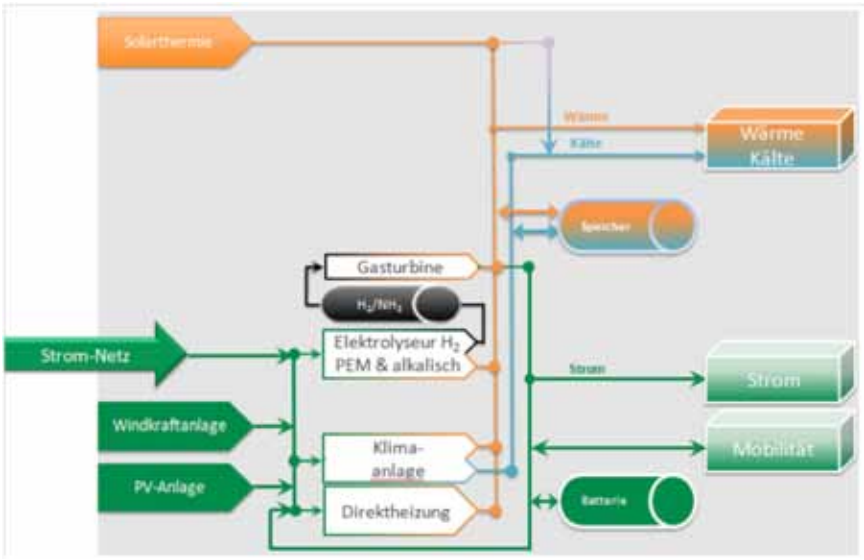


Bild A15: Energieflussplan mit allen Optionen für eine Versorgung der Energiezelle GHD mit elektrischem Netzanschluss

In dem hier vorliegenden Fall, der Versorgung eines Supermarktes, ist es jedoch nicht sinnvoll einen Elektrolyseur zu betreiben, um mit dem so gewonnenen Gas eine Gasturbine anzutreiben. Im Gegensatz zu der Versorgung der Zelle mit einem Gasnetzanschluss wird bei dem Versorgungs-

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

szenario mit einem elektrischen Netzanschluss der Wärme-/Kältebedarf vollständig über eine Direktheizung und eine Klimaanlage gedeckt. Aus den Berechnungen und Annahmen für die Bedarfsdeckung ergeben sich folgende Leistungen: Klimaanlage mit 44kW, Direktheizung mit 50kW. Die regenerative Versorgung der Zelle erfolgt für dieses Betrachtungsszenario allein über eine Photovoltaikanlage mit einer Fläche von 1200 m². Dabei ergibt sich die gesamte Fläche aus der Annahme, dass die halbe Dachfläche sowie die geplante Überdachung des Parkplatzes mit Photovoltaik-Modulen versehen werden. Somit ergibt sich eine lieferbare Energie von 123.000 kWh/a bei einer Spitzenleistung von 150kWp. Eine solarthermische Anlage ist nicht vorgesehen, da die Wärmebedarfsdeckung über eine Direktheizung erfolgen kann. Hiermit können tendenziell höhere Gesamtwirkungsgrade erzielt werden als mit einer solarthermischen Anlage. Resultierend aus dem Bedarf und der notwendigen Leistung die innerhalb des Supermarktes notwendig sind, sind die Energiespeicher ausgelegt. Es wurden dazu eine Batterieanlage mit einer Kapazität von 450 kWh sowie ein Wärmespeicher mit einer Speicherkapazität von 464 kWh vorgesehen. Bei der Auslegung dieser Speicher wurde berücksichtigt, dass auch in den Zeiträumen ohne Sonneneinstrahlung ausreichend Energie zur Verfügung steht, ohne dass eine unmittelbare Versorgung aus dem Stromnetz erfolgen muss.

Dennoch muss der elektrische Netzanschluss so ausgelegt werden, dass der gesamte Bedarf der Energiezelle GHD zu jedem Zeitpunkt gedeckt werden kann. Gemäß den Rechnungen ergeben sich für die Spitzenleistung des elektrischen Netzanschlusses ein Wert von 120kW bei einer jährlich benötigen Energie von 298.775 kWh. Der resultierende Energieflussplan zur Versorgung der Energiezelle GHD am Beispiel eines Supermarktes aus dem Stromnetz kann Bild A16 entnommen werden.

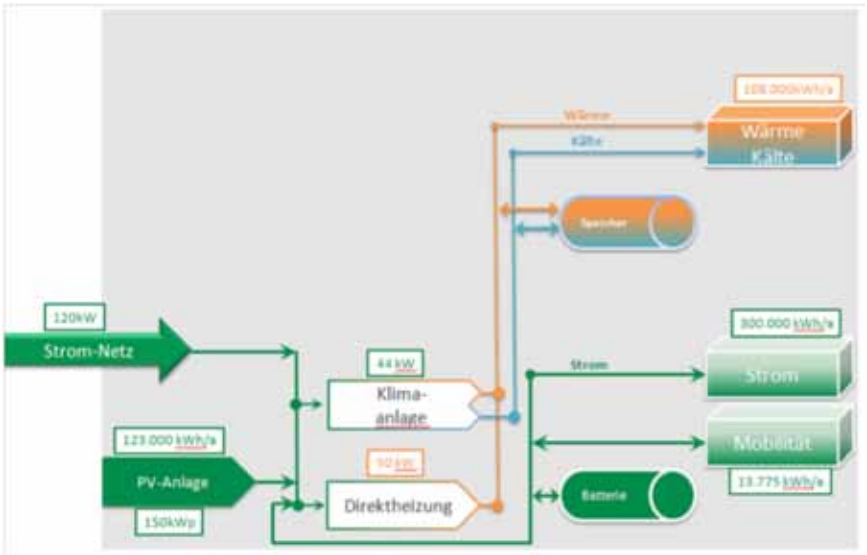


Bild A16: Energieflussplan der Beispielausstattung für eine Versorgung der Energiezelle GHD mit elektrischem Netzanschluss

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Erfordernisse an das Stromnetz

Durch den Einsatz einer Klimaanlage zur Kühlung und einer Direktheizung zur Wärmeerzeugung, die neben der Mobilität einen erheblichen Anteil an der Last der GHD Zelle aufweisen, wird die Belastung des Stromnetzes deutlich zunehmen. Aber auch ggf. mögliche Rückspeisungen durch die PV-Anlagen müssen vom Netz aufgenommen werden können, so dass auch hierdurch eine stärkere Belastung des Netzes gegeben ist. Der Gleichzeitigkeitsfaktor liegt, wie die Untersuchungen zeigen, im Bereich der Energiezelle GHD deutlich über dem heutigen und nahe 1.

A2.3.3 Energiezelle GHD mit Gasnetzanschluss

In diesem Versorgungsszenario soll die Energiebereitstellung der Energiezelle GHD ausschließlich über einen Anschluss an das Gasnetz realisiert werden. Neben dem Gasnetzanschluss soll zudem eine regenerative Versorgung der Zelle vorgesehen werden, um den Energiebezug aus dem Gasnetz möglichst gering zu halten.

Die Energiebereitstellung für die Energiezelle GHD mit einem Gasnetzanschluss ist beispielsweise über die in der Tabelle A12 aufgelisteten Technologien möglich. Hierbei wurden nur diejenigen betrachtet, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zum Einsatz kommen.

Tabelle A12: Ausstattung Energiezelle GHD mit Gasnetzanschluss

Wandler	Technologien	Potenziale
Energie zuführende Wandler	WKA PV-Anlage Solarthermie	zu teuer Einsatzbereit Einsatzbereit
Energie konditionierende Wandler	Gasturbine Elektrolyseur BHKW Brennwertkessel	Einsatzbereit hoher Entwicklungsaufwand Einsatzbereit Einsatzbereit
Energie abführende Wandler	elektr. Wärmepumpe Direktheizung	Einsatzbereit Einsatzbereit
Speicher	thermischer Speicher Batterie Wasserstoffspeicher	Einsatzbereit zu teuer hoher Entwicklungsaufwand

In Bild A17 sind die jeweiligen einsetzbaren Technologien noch einmal in einem Energieflussplan dargestellt, wobei auch hier wiederum die gleichen Voraussetzungen hinsichtlich der Potenziale, wie bei dem Einsatz in der Energiezelle Haushalt bzw. der Energiezelle GHD mit elektrischem Netzanschluss, zu beachten sind. Einige der aufgeführten Technologien sind jedoch nicht zielführend einsetzbar. Aus diesem Grund wurden auch für die Energiezelle GHD mit Gasnetzanschluss die Analysen nur mit als sinnvoll erachteten Komponenten durchgeführt.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

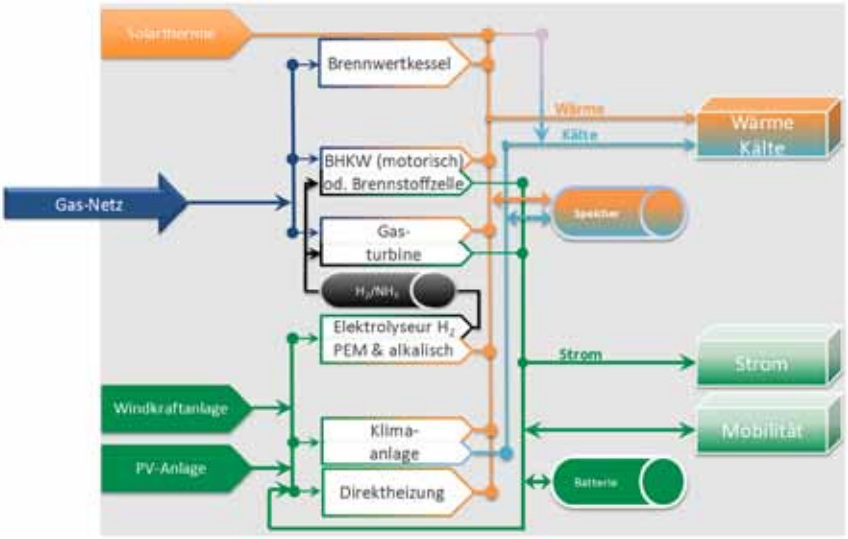


Bild A17: Energieflussplan mit allen Optionen für eine Versorgung der Energiezelle GHD mit Gasnetzanschluss

Aufgrund des Energiebedarfs des Supermarktes ist es mit den zur Verfügung stehenden Technologien und bei alleinigem Gasnetzanschluss, jedoch nur sinnvoll den Wärme-/Kälte- und den Strombedarf über das Gas-Netz und eine PV-Anlage zu decken. Die Kälte wird über eine Klimaanlage erzeugt, Strom und Wärme über das aus dem Gas-Netz gespeiste BHKW. Die Berechnungen haben jedoch gezeigt, dass es mit einem BHKW nicht möglich ist die Energieversorgung der Energiezelle GHD zu realisieren, ohne dass ein Energieüberschuss in der Zelle vorliegt. Wird der Strombedarf vollständig gedeckt, kommt es durch die Eigenschaften des BHKWs zu einem deutlichen Wärmeüberschuss innerhalb der Energiezelle GHD. Die Wärme kann jedoch innerhalb der Energiezelle GHD nicht weiter genutzt werden und muss daher an übrige Zellen abgegeben werden. Aus diesem Grund wurde stattdessen die Versorgung mit einer Brennstoffzelle analysiert, deren elektrischer Wirkungsgrad deutlich über dem thermischen liegt. Als Wirkungsgrade der Energiewandlung wurden 60% elektrischer Wirkungsgrad und 25% thermischer Wirkungsgrad angesetzt. Als gesamte notwendige Leistung der Brennstoffzelle wurde ein Wert von 162kW ermittelt. Die Klimaanlage besitzt eine angenommene Leistung von 44kW.

Da der Wärmedarf vollständig über die Brennstoffzelle, die für die Strombedarfsdeckung notwendig ist, gedeckt werden kann, ist es in dem Versorgungsszenario sinnvoll auf eine solarthermische Anlage zu verzichten. Die PV-Anlage wurde in diesem Fall mit einer Fläche von 1200 m² angesetzt. Dabei ergibt sich die gesamte Fläche aus der Annahme, dass die halbe Dachfläche des Supermarktes sowie die geplante Überdachung des Parkplatzes mit Photovoltaik-Modulen versehen werden. In Bild A18 ist die entsprechend vorgesehene Versorgungssituation dargestellt.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

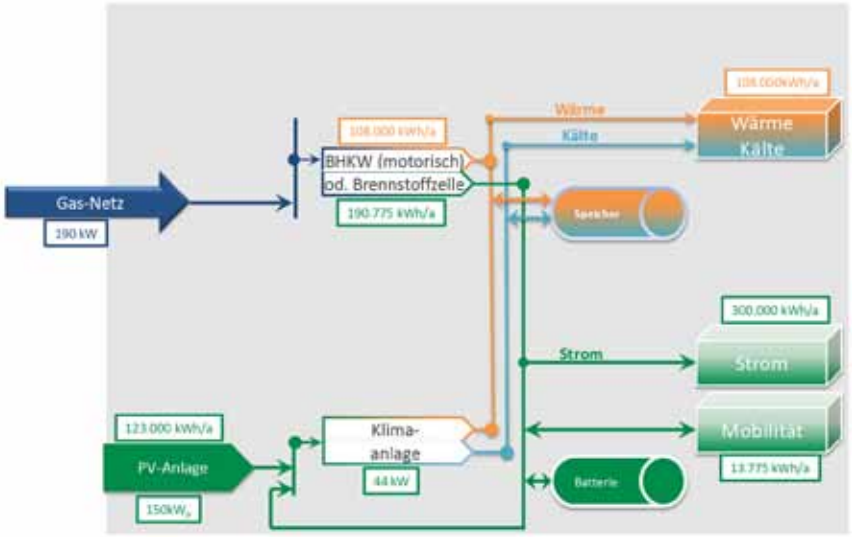


Bild A18: Energieflussplan der Beispielausstattung für eine Versorgung der Energiezelle GHD mit Gasnetzanschluss

Die PV-Anlage mit einer Leistung von 150kW$_p$ übernimmt die Versorgung der Klimaanlage und die Deckung des elektrischen Bedarfs des Supermarktes. Die Energiedifferenz wird über die Brennstoffzelle ausgeglichen. Als Energiespeicher ist sowohl ein Wärme- /Kältespeicher als auch eine Batterieanlage vorgesehen. Diese wurden so dimensioniert, dass eine Versorgung des Supermarktes für bis zu sechs Stunden möglich ist. Ohne eine Batterieanlage ist eine alleinige Versorgung aus dem Gasnetz nicht sinnvoll möglich, da die elektrische Energie der Photovoltaikanlage in diesem Fall zuerst über einen Elektrolyseur in Gas gewandelt das dann dem Gasnetz zugeführt werden müsste. Dieses erscheint nach heutigem Stand der Technik als nicht sinnvoll, sodass in jedem Fall eine Batterieanlage in diesem Versorgungsszenario vorzusehen ist.

Zusammenfassend ergibt sich in diesem Versorgungsszenario ein gesamter Jahresenergiebedarf an Gas, zur Deckung des Energiebedarfs des Supermarktes, von 351.500 kWh/a mit einer Spitzenleistung von 190 kW.

Erfordernisse an das Gasnetz

Die Analysen zeigen, dass sich in diesem Versorgungsszenario die Abnahme aus dem Gasnetz zur Wärme- und Strombedarfsdeckung erhöhen und damit auch die Auslastung des Gasnetzes steigen wird. Eine Rückspeisung aus der Energiezelle GHD ist nicht vorgesehen, da auch keine gasproduzierenden Wandler (Elektrolyseure, etc.) im Rahmen der Beispielausstattung einer Energiezelle GHD vorgesehen sind. Die Gleichzeitigkeit nähert sich auch im Bereich der Versorgung über ein Gasnetz dem Bereich von 1 an.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

A2.4 Literaturverzeichnis

[1] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V..

[2] Bundesamt für Bauwesen und Bauordnung, „Benschmarks für die Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden," 2009.

[3] Wirtschaftskammer Österreich, „Energieeffizienz - Branchenfolder für den Lebensmittelhandel," 2006.

[4] M. Perritsch, „Supermärkte als Energiezentralen. Berichte aus Energie- und Umweltforschung," 2006.

[5] Österreichischer Energiesparverband eta, „Energiekennzahlen und -sparpotetiale im Lebensmitteleinzelhandel," 1996.

[6] G. Becker, „Elektrischer Spitzenlastausgleich in Lebensmittelketten - Strategien zur Verbesserung der Energieeffizienz," 2009.

[7] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Energiekonzept der Bundesregierung, 2010.

[8] BMWi, „Energiedaten: Zahlen und Fakten," 2013. [Online]. Available: http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/gesamtausgabe.

[9] Dickert, J.; Schegner, P.: A time series probabilistic synthetic load curve model for residential customers, IEEE]

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.

Stresemannallee 15
60596 Frankfurt am Main
Telefon: 069 6308-0
E-Mail: service@vde.com
Internet: http://www.vde.com