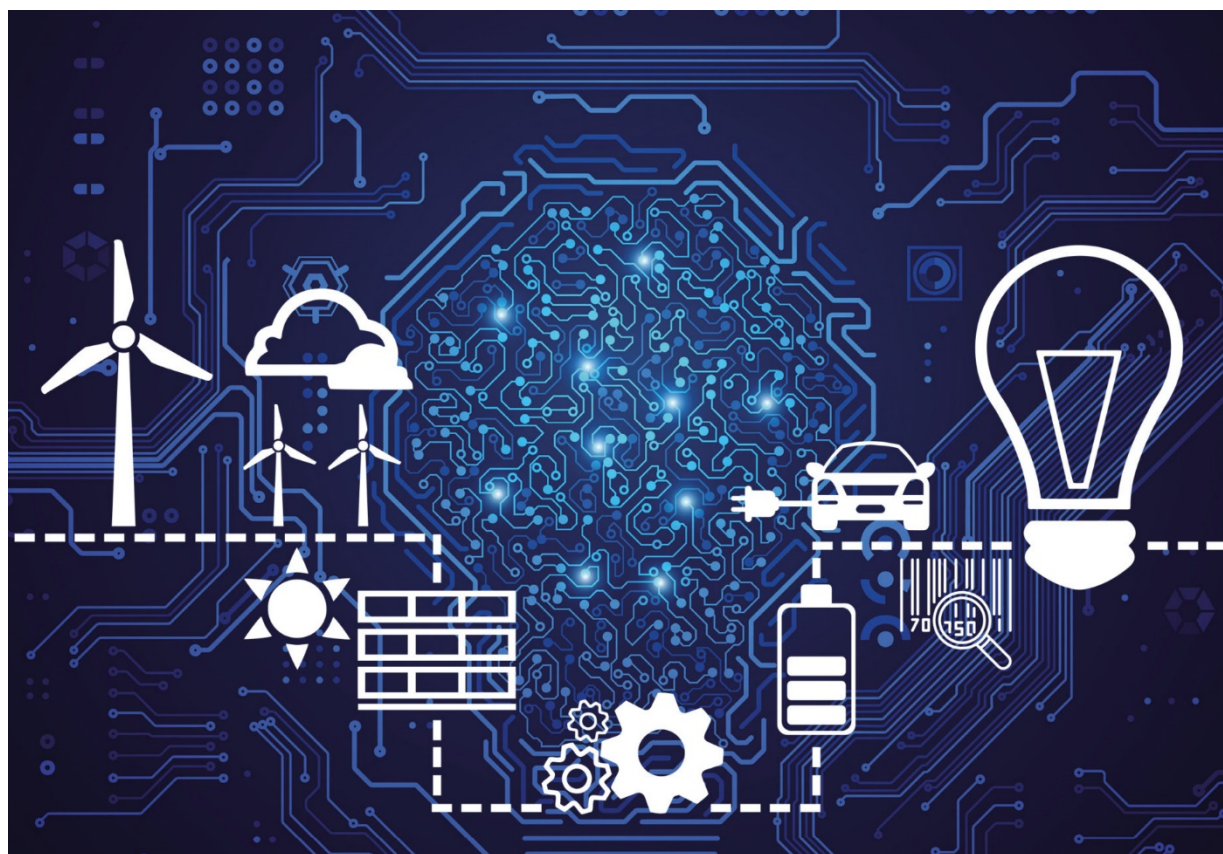




ONLINE-KONGRESS ENERGIE NEU DENKEN


**2. INNOVATIONS
KONGRESS**
ULM
NEU-ULM
2021

6.5.2021

**TECHNISCHE
HOCHSCHULE
ULM**

[www.innosued.de/
innokongress](http://www.innosued.de/innokongress)



Impressum

Herausgeber

Prof. Dr. Marianne von Schwerin
Technische Hochschule Ulm
Prittwitzstr. 10, 89075 Ulm
marianne.vonschwerin@thu.de

Redaktion

Dr. Thomas Aigle
Dr. Katharina Langer

Layout/Gestaltung

Stacheder und Sander, Ulm

Tagungsband

zum 2. Innovationskongress Ulm | Neu-Ulm

am 6. Mai 2021

Inhaltsverzeichnis

Energie neu denken – Notwendiger kommunikativer Wandel in Zeiten des Klimawandels Prof. Dr. Michael Kühl	1
Transport & Mobilität CO2-frei – woher kommt die Energie? Prof. Dr. Werner Tillmetz, André Martin	13
Batterien: Game Changer für die globale Energiewende Daniel Messling, Dr. Stephan Hensel, Prof. Dr. Maximilian Fichtner	23
Gehen Klimaschutz und Wirtschaftswachstum zusammen? Prof. Dr. Roland Koenigsdorff, Laurens Bortfeldt	29
Sektorenübergreifende Priorisierung von Flexibilität zur Vermeidung von Stromnetzengpässen in Redispatch2.0 David E. Langer, Dr. Holger Ruf, Prof. Dr. Georg Kleiser	39
Demonstrationsprojekt „SoLAR“ in Allensbach - Erfolgreiche Energiewende durch intelligente Sektorkopplung Stefan Werner	52
Konzept und Umsetzung eines automationsgestützten Energiemanagements für komplexe Liegenschaften P. Knoll, M. Straßer, Prof- Dr.-Ing. M. Becker	64
Vom Passivhaus zum Sonnenhaus – Umsetzung der Wärme- und Stromwende bei der Wohngebäudesanierung Prof. Dr.-Ing. Gerhard Mengedoh	73

Energie neu denken – Notwendiger kommunikativer Wandel in Zeiten des Klimawandels

Prof. Dr. Michael Kühl

Universität Ulm, Institut für Biochemie und Molekulare Biologie, 89069 Ulm

Abstract

Dem Klimawandel zu begegnen ist eine der größten Herausforderungen der Menschheit. Innovationen im Bereich der Energieversorgung werden einen essentiellen Beitrag bei der Bewältigung dieser Aufgabe leisten müssen. Häufig ist die Diskussion in der Öffentlichkeit zu den Themen Klimawandel und Energiewende allerdings durch teilweise widersprüchliche Informationen geprägt. Aktuelle Beispiele liefern die Auseinandersetzung um E-Mobilität, die Wasserstofftechnologie, die Windkraft oder Kompensationsleistungen, die zwischen Fakten und Mythen wogen.

Aufgabe der Universitäten und Hochschulen ist daher der Transfer Fakten-basierten Wissens in die breite Öffentlichkeit, aber auch das Aufzeigen von Grenzen des aktuellen Wissens. Unter dem Aspekt eines multi-direktional angelegten Wissenstransfer betrachtet der Beitrag an ausgewählten Beispielen auch die Rolle der Wissenschaft als redlicher Vermittler zwischen verschiedenen politisch und gesellschaftlich Handelnden. Die Wissenschaft als Wissens-Intermediär hat hier die Chance, notwendige Brücken zu bauen. Erkenntnisse der Klimapsychologie liefern für diese Kommunikation wichtige Ansätze. Ziel muss es dabei sein, einer Handlungspassivität auf individueller und gesellschaftlicher Ebene vorzubeugen und so unter anderem auch die Akzeptanz für technologische Innovationen zu steigern.

Hauptteil

Von globalen Herausforderungen zu lokalen Anforderungen

Ohne jeden Zweifel steht die Menschheit vor gravierenden, ja geradezu existenziellen Problemen. Der Klimawandel schreitet voran und es droht eine Erwärmung der Erde im globalen Durchschnitt von mehreren Grad Celsius bis zum Ende des Jahrhunderts – die Wissenschaft ist sich hier einig, auch wenn manche das weiterhin verneinen. Viele Wissenschaftsgebiete haben zu diesem Konsens beigetragen - die Physik, die Meteorologie, die Chemie, die Geologie oder die Biologie - nur um einige zu nennen. Gleichzeitig nimmt die Artenvielfalt auf dramatische Weise ab, sodass die Stabilität vieler Ökosysteme bereits heute mehr als gefährdet ist. Beide Prozesse sind miteinander verwoben, da die Schnelligkeit der globalen Erwärmung die Anpassungsfähigkeit vieler Organismen - Pflanzen wie Tiere gleichermaßen - übersteigt und der Klimawandel so zum Artensterben beiträgt. Die aktuellen Berichte des Weltklimarats [1] und des Weltbiodiversitätsrats [2], die jeweils die wissenschaftliche Literatur zusammentragen und in entsprechende Berichte kondensieren,

legen hier umfassend Zeugnis ab. Längst sind die Folgen der globalen Erwärmung auch bei uns spürbar. Die deutschen Wälder, die durch die mehrjährigen Dürreereignisse bis an die Grenzen ihrer Widerstandskräfte belastet sind, sind uns allen als Beispiel im Kopf. Die Folgen unseres Lebensstils werden auch aktuell deutlich. Unter Fachleuten herrscht Einigkeit dahingehend, dass der Übertritt von Erregern aus dem Tierreich auf Menschen durch das expansive Vordringen in Ökosysteme, die Umweltverschmutzung und den Klimawandel sowie den damit einhergehenden Verlust der Biodiversität begünstigt wird [3]. Zoonosen wie aktuell Covid-19 werden uns zukünftig häufiger treffen.

Doch wenn dies alles bekannt ist, warum handeln wir dann als Menschheit nicht in ausreichendem Maße und reduzieren beispielsweise schnell und effizient die Treibhausgasemissionen? Viele Gründe könnten genannt werden, einige sollen hier herausgegriffen werden:

Beginnen wir mit Unwissen und mangelndem Vorstellungsvermögen. Menschen fällt es schwer, sich komplexe, vernetzte, dynamische Zusammenhänge vorstellen zu können, die durch nicht-lineare Veränderungen (z.B. ein exponentielles Wachstum), Intransparenz oder zeitliche bzw. örtliche Entkopplung charakterisiert sind [4,5]. Der menschliche Verstand ist auf einfache Ursache-Wirkungsphänomene konditioniert und am besten sind beides, Ursache und Wirkung, mit eigenen Augen sichtbar. Die Corona Pandemie hat deutlich gezeigt, dass vielen von uns dieses Vorstellungsvermögen fehlt, und so bleiben Kipppunkte im Klimasystem und deren Gefahren den meisten abstrakt. Mangelndes Vorstellungsvermögen gepaart mit Unwissen und mit dem Unwillen, sich zu informieren, führt letztlich gar zur Ignoranz. Soziale Echokammern verstärken vorgefertigte Meinungen und Ansichten und sind daher Teil des Problems.

Die Bereitschaft zu individuellen Veränderungen ist begrenzt und wird auch durch unser soziales Umfeld mit beeinflusst. Die Umwelt- und Klimapsychologie sowie die Verhaltensökonomie beschäftigen sich mit solchen Fragen. Warum sollte ich etwas tun, wenn mein Nachbar auch nichts macht? Warum sollte ich an meinem Geschäftsmodell etwas ändern, funktioniert doch gut und ich verdiene bestens? So werden mögliche Veränderungen aufgeschoben und Gründe dafür gefunden. Veränderungen sind vielleicht auch mit einem Verlust an individueller Bequemlichkeit verbunden. Die Fahrt mit dem Fahrrad empfinde ich als anstrengender als mit dem Auto. Und warum sollte ich auf eine Flugreise verzichten, ich lebe doch vegan? In der Klimapsychologie werden diese Formen des Verhaltens und ihre Ursachen beispielsweise mit dem Begriff der kognitiven Dissonanzen umschrieben [6].

Gerne wird in diesem Zusammenhang auch von der Freiheit des einzelnen gesprochen, die nicht durch Regeln eingeschränkt werden dürfe. Manche wähnen sich gar auf dem Weg in eine Ökodiktatur. Aber haben wir überhaupt eine umfassende Freiheit und wie wäre diese legitimiert? Ein Blick in unseren Alltag zeigt, dass unsere Freiheit immer dort aufhört, wo wir die Gesundheit oder gar das Leben anderer gefährden oder ihr Eigentum bedrohen oder vernichten. Wenn wir dieses Argument also hören, lohnt ein genauerer Blick. Denn den Protagonisten geht es an dieser Stelle eben nicht um politische Freiheit, die sich in der Meinungsfreiheit oder der Versammlungsfreiheit äußert, sondern um wirtschaftliche Freiheit,

beispielweise also um die Freiheit hinsichtlich der Produktion einer Ware (wo und wie wird produziert?) oder um die Konsumfreiheit (was wird konsumiert?).

Wenn wir uns einmal anschauen, aus welchen Bereichen in Deutschland die Treibhausgasemissionen stammen, werden unsere Hausaufgaben schnell ersichtlich (Abb. 1).

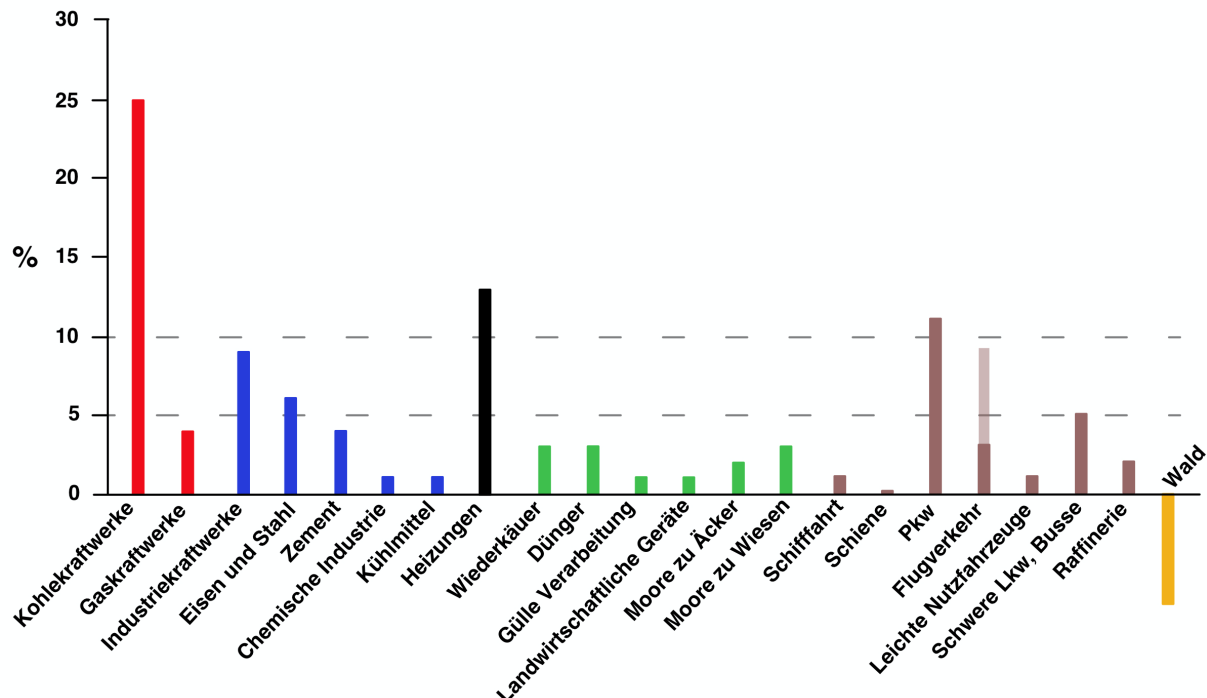


Abbildung 1: Anteil der Emissionen in Prozent an den Gesamtemissionen in Deutschland, Zahlen für 2017. Abbildung von S. Kühl und M. Kühl, basierend auf den Daten des Umweltbundesamts nach [7].

Eine schnelle Dekarbonisierung unserer Wirtschaft und unseres Lebens praktisch in allen Bereichen ist notwendig, insbesondere aber in den Bereichen Strom, Wärme und Verkehr, weil hier die größten Hebel liegen. Die Energiewende, also die Umstellung unseres Stromsystems auf erneuerbaren Energien, wird für diese Aufgabe essentiell sein. Nicht nur, weil dadurch schnell ein großer Anteil der Emissionen in Deutschland eingespart werden kann, sondern auch, weil eben andere Sektoren zukünftig auch elektrifiziert werden müssen oder andere Formen der Energieumwandlung angewandt werden müssen. Stichworte sind hier die Wärmewende oder auch die Verkehrswende.

Die Rolle der Wissenschaft

Was ist nun der Beitrag der Wissenschaft zum Gelingen dieses Prozesses? Auf den ersten Blick ist dies offensichtlich, schließlich ist die Wissenschaft verantwortlich für das Gewinnen neuer Erkenntnisse. So trägt die Wissenschaft dazu bei, neue Technologien zur Energiebereitstellung zu entwickeln und Prozesse effizienter zu gestalten.

Wesentliche Voraussetzung für das Gelingen der Energiewende ist aber gerade auch das Mitwirken der Gesellschaft, also der Bürgerinnen und Bürger sowie auch der Wirtschaft. Dies bedingt die breite Akzeptanz der notwendigen Maßnahmen, denn ohne diese Akzeptanz

bleiben alle Projekte auf der Ebene der Pilotierung stecken. Der Widerstand der Bevölkerung gegen Stromtrassen und Windräder in Wohnortnähe sind hinlänglich bekannt.

Akzeptanz für die Energiewende erreichen wir allerdings nur durch die Verbreitung ausreichender Informationen und durch die Erlangung eines gesellschaftlichen Konsenses, also über eine breit geführte Diskussion. Häufig ist die Diskussion in der Öffentlichkeit allerdings durch teilweise widersprüchliche Informationen geprägt. Ein aktuelles Beispiel liefert die Auseinandersetzung um die E-Mobilität in all ihren Facetten, z.B. ob Verbrenner oder E-Autos besser für das Klima seien, und die hitzig geführten Argumentationen bezüglich der Ökobilanz der dafür benötigten Batterien. Andere Themen sind die Wasserstoff- bzw. Brennstoffzellentechnologie, die Windkraft oder mögliche Kompensationsleistungen zur Erlangung der Klimaneutralität. Bei all den Beispielen bewegt sich die Diskussion zwischen Fakten und Mythen.

An Informationen mangelt es sicher nicht. Pressestellen von Universitäten und Unternehmen verbreiten neue Erkenntnisse und Entwicklungen in Form von Pressemitteilungen - in leserfreundlichen und verdaulichen Informationshäppchen verpackt. Die Wichtigkeit der eigenen Entwicklung wird gleich mitgeliefert - Klappern gehört halt zum Handwerk. Aufgabe der Medien ist es dann, diese Informationen in Zeitungen, Journalen, Radiobeiträgen oder Fernsehsendungen zu verbreiten. Und guter Wissenschaftsjournalismus zeigt zugleich auch die Grenzen des Wissens auf.

Allerdings ist diese Form der Wissenschaftskommunikation unilateral. Interessierte Bürgerinnen und Bürger nehmen Informationen zwar auf, mit ihren Fragen, möglicherweise auch Ängsten und Sorgen, bleiben sie jedoch allein. Den Fernseher, die Zeitung oder Facebook kann man eben nicht befragen und erhält oft auch keine qualifizierte Antwort. Diskussionen in sozialen Medien verstärken hingegen die Unsicherheit weiter und teilen die Diskutanten gleichermaßen in verschiedene Lager. Wer einmal auf Facebook die Diskussion in einer E-Mobilitätsgruppe oder in einer Wasserstoff-/Brennstoffzellengruppe verfolgt hat, weiß, wovon ich spreche. Politische Parteien verschiedener Couleur reihen sich ein in verschiedene Gruppen oder Positionen und tun so ihr übriges.

Die Diskussionen werden darüber hinaus durch bewusst gestreute Fake News und bewusst angewandte Strategien der Wissenschaftsleugnung erschwert. Untersuchungen in den USA haben die institutionalisierte, kommerzialisierte Form der Leugnung des Klimawandels und der Bekämpfung der aus den Erkenntnissen der Wissenschaft abgeleiteten Dekarbonisierung der Wirtschaft belegt [8-10].

Ich möchte daher hier das Argument vertreten, dass der Wissenschaft im Prozess des gesellschaftlichen Wandels ein zweite, mindestens gleichwichtige, Funktion zukommt, nämlich die Aufgabe, als redlicher Wissensmakler im Rahmen eines gesellschaftlichen Diskurses. Was fehlt, ist also nicht nur eine ausgewogene Bewertung der Faktenlage und eine möglichst neutrale Einschätzung ohne weitere - möglicherweise kommerzielle - Interessen. Was insbesondere fehlt, ist die Möglichkeit eines bi- oder multilateralen Dialogs. Dies bedeutet, dass es für Universitäten, Hochschulen und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen eben nicht hinreichend ist, über den wissenschaftlichen Fortschritt in Pressemitteilungen, Podcasts oder Youtube Videos zu berichten. Wir müssen vielmehr den

Menschen ein Angebot zur persönlichen und interaktiven Diskussion machen. Vorträge, Podiumsdiskussion mit Zuschauerbeteiligung, Workshops, Klimasimulationen, Rollenspiele oder andere spielerische Elemente zur Vermittlung und Diskussion wissenschaftlicher Inhalte sind aus der Hochschuldidaktik bekannte Werkzeuge, um diese Ziele zu erreichen. Dies ermöglicht Partizipation und eröffnet zugleich Optionen, Selbstwirksamkeit zu vermitteln. Eine klare und verständliche Sprache ist dabei wichtig. „Dekarbonisierung“, „soziale Transformation“ oder „Wachstum in planetaren Grenzen“ sind für viele unklare Begriffe. Dies zusammen ist letztlich eine Grundvoraussetzung für das Gelingen der Energiewende.

Im Bereich der multilateralen Wissenschaftskommunikation existiert ein sichtbares Gefälle zwischen Stadt und Land. Angebote für Bürgerinnen und Bürger zur Information sind in der Stadt mit ihren Bildungseinrichtungen und den anderen Akteuren des sozialen Lebens naturgemäß zahlreicher als auf dem Land. Bereits wenige Kilometer außerhalb der Großstadt nimmt das Angebot merklich ab und geht dann schnell gegen Null. In Kombination mit der Tatsache, dass sich Nachhaltigkeitslösungen im ländlichen Raum anders darstellen als in der Stadt, entsteht so schnell das Gefühl, von der Entwicklung abgehängt zu sein.

Von Inventionisten, Idealisten und Institutionalisten

In den kontroversen und für viele verwirrenden Diskussionen zum Thema Klimawandel und Energiewende finden sich häufig wiederkehrende Argumentationsmuster. Einige Beispiele, bei denen es an einem multilateralen Diskussionsangebot fehlt, sollen hier kurz besprochen werden.

Viele sehen die Entwicklung neuer Technologien als wichtigsten Baustein im Kampf gegen den Klimawandel an, von Schneidewind und Augenstein als **Inventionisten** bezeichnet [11]. Technologische Entwicklungen, auf englisch *invention*, tragen zur weiteren Effizienzsteigerung bei und helfen so, die uns zur Verfügung stehende Energie bestmöglich zu nutzen. Effizienz ist das Schlagwort. Typische Argumentationsmuster betreffen die Debatte zur sogenannten Technologieoffenheit, die Vermeidung vermeintlicher technologischer Festlegungen und die Kraft des Marktes. Getragen wird dieses Konzept von der Idee des Wirtschaftswachstums und einer Marktwirtschaft, die jetzt einer ergänzenden ökologischen Komponente bedarf. Von sozial-ökologischer Marktwirtschaft ist die Rede, von einem *Green New Deal*. Parallel zur Reduktion von Treibhausgasemissionen durch Steigerung der Energieeffizienz werden Arbeitsplätze und Wohlstand versprochen. Tatsächlich aber hat der technologische Erfolg häufig durch Automatisierung zum Verlust menschlicher Arbeitsplätze geführt. Diese wurden durch Technologien ersetzt, die auf einem preiswerten, weil nicht ausreichend besteuerten Verbrauch von Ressourcen beruhen. Die Externalisierung von Kosten führt in diesem Fall zu einem Leistungs-losen Einkommen der beteiligten Firmen und deren Inhaber. Eine Internalisierung solcher Kosten wird zukünftig von Bedeutung sein, die CO₂ Steuer und der Emissionshandel sind erste Werkzeuge. In wieweit technologischer Fortschritt in der Summe, also auf gesamtwirtschaftlicher Ebene, zu einer Reduktion von Treibhausgasen und verminderten Ressourcenverbrauch führt, bleibt abzuwarten.

Ohne jeden Zweifel tragen technische Entwicklungen zur Erreichung unseres Ziels einen wichtigen Beitrag. Tatsächlich hat aber die Erfahrung gezeigt, dass die Steigerung der

Energieeffizienz durch *Rebound* Effekte zunichte gemacht wurde. Zwar sind die Motoren unserer Autos immer effizienter, zugleich sind die Autos aber auch größer und schwerer geworden. Den Effizienzgewinn haben wir also in Wohlstand und Bequemlichkeit investiert, in diesem Falle elektrische Fensterheber, Sitzheizungen, Klimaanlage, Scheinwerfer-Waschanlagen usw. und sofort. Und weil das Autofahren günstiger wird, fahren wir eben noch mehr Kilometer. Die Glühlampe wurde ersetzt durch Halogen- und Energiespar-, letztlich durch LED-Lampen. Zugleich haben wir uns daran gewöhnt, in der Weihnachtszeit unsere Gärten mit einer schieren Unzahl von LED-Lampen zu beleuchten, so dass das Wort Lichtverschmutzung Eingang in unser Vokabular gefunden hat. Der Kerosinverbrauch von Flugzeugen ist kontinuierlich gesunken, dafür fliegen wir mehr als je zuvor. Technologischer Fortschritt hat also auch immer zu neuen Begehrlichkeiten geführt, so dass gewisse Zweifel, ob durch neue Technologien alleine das Ziel der Energiewende erreicht werden kann, also mehr als angebracht sind. Einschränkende Regeln des Staats sehen die Inventionisten als Übel an. Gleichzeitig rufen sie aber gerne nach dem Staat, wenn es um Anreizprogramme und finanzielle Förderungen geht. Das Ergebnis der argumentativen Bemühungen dieser Gruppe ist, dass Bürgerinnen und Bürger häufig daran zweifeln, ob ihr individuelles, klimaneutrales Handeln überhaupt eine Wirkung entfalten kann.

Den Inventionisten vermeintlich diametral entgegen stehen die von Schneidewind und Augenstein als **Idealisten** bezeichnete Gruppe [11]. Diese argumentieren in diesem Zusammenhang mit der Idee einer globalen und Generationen-übergreifenden Gerechtigkeitsvorstellung, wie sie auch Eingang gefunden haben in den Brundland Report [12] und die 17 Nachhaltigkeitsziele der UN, die 17 SDGs (sustainable development goals) [13]. Daraus abgeleitet wird der moralische Anspruch - an sich selbst, aber auch an andere - mit Energie und Ressourcen sorgsam umzugehen und beide nicht zu verschwenden. Suffizienz, sprich Genügsamkeit, steht im Zentrum der Bemühungen. Zuweilen geht dies so weit, andere Formen des Wirtschaftens zu fordern, die auf die Wachstumsorientierung verzichten. Die Postwachstumsökonomie steht hier beispielhaft [14]. Auch an dieser Strategie können Zweifel angebracht sein. Ein Verzicht aus der Situation der Wohlstandssättigung und des Hyperkonsums ist leicht zu fordern. Allerdings wird dies viele Menschen in anderen Ländern der Erde, die eher an einem wachsenden Wohlstand interessiert sind, kaum interessieren. Der Staat kann aus Sicht der Idealisten durch Verbote und Gebote, Steuern und Abgaben gerne unterstützend wirksam sein. Das Ergebnis der argumentativen Bemühungen dieser Gruppe ist allerdings, dass manche Bürgerinnen und Bürger Zweifel daran hegen, ob technologische Entwicklungen für die Lösung der Klimakrise relevant sind oder ob sie das Problem gar verstärken. Die aktuelle Diskussion, ob die Digitalisierung all unserer Lebensbereiche für das Klima positiv oder negativ zu bewerten ist, ist ein bekanntes Beispiel.

Das Besondere an diesen beiden Gruppen ist, dass beide die gegenseitige Position häufig ablehnen oder gar verteufeln. So werfen Idealisten den Inventionisten den *Rebound* Effekt vor und sehen in jeder technologischen Entwicklung ein Einfallstor für einen weiteren Ressourcenverbrauch. Umgekehrt argumentieren die Inventionisten, dass der Verzicht der Idealisten zu sinkendem Wohlstand oder gar Armut führt. Dass diese Diskussionen nicht sehr zielführend sind, liegt auf der Hand und dass die Wahrheit wie so oft im Leben in der Mitte liegt, wird häufig ausgeblendet. Die Energiewende gelingt dann am besten, wenn wir uns nicht

nur auf neue Technologien und die Steigerung der Energieeffizienz beschränken. Je sparsamer wir mit der Energie umgehen, wie bewusster wir uns die Folgen des eigenen Handelns machen, umso einfacher gelingt es uns, nicht nur unser Stromsystem, sondern auch unser gesamtes Energiesystem klimaneutral zu gestalten. Dies beinhaltet – ganz offensichtlich - das Ablegen ideologischer Scheuklappen bei allen Beteiligten.

Dies soll mit einigen Zahlen des Fraunhofer Instituts für solare Energiesysteme verdeutlicht werden [15]. Ähnliche Studien anderer Institutionen [7, 16-19] führen im Prinzip zu ähnlichen Ergebnissen. Der Primärenergieverbrauch lag in Deutschland im Jahr 2018 ohne den nicht-energetischen Anteil bei ca. 3400 TWh, dem ein Endenergieverbrauch von ca. 2500 TWh gegenüberstand. Unterschiedliche Szenarien des Fraunhofer Instituts untersuchen die zukünftige Entwicklung, wobei der Primärenergieverbrauch in allen Fällen gegenüber dem heutigen Wert sinkt - dem Effizienzgewinn sei Dank. Gleichzeitig steigt der Bedarf an regenerativem Strom in Deutschland gegenüber heute um den Faktor 5-7. Das Interessante an diesen Szenarien ist aber in deren Unterschieden begründet. So sinkt im sogenannten Beharrungsszenario, bei dem die Bevölkerung an Verbrennungstechnologien festhält, der Primärenergiebedarf lediglich um ca. 25%, wohingegen im Szenario Suffizienz eine Reduktion um ca. 50% möglich ist. In anderen Worten: Je sparsamer jede und jeder Einzelne von uns mit Energie umgeht, um so einfacher gelingt uns die Energiewende. Je mehr Bürgerinnen und Bürger sich dieser Option anschließen, um so wirksamer sind sie natürlich auch als Gruppe.

Die **Institutionalisten** als dritte Gruppe [11] setzen auf den Staat und die Staatengemeinschaft als wichtigsten Akteur zum Erreichen des Ziels. Hier werden – je nach politischem Hintergrund- staatliche Anreizsysteme einerseits oder ordnungspolitische Maßnahmen zur Preisgestaltung (CO₂-Steuer, Emissionshandel) und konkrete Vorschriften (z.B. Photovoltaikpflicht) diskutiert. Insbesondere zwischenstaatlichen Abkommen wird beim Erreichen der Klimaziele eine besondere Rolle zukommen. Das Montreal Protokoll aus dem Jahre 1987 zum Schutz der Ozonschicht könnte hier als Blaupause dienen. Seit 1989 in Kraft, hat es seine Wirksamkeit bis heute im Wesentlichen unter Beweis gestellt.

Wasserstoff und negative Emissionstechnologien

Zwei weitere Beispiele, bei denen die Kommunikation und Diskussion im Moment nicht optimal ist, sollen hier noch betrachtet werden. Da nicht alle Sektoren gleichermaßen elektrifiziert werden können, kommt der Wasserstofftechnologie und den synthetischen Kraftstoffen eine besondere Rolle zu. Gerne wird hier argumentiert, dass Wasserstoff eine saubere Technologie darstelle, im Verkehrssektor sei beispielhaft die Brennstoffzelle sauberer als Verbrennungsmotoren oder Batterie-basierte Antriebe. In Hinblick auf den motorisieren Individualverkehr pochen Inventionisten daher an dieser Stelle auf Technologieoffenheit. Vielen ist allerdings nicht klar, dass Wasserstoff per se nicht klimaneutral und damit „sauber“ ist. Wasserstoff kann auf verschiedene Weisen hergestellt werden. Wichtigste Quelle für Wasserstoff ist aktuell Erdgas. Dabei fallen entsprechende Mengen CO₂ als Treibhausgas an [20,21]. Diese Form des Wasserstoffs wird gemeinhin auch als grauer Wasserstoff bezeichnet. Klimaneutraler, sogenannten grüner Wasserstoff, wird durch Elektrolyse von Wasser mit Hilfe regenerativen Stroms hergestellt.

Aktuell beträgt der Anteil der Elektrolyse von Wasser mit regenerativem Strom an der europäischen Wasserstoffsynthesekapazität gerade einmal 0,1% [20]. Ein entsprechend engagierter Aufbau an Elektrolyseleistung wird demnach notwendig sein – und damit verbunden auch ein massiver Ausbau regenerativer Energie in Deutschland. Anders gesprochen: Wer für Wasserstofftechnologie und synthetische Kraftstoffe ist, muss auch für einen engagierten Ausbau regenerativer Stromerzeugung in Deutschland sein. Zwei weitere Gedanken hierzu sind wichtig:

1. Es besteht weitgehend Einigkeit dahingehend, dass Deutschland in jedem Fall Wasserstoff bzw. daraus gewonnene synthetische Kraftstoffe auch importieren muss. Nur über die Mengen besteht noch Unklarheit. Unklar bleibt in jedem Fall auch die Frage, aus welchen Ländern diese Energie denn kommen soll.

2. Grüner Wasserstoff und daraus gewonnene synthetische Kraftstoffe werden insbesondere für Bereiche wie die Stahlindustrie, den Flugverkehr oder den Schiffstransport unerlässlich sein – und zwar in sehr großen Mengen. Auch als Energiespeicher kommt Wasserstoff eine wichtige Funktion zu. So würde alleine die klimaneutrale Umstellung des größten deutschen Stahlwerks von Thyssen-Krupp in Duisburg den Einsatz von etwa 750.000 Tonnen Wasserstoff pro Jahr benötigen. Zum Vergleich: Weltweit wurden im Jahr 2019 etwa 119 Millionen Tonnen Wasserstoff hergestellt [22]. In anderen Worten: Allein die Umstellung eines einzigen Stahlwerks in Deutschland würde 0,6 % der aktuellen weltweiten Wasserstoffproduktion benötigen. Auch an dieser Stelle täte Ehrlichkeit der Diskussion gut. Grüner Wasserstoff ist kostbar und wir werden ihn für viele Jahre zunächst in den Bereichen benötigen, die wir nicht elektrifizieren können. Eine parallele Bedienung des motorisierten Individualverkehrs, Stichwort Brennstoffzelle, erscheint aktuell kaum machbar - es sei denn, man setzt auf grauen Wasserstoff.

Gerne wird an dieser Stelle argumentiert, man könne das CO₂ bei der Herstellung des Wasserstoffs aus Erdgas ja abscheiden und in der Erde einlagern und verpressen. Der so hergestellte Wasserstoff wird gemeinhin als blauer Wasserstoff bezeichnet. Nur sollte man wissen, dass auch blauer Wasserstoff nicht mit dem Pariser Klimaschutzabkommen kompatibel ist, da bereits bei der Erdgasförderung unvermeidbare Emissionen entstehen.

Ein in der öffentlichen Diskussion bisher überhaupt nicht wahrgenommener Sachverhalt ist die Tatsache, dass wir zum Einhalten des Pariser Klimaschutzabkommens ab Mitte des Jahrhunderts in einem nennenswerten Umfang **negative Emissionen** brauchen. Wir werden also in den nächsten Jahren genau diese Technologien benötigen bzw. bestehende Techniken zur Marktreife bringen müssen, die CO₂ aus industriellen Fertigungsprozessen oder aber aus der Luft abscheiden, um es in der Erde einzulagern. *Carbon capture and storage*, CCS, in Deutschland verboten, und andere negative Emissionstechnologien sind zentraler Bestandteil aller Paris-kompatibler Klimaprojektionen [1]. Ein Blick auf die weltweit vorhandenen und derzeit genutzten Kapazitäten für diese Technologie zeigt die begrenzte Perspektive dieser Technologie beispielsweise für die Herstellung blauen Wasserstoffs in großem Stil. Laut IEA wurden in 21 Projekten dieser Art pro Jahr 40 Mio. Tonnen CO₂ eingelagert, gerade einmal 1 Promille des globalen CO₂ Ausstoßes [23].

Bei vielen Deutschen hingegen lösen diese Technologien Schnappatmung aus. Viele wollen diese Technologien nicht, da sie darin eine Verlängerungsoption für die fossilen Brennstoffe sehen. Ganz offensichtlich: Diese Erkenntnisse fordern von den Idealisten unter uns eine gewisse Flexibilität und Toleranz in ihren Positionen und Ansichten – und den Inventionisten sei gesagt, dass das teure und aufwendige Abscheiden von CO₂ mengenmäßig um so einfacher zu bewältigen ist, je suffizienter wir generell beim Umgang mit der Energie sind - und je weniger CO₂ wir in die Atmosphäre abgeben.

Ein weiterer Punkt der kontroversen, Ideologie-geladenen Diskussion ist der Themenkomplex der Kompensation der eigenen Treibhausgasemission durch die Finanzierung Klimafördernder Projekte, in der Regel in Entwicklungsländern. Für die einen stellt dies eine Form des Ablasshandels dar, die nur von der eigenen Verpflichtung zur Treibhausgasreduktion ablenkt. Kompensationen seien insgesamt schädlich, da sie bewirken, dass keine maximalen Anstrengungen zum Klimaschutz unternommen werden. Für die anderen ist es eine Möglichkeit, Gutes für das Klima zu tun und gleichzeitig die wirtschaftliche Entwicklung in anderen Ländern zu fördern. Kombiniert mit eigenen Reduktionen und Vermeidungsstrategien sehen sie darin ein machtvolleres Werkzeug, um uns im Kampf gegen den Klimawandel zusätzlich Zeit zu gewinnen. Auch hier helfen Fakten weiter: Das Pflanzen von Bäumen beispielsweise kann nach wissenschaftlichen Berechnungen maximal ca. 10 Gt CO₂ pro Jahr fixieren, aber nicht heute, sondern erst in einigen Jahrzehnten, wenn die Bäume in der exponentiellen Wachstumsphase sind [24]. Bei aktuell 40 Gt CO₂ Emissionen pro Jahr mit weiter ansteigender Tendenz ist die Bewertung klar: das Pflanzen von Bäumen ist hilfreich, alleine dadurch kann das Klima aber nicht gerettet werden. Mischkulturen leisten zusätzlich einen wichtigen Beitrag zum Erhalt der Artenvielfalt. Alles in allem werden andere negative Emissionstechnologien (z.B. Biokohle, Humusbildung etc.) zur CO₂ Minderung notwendig sein [24]. Entsprechende Aktivitäten werden von der Allianz für Klima und Entwicklung und dort angeschlossenen Kompensationsanbietern vermittelt.

Viele denken, Deutschland sei zu klein, um den Klimawandel aufzuhalten. Warum sollten wir daher in Deutschland etwas tun? Das Klimaproblem lösen wir nicht hier bei uns, sondern in China, Indien oder den USA. Sie erkennen nicht, warum Deutschland trotzdem gut beraten ist, aktiv voran zu gehen. Letztlich geht es darum zu zeigen, dass Klimaneutralität auch in einem Industrieland möglich ist. Nehmen wir nochmal das Beispiel Wasserstofftechnologie. Sowohl was die Technologien der Elektrolyseure als auch der Brennstoffzellen angeht, sind deutsche Unternehmen weltweit führend. Basierend auf dem eigenen Importbedarf ergibt sich die Möglichkeit von Energiepartnerschaften und damit auch die Option, eigenen Technologien zu vertreiben.

Fazit

Anhand ausgewählter Beispiele wurde gezeigt, dass es bei der unilateralen Verbreitung von Informationen zu vielen Missverständnissen in der Bevölkerung kommen kann. Einen Teil dazu tragen Medien bei, die gerne reißerische Meldungen verkaufen und damit Hoffnungen wecken, einen anderen Teil tragen Ideologie-getriebene Diskutanten bei. Auch bewusst gestreute Fehlinformationen und *Fake News* sind ein Problem. Das Gelingen der

Energiewende hängt aber in einem großen Umfang von der Akzeptanz in der Bevölkerung ab. Der Wissenschaft kommt hier eine besondere Rolle als redlicher Wissensmakler zu. Dazu müssen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im direkten Kontakt mit den Bürgerinnen und Bürger für Diskussionen bereitstehen. Die klassischen Medien und insbesondere die sozialen Medien reichen für eine balancierte, multilateral geführte Diskussion nicht aus, sondern es bedarf erheblicher Anstrengungen der Wissenschaft, um einen partizipativen Dialog mit der Gesellschaft zu gestalten. Das Zusammenspiel technologischer Entwicklungen (Stichwort Energieeffizienz) und Genügsamkeit des Einzelnen (Stichwort Suffizienz) wird für das Gelingen der Energiewende auf nationaler Ebene entscheidend sein. Zusammen mit internationaler Zusammenarbeit im Sinne eines neuen Montreal Protokolls zur globalen Reduktion von Treibhausgasen können so auch international Impulse zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele gesetzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.) IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. (Online) Available: <https://www.ipcc.ch/sr15/>, (zuletzt eingesehen 7.4.2021)
- [2] E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors), IPBES (2019): Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES secretariat, Bonn, Germany. (Online) Available: <https://www.ipbes.net/global-assessment> (zuletzt eingesehen 7.4.2021)
- [3] WWF, Corona-Virus: Wie uns Artenschutz vor Krankheiten schützen kann, <https://www.wwf.de/aktuell/corona-notspende/corona-virus-wie-uns-artenschutz-schuetzen-kann>, (zuletzt eingesehen 14.4.2021)
- [4] F. Vester, Die Kunst vernetzt zu denken, Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität. Ein Bericht an den Club of Rome. München: Pantheon Verlag, 2019
- [5] D. Dörner, Die Logik des Misslingens, Strategisches Denken in komplexen Situationen, 15. Auflage, Hamburg: rororo, 2018
- [6] C. Nikendei, T.J. Bugaj, F. Nikendei, S.J. Kühl, M. Kühl, Klimawandel: Ursachen, Folgen, Lösungsansätze und Implikationen für das Gesundheitswesen. Z Evid Fortbild Qual Gesundheitswes, 56-157:59-67, 2020
- [7] K. M. Hentschel, Handbuch Klimaschutz, München: Oekom Verlag, 2020
- [8] P.J. Jacques, R.E. Dunlap, M. Freeman (2008) The organization of denial: Conservative think tanks and environmental scepticism. Environmental Politics 17, 349-385
- [9] R.J. Brulle (2014) Institutionalizing delay: Foundation funding and the creation of U.S. climate change counter-movement organizations. Climatic Change 122: 681-694

- [10] N. Oreskes, E.M. Conway, Die Machiavellis der Wissenschaft, Das Netzwerk des Leugnens, Weinheim: Wiley-VCH, 2014
- [11] U. Schneidewind und K. Augenstein, Three Schools of Transformation Thinking. GAIA 25, 88-93, 2016
- [12] Brundland Report (1987) Our common future, United Nations World Commission on Environment and Development. (Online) Available: https://en.wikisource.org/wiki/Brundtland_Report , (zuletzt eingesehen 14.4.2021)
- [13] United Nations (2015) Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development (Online), Available: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E , (zuletzt eingesehen 14.4.2021)
- [14] N. Paech, Befreiung vom Überfluss, Auf dem Weg in die Postwachstumsökonomie. München: oekom Verlag, 2018
- [15] P. Sterchele, J. Brandes, J. Heilig, D. Wrede, C. Kost, T. Schlegl, A. Bett, H.-M. Henning (2020) Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen; Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme ISE. (Online), Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf> , (zuletzt eingesehen 7.4.2021)
- [16] P. Gerbert, P. Herhold, J. Burchardt, S. Schönberger, F. Rechenmacher, A. Kirchner, A. Kemmler, M. Wunsch (2018) Klimapfade für Deutschland, Bundesverband der Deutschen Industrie (Online), Available: <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/> , (zuletzt eingesehen 7.4.2021)
- [17] T. Bründlinger, J.E. König, O. Frank, D. Gründig, C. Jugel, P. Kraft, O. Krieger, S. Mischinger, P. Prein, H. Seidl, S. Siegemund, C. Stolte, M. Teichmann, J. Willke, M. Wolke (2018) Dena Leitstudie Integrierte Energiewende. Deutsche Energieagentur (Online), Available: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf, (zuletzt eingesehen 7.4.2021)
- [18] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020): Klimaneutrales Deutschland. Zusammenfassung im Auftrag von Agora Energie- wende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität (Online), Available: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_192_KNDE_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf (zuletzt eingesehen 7.4.2021)
- [19] K. Purr, J. Günther, H. Lehmann, P. Nuss (2019) Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE: Langfassung; UBA (Online), Available: <https://www.umweltbundesamt.de/rescue> (zuletzt eingesehen 7.4.2021)
- [20] Hydrogen Europe, Clean Hydrogen Monitor (2020). (Online), Available: <https://www.hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/04/Clean-Hydrogen-Monitor-2020.pdf> (zuletzt eingesehen 8.4.2021)
- [21] Shell Wasserstoff-Studie, Energie der Zukunft (2017). (Online), Available: <https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-hydrogen->

[study/ jcr_content/par/toptasks_e705.stream/1497968981764/1086fe80e1b5960848a92310091498ed5c3d8424/shell-wasserstoff-studie-2017.pdf](https://www.jcr-content.com/par/toptasks_e705.stream/1497968981764/1086fe80e1b5960848a92310091498ed5c3d8424/shell-wasserstoff-studie-2017.pdf) (zuletzt eingesehen 8.4.2021)

[22] Statista, Produktion und Verwendung von Wasserstoff weltweit im Jahr 2019. (Online), Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1195241/umfrage/produktion-und-verwendung-von-wasserstoff-weltweit/> (zuletzt eingesehen 8.4.2021)

[23] Carbon capture, utilization and storage, International Energy Agency (Online), Available: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage> , (zuletzt eingesehen 8.4.2021)

[24] European Academies Science Advisory Council (2018) Negative emission technologies: What role in meeting Paris targets ? (Online) Available: https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Negative_Carbon/EASAC_Report_on_Negative_Emission_Technologies.pdf , (zuletzt eingesehen 14.4.2021)

Der Autor

Prof. Dr. Michael Kühl
michael.kuehl@uni-ulm.de

Leiter des Instituts für Biochemie und Molekulare Biologie an der Universität Ulm, aktiv im Beirat der Scientists for Future Deutschland

Fachinteressen: u.a. Wissenschaftskommunikation, Klimakommunikation, eigener Umweltblog: www.klimaandmore.de

Transport & Mobilität CO₂-frei – woher kommt die Energie?

Prof. Dr. Werner Tillmetz, Universität Ulm
André Martin, André Martin Consulting, Idstein

Abstract

Die Mobilitätswende ist Teil der Energiewende. Mit dem Ausstieg aus fossilen Energien soll der Kraftstoff für Transport und Mobilität künftig in Form von grünem Strom oder Wasserstoff bereitgestellt werden. Damit verändert sich sowohl die Erzeugung von Strom als auch dessen Nutzung dramatisch. Die heutige Stromerzeugung in Deutschland mit einem Anteil von 50 Prozent Strom aus Erneuerbaren Energien ermöglicht eine Projektion auf die CO₂-freie Welt und eine qualitative Abschätzung der künftigen Verhältnisse. Bei der angestrebten Stromerzeugung, die primär auf Sonne und Wind basieren wird, ist, bedingt durch deren starke Fluktuation, die Gleichzeitigkeit der Stromnutzung zum Laden von Fahrzeugbatterien eher die Ausnahme als die Regel. Damit wird Zwischenspeicherung des Stroms eine zentrale Rolle spielen. Das bedeutet allerdings auch eine Reduzierung der häufig angeführten Wirkungsgrad-Vorteile von batterie-elektrischen Antrieben. Bei Berücksichtigung der Kosten für die Zwischenspeicherung und der sehr niedrigen Strompreise in Zeiten von überschüssigem Strom entstehen sogar Vorteile für Wasserstoff als Energieträger. Findet die Wasserstoffherzeugung zusätzlich in Regionen mit sehr viel Wind- oder Sonnenenergie statt, bietet der Import von Wasserstoff weitere interessante Perspektiven für dessen Nutzung im Verkehrssektor. Gleichzeitig ist zu erwarten, dass die Verfügbarkeit von Rohstoffen den sehr breiten Einsatz von Batterien limitieren wird. Für viele Fahrzeuge macht, ganzheitlich betrachtet, die Verwendung von Wasserstoff und dessen Umwandlung in Strom über eine Brennstoffzelle sehr viel Sinn. Für kleine Fahrzeuge, die eher wenig und über kürzere Strecken genutzt werden, bleibt der batterie-elektrische Antrieb attraktiv.

Einleitung

Woher wird künftig die Energie für den emissionsfreien Transport von Gütern und unsere Mobilität kommen? Die einfache Antwort: der Strom kommt aus der Steckdose und der Wasserstoff aus der Zapfsäule, so wie bisher bei Benzin und Diesel. Natürlich wird der CO₂-freie Strom zum Laden der Batterien und zur Erzeugung von Wasserstoff aus Erneuerbaren Energien produziert, das heißt primär aus Sonne und Wind. Aber was ist, wenn keine Sonne scheint und kein Wind weht? Diese eigentlich sehr naheliegende Frage wird bislang kaum gestellt. Die notwendige Zwischenspeicherung von Erneuerbarem Strom als Antwort auf diese Frage hat großen Einfluss auf die gerne diskutierten Wirkungsgrade und die künftigen Kosten für Strom und Wasserstoff. Eine erste, qualitative Betrachtung der künftigen Stromerzeugung und ihre Anwendung für den Verkehrssektor macht dies deutlich.

Mobilität, Gütertransport und Energieversorgung heute

Mit der Serienproduktion des Model T begann Henry Ford 1908 die Welt zu verändern. Heute sind weltweit mehr als 1.300 Millionen Fahrzeuge unterwegs. Fast alle werden mit fossilen Kraftstoffen in Verbrennungsmotoren angetrieben. Sie sind eine der Hauptquellen der globalen CO₂-Emissionen. Gleichzeitig sind die Automobil- und die Mineralöl-Industrie die beiden größten Branchen weltweit und von großer Bedeutung für viele Volkswirtschaften und deren Wohlstand.

Aber nicht nur Fahrzeuge werden mit Benzin- und Diesel-Kraftstoff angetrieben, auch der größte Teil unserer Energieversorgung ist fossil geprägt. Weltweit, wie auch in Deutschland, basiert diese zu fast 80 Prozent auf den Energieträgern Kohle, Erdöl und Gas. Das schließt die Erzeugung von Wärme (Gebäudeheizung, Prozesswärme), die Verwendung als Grundstoff in der Industrie sowie die Erzeugung von Strom ein. Abbildung 1 skizziert vereinfacht diese Zusammenhänge.

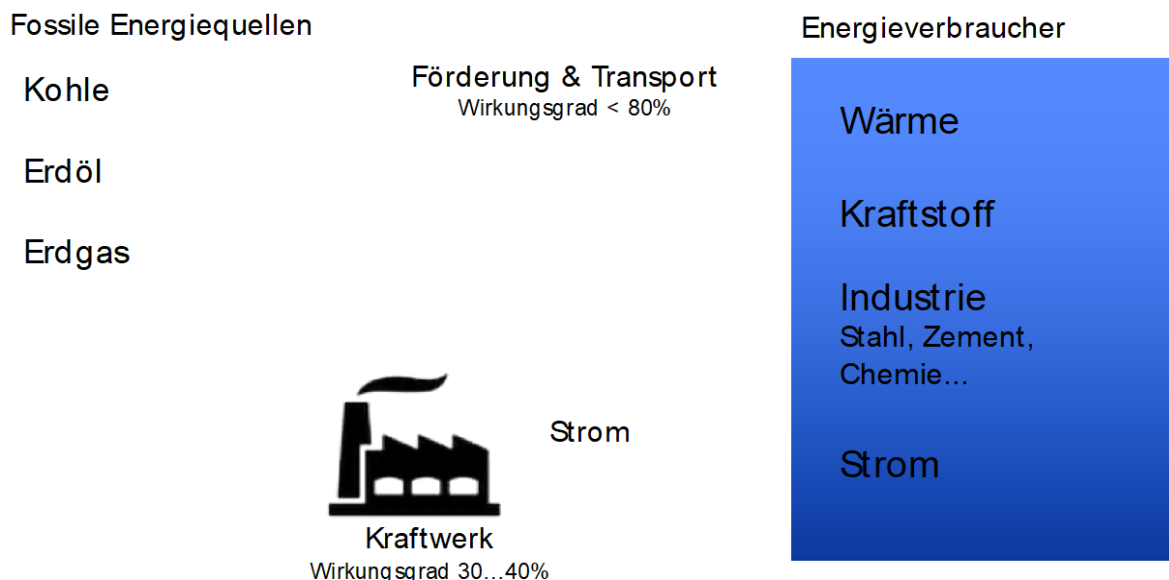


Abbildung 1: Die heutige Energieversorgung basiert zu etwa 80 Prozent auf fossilen Energien, weltweit, wie auch in Deutschland

Der schnell voranschreitende Klimawandel, Nachhaltigkeit, sowie Umwelt- und Ressourcenschonung, fordern einen radikalen Umbau unseres kompletten Energiesystems. Wie in Abbildung 2 vereinfacht dargestellt, sollte die Energie für alle Verbraucher so schnell wie möglich aus Erneuerbaren Energien erzeugt werden. Das wird zum allergrößten Teil durch Strom aus Photovoltaik und Windkraftanlagen realisiert werden. Die globalen Investitionen in diese beiden Technologien lagen in den letzten Jahren bei je knapp 300 Milliarden Dollar und führten dazu, dass die Stromgestehungskosten aus Wind und Sonne sehr niedrig wurden, in vielen Fällen sogar niedriger als die von klassischen Kraftwerken. Bislang war allerdings noch keine Umkehr beim globalen Anstieg der CO₂-Emissionen erkennbar – das globale Wachstum, basierend auf 80 Prozent fossilen Energien, war schneller als der Ausbau der Erneuerbaren

Energien. Deshalb muss der Ausbau der Erzeugung von grünem Strom noch deutlich schneller vorangetrieben werden.

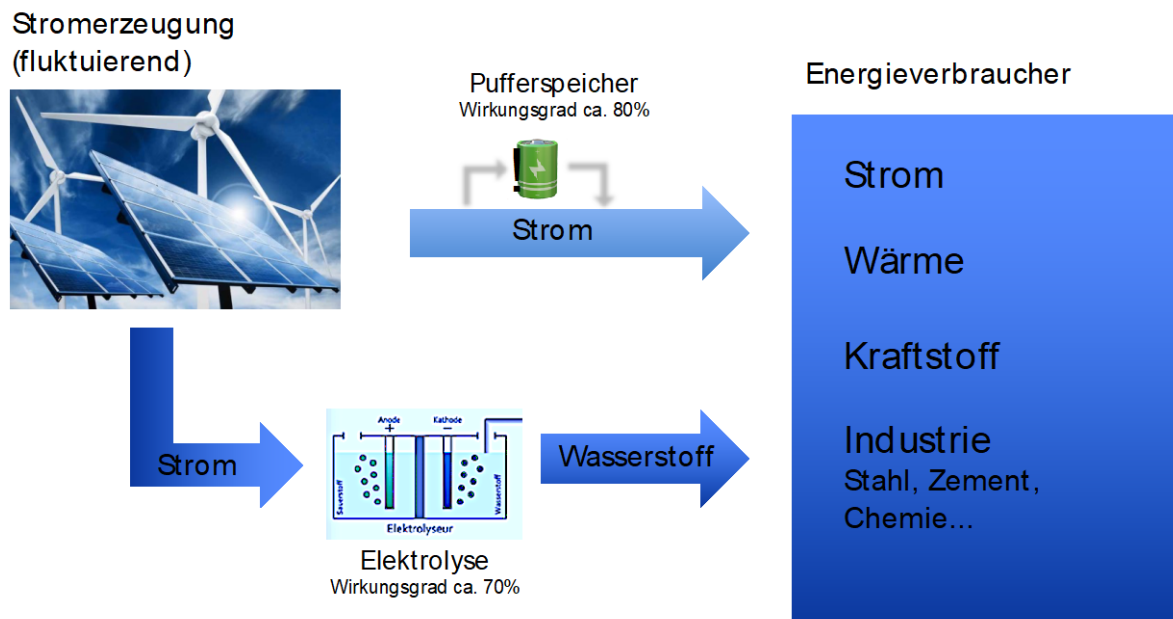


Abbildung 2: Energieversorgung auf der Basis Erneuerbarer Energien, wie sie für die Erreichung der Klimaziele erforderlich ist

Energiewende und die Verfügbarkeit von grünem Strom

Bei der Erzeugung von Strom aus Sonne und Wind ist deren Fluktuation für die Auslegung des künftigen Energiesystems von größter Bedeutung. Nachts scheint keine Sonne, und der Wind weht auch nicht jeden Tag und in gleicher Stärke. Saisonale und regionale Unterschiede sind sehr groß, wie eindrücklich aus Strahlungs- und Windkarten ersichtlich ist. Der Verbrauch von Strom folgt aber einem ganz anderen Rhythmus: geprägt von Tag/Nacht, Sommer/Winter oder Wochenende/Arbeitstage.

Nachdem Deutschland bereits heute etwa 50 Prozent seines Stromes aus Erneuerbaren Energien erzeugt, lassen sich diese Zusammenhänge sehr schön an realen Daten ablesen und in die Zukunft projizieren. Abbildung 3 zeigt die Stromerzeugung in einer Woche, wie sie in den Wintermonaten häufig auftritt und als „Dunkelflaute“ bezeichnet wird. An vielen Tagen werden bis zu 80 Prozent des Strombedarfs von Kernkraft, Kohle und Erdgas bereitgestellt. Kern- und Kohlekraftwerke werden nach dem Beschluss der Bundesregierung in den nächsten Jahren abgeschaltet und Erdgaskraftwerke haben nur noch eine Chance als Brückentechnologie, wenn es gelingen sollte, das bei der Verbrennung entstehende CO₂ abzuscheiden und für immer in alten Lagerstätten zu speichern (sequestrieren). Fallen diese 80 Prozent fossilbasierter Stromerzeugung für solchen Wintertage weg, müssten sie durch Erneuerbaren Strom kompensiert werden, der aktuell nur zu etwa 20 Prozent zur Versorgung beisteuert. Das heißt, die heute installierte Leistung an Photovoltaik und Windkraft (etwa 120 Gigawatt) müsste um den Faktor 4 erhöht werden, um zu diesen Zeiten immer genügend

Strom zur Verfügung zu haben. Wenn zukünftig alle Anwendungen (Abbildung 2) mit Erneuerbaren Energien versorgt werden sollen, verdoppelt sich der Strombedarf im Vergleich zu heute. Dazu gehört auch die Fahrzeugflotte, die künftig elektrisch fahren soll und alleine einen Strombedarf von geschätzt etwa 200 Terrawattstunden hat. Der Bedarf an installierter, grüner Leistung wäre damit an den kritischen Tagen sogar um den Faktor acht höher als heute. Das wäre nicht nur extrem teuer, sondern würde gleichzeitig in den wind- und sonnenreichen Monaten zu einem riesigen Überschuss an Strom und einer massiven Ressourcenvergeudung führen.

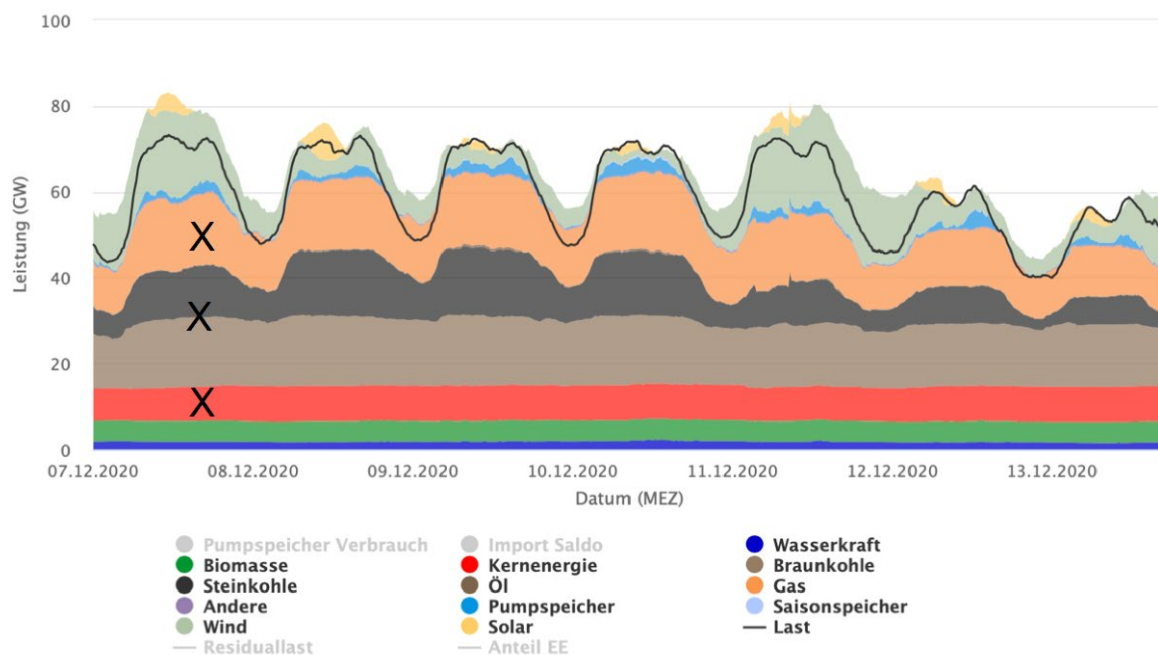


Abbildung 3: Stromerzeugung und -verbrauch in Deutschland in einer typischen Dezemberwoche. X = diese Kraftwerke sollen künftig wegfallen [1]

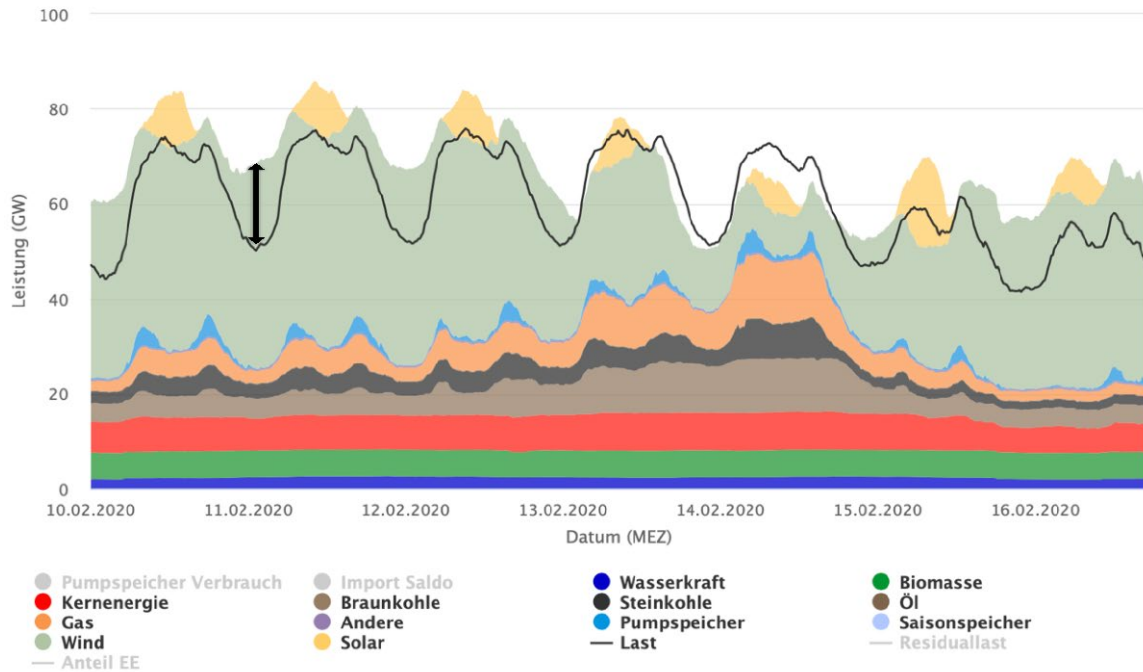


Abbildung 4: Stromerzeugung und -verbrauch in Deutschland in einer windreichen Februarwoche. Der Pfeil zeigt den Überschussstrom während der Nacht an [1]

Abbildung 4 zeigt als Beispiel eine sehr windreiche Woche im Februar 2020. An solchen Tagen werden heute schon bis zu 80 Prozent der Last über grünen Strom bereitgestellt. Besonders nachts und an den Wochenenden werden bis zu 15 Gigawatt (GW) Überschuss produziert. Dieser wird heute für etwa 3,8 Cent pro Kilowattstunde an die Nachbarländer verkauft [1]. Aufgrund von Engpässen in den Stromleitungen wurden in den letzten Jahren darüber hinaus regelmäßig Windräder abgeschaltet. Das führt zu Mehrkosten für die Stromkunden von jährlich etwa 1,5 Milliarden Euro. Auch die Preise an der Strombörse sind in Zeiten von Überschussstrom sehr niedrig. Immer häufiger wird der Strom sogar zu negativen Preisen gehandelt. Mit dem schnell notwendigen Ausbau der Wind- und Sonnenenergie wird sich dieser Trend noch weiter steigern. Der dadurch entstehende ökonomische Hebel zur Verbrauchslenkung reicht jedoch nicht aus, das grundsätzliche Problem zu lösen – kaum jemand wird mit dem Laden seines Fahrzeuges warten wollen oder können, bis es wieder genügend und dann billigen Strom gibt.

Den überschüssigen Strom für die wind- und sonnenarmen Zeiten zu speichern wird deshalb zum entscheidenden Faktor. Die überschüssigen Strommengen von wind- und sonnenreichen Tagen, die bis zu ihrem Verbrauch teilweise über Wochen für die Dunkelflauten zu speichern sind, liegen im Bereich von vielen Terrawattstunden (TWh). Für Pumpspeicherkraftwerke sind die geografischen Möglichkeiten der Stromspeicherung in Deutschland bereits ausgeschöpft und die Stromspeicherung mit Batterien für derart große Energiemengen ist ökonomisch unrealistisch, da aufgrund der geringen Zahl an Lade-/Entladezyklen eine Amortisation nur über sehr hohe Preise für den zwischengespeicherten Strom machbar wäre. Große Strommengen über längere Zeiträume können nur sinnvoll in Form von Wasserstoff gespeichert werden (Abbildung 5) [2].

Aus Abbildung 4 kann man auch abschätzen, dass bei der zu erwartenden Verdopplung des Strombedarfs, die Stromerzeugung über einen Ausbau einheimischer Erneuerbaren Energien – insbesondere bei der Photovoltaik – machbar erscheint.

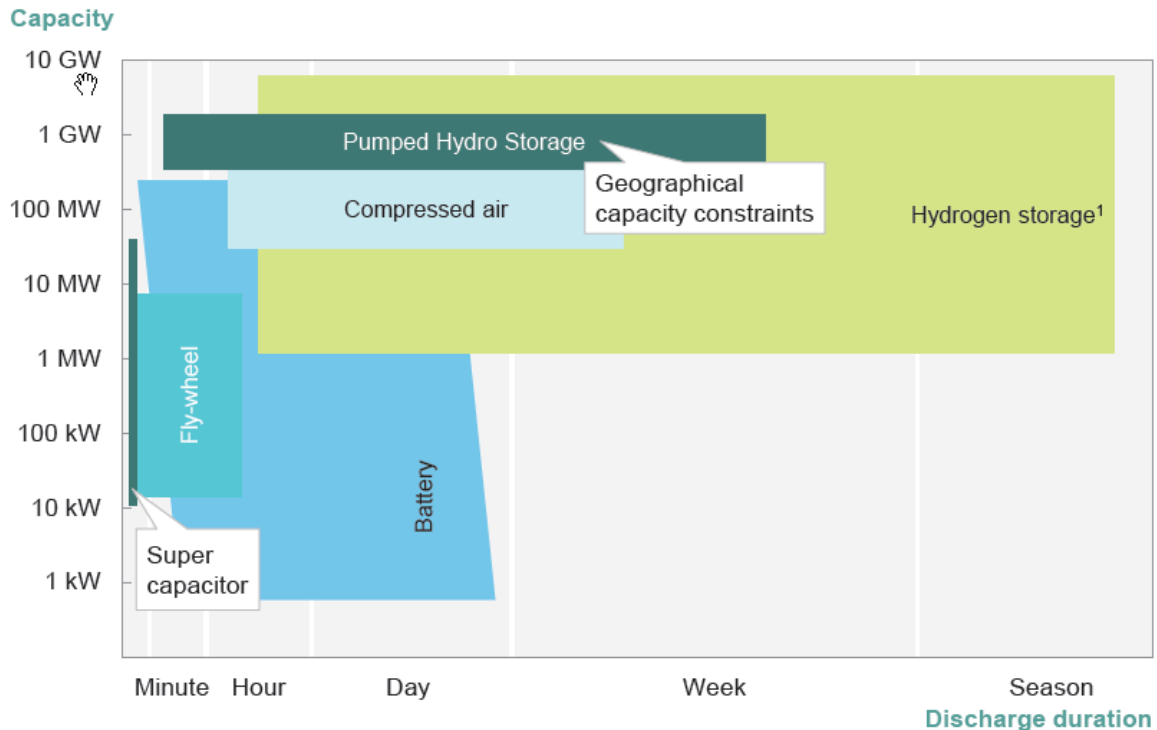


Abbildung 5: Vergleich der Technologien zur Stromspeicherung in Abhängigkeit von Leistung und Dauer der Speicherung [2]

Elektrofahrzeuge mit Batterie und Wasserstoff

Was bedeutet das alles für die Mobilität und den Transport von Gütern mit Elektroantrieben? Die Diskussion, ob batterie-elektrische Fahrzeuge besser sind als diejenigen, die den Strom aus Wasserstoff über eine Brennstoffzelle erzeugen, wird häufig stark vereinfacht, teilweise sogar ideologisch und deshalb nicht evidenzbasiert geführt. Erst die Analyse der künftigen Stromerzeugung auf der Basis von Erneuerbaren Strom und der zeitliche Abgleich mit dem Stromverbrauch ermöglicht eine differenzierte Analyse der Zusammenhänge. Erst dann können Wirkungsgrade sinnvoll berechnet werden, wie auch die Stromkosten als Folge von Angebot und Nachfrage.

Der direkte Wirkungsgrad eines batterie-elektrischen Antriebes (vom Tank zum Rad) liegt bei etwa 80 Prozent (ohne die Verluste beim Laden) und bei einem Brennstoffzellen-Antrieb bei etwa 60 Prozent. Bei letzterem wird die Wärme zum Heizen des Fahrgastraumes allerdings kostenlos mitgeliefert, was bei Batterien nicht der Fall ist und bei den meisten Analysen nicht berücksichtigt wird. Der Wirkungsgrad ist direkt mit den Verbrauchswerten des Fahrzeuges gekoppelt, die nach einem standardisierten Fahrzyklus ermittelt werden und auf den Verkaufsprospekten angegeben sind: für eine größere Limousine sind das zum Beispiel 20 Kilowattstunden (kWh) mit einem batterie-elektrischen Antrieb, oder 0,9 kg Wasserstoff (das

sind 30 kWh) für einen Brennstoffzellen-Antrieb oder 5 l Diesel (das sind 50 kWh) für einen Verbrennungsmotor mit Mild-Hybrid.

Für die Erzeugung des grünen Stroms zum Laden der Batterie im Fahrzeug, eröffnet sich eine sehr große Vielfalt an möglichen Szenarien. Ideal ist es, die Batterie des Fahrzeuges bei Sonnenschein direkt mit dem Strom aus der Photovoltaik auf dem Dach des Hauses zu laden. Es entstehen nur relativ geringe Verluste bei der Wandlung des Gleichstromes der Photovoltaik in Wechselstrom und dessen Rückwandlung in Gleichstrom zum Laden der Batterie im Fahrzeug, in Summe etwa 15 Prozent. Das andere Extrem kann so aussehen: Der Strom wurde in windreichen Zeiten in Wasserstoff umgewandelt (70 Prozent Wirkungsgrad) und wird über eine Gasturbine rückverstromt (40-50 Prozent Wirkungsgrad). Das Fahrzeug soll dann mit hoher Leistung sehr schnell geladen werden. Da häufig mehrere Fahrzeuge gleichzeitig im Ladepark Strom tanken und das Netz vielleicht nicht auf eine Leistung von vielen Megawatt ausgelegt ist, kann noch ein Pufferspeicher notwendig werden. Der Wirkungsgrad über die gesamte Kette errechnet sich durch die Multiplikation der Wirkungsgrade der einzelnen Schritte. Damit reduziert sich der Wirkungsgrad für die Strombereitstellung schnell auf nur noch 25 Prozent.

Wie sieht es bei Wasserstoff aus? Für dessen Erzeugung über die Elektrolyse von Wasser wird in der Regel mit einem Wirkungsgrad von 70 Prozent gerechnet. Für den Wasserstofftransport über eine Pipeline liegen die Verluste bei etwa 5 Prozent (ähnlich wie beim Strom) und für die Kompression an der Tankstelle bei etwa 10 Prozent. In Summe sind das deutlich weniger Verluste im Vergleich zum Laden einer Batterie, wenn der Strom über längere Zeiträume zwischengespeichert werden muss und dann auch noch Schnellladen gefordert ist.

Aber macht es überhaupt Sinn, einen Wirkungsgrad für die Erzeugung eines speicherbaren Energieträgers zu berechnen, wenn der Strom gerade im Überschuss vorhanden ist und sonst nicht genutzt werden kann? In den Zeiten von Überschussstrom werden die Preise dafür sehr niedrig sein. Die relativ einfache Speicherung von Wasserstoff in Gastanks oder Kavernen löst das Dilemma der zum Teil extremen Unterschiede zwischen Erzeugung von grünem Strom und dessen Verbrauch. Wasserstoff wird in einer entwickelten Wasserstoffwirtschaft auch dort erzeugt werden, wo Strom aus Wind (z.B. Offshore Windparks) oder Sonne (z.B. Solarparks in der Wüste) sehr kostengünstig produziert werden kann. Analysen rechnen mit Herstellkosten von unter 2 \$ pro Kilogramm bis 2030 und von 1 \$ pro Kilogramm bis 2050 [3]

In Deutschland gibt es fast 48 Millionen PKW und 6 Millionen Nutzfahrzeuge. Viele der PKW und ein Großteil der Nutzfahrzeuge sind tagsüber auf den Straßen unterwegs und können nur nachts geladen werden. Dann sollte der grüne Strom in ausreichender Menge flächendeckend und zeitgleich in den jeweiligen Netzen zur Verfügung stehen. Aus dieser einfachen Überlegung lässt sich abschätzen, dass die heutigen Netze durch das gleichzeitige Laden schnell überlastet wären und eine Verschiebung der Ladezeiten häufig an den für das Laden zur Verfügung stehenden Zeitfenstern scheitern wird. Ein weiterer, kritischer Aspekt ist die sehr hohe Zahl an Ladesäulen, die aufgrund der langen Ladezeiten (trotz schnellem Laden) notwendig ist. Die Bundesregierung fordert eine Million öffentlicher Ladepunkte. Bei Wasserstoff würden die heutigen 14.000 Tankstellen ausreichen. Das Tanken mit Wasserstoff dauert gleich lang, wie das Tanken von Benzin.

Import von grünem Strom oder Wasserstoff

Viele Studien zu einer 100%-Versorgung mit grünem Strom gehen davon aus, dass irgendwo in Europa fast immer die Sonne scheint oder der Wind weht und mit einem starken Ausbau der europäischen Stromnetze die Versorgung mit dem Verbrauch in Einklang zu bringen ist. Eine Kopplung der europäischen Stromnetze ist zunächst mehr als sinnvoll und schreitet auch voran. Nachdem ein Ausbau der Stromnetze innerhalb Deutschlands jedoch auf sehr viel Widerstand aus der Bevölkerung stößt und Jahrzehnte beanspruchen wird, bleibt der Ausbau auf europäischer Ebene für lange Zeit eine Vision. Gleichzeitig besteht europaweit bereits ein gut ausgebautes Netz an Erdgasleitungen, dass mit überschaubarem Aufwand auf Wasserstoff umgerüstet werden kann. Über eine große Pipeline lässt sich in Form von Wasserstoff etwa 10-mal so viel Energie transportieren als über eine Höchstspannungsleitung [4]. Damit ließe sich aus den sonnen- und windreichen Regionen rund um das Mittelmeer relativ einfach Wasserstoff in ganz Europa verteilen und der Ausbau der europäischen Stromnetze zu diesem Zweck würde unnötig. Über Wasserstoff könnten nicht nur die Industrie, sondern auch die vielen Nutzfahrzeuge und Limousinen mit grüner Energie versorgt werden. Für Europa bietet diese Eigenversorgung mit Energie darüber hinaus die große Chance, geopolitische Abhängigkeiten zu reduzieren und die eigene Wertschöpfung zu erhöhen.

Materialeinsatz und Rohstoffe

Die Speicherung von Strom in Akkumulatoren (Batterien) ist direkt mit dem Einsatz der Speichermaterialien und Bauteile einer Batterie gekoppelt. Das Gewicht der Batterie in größeren Limousinen liegt zwischen 500 und 700 Kilogramm und 70 Prozent davon entfallen auf die Speichermaterialien. Bei Nutzfahrzeugen reicht das Gewicht der Batterien von 2,5 bis zu 5 Tonnen. Damit sind diese batterie-elektrischen Antriebe etwa doppelt so schwer wie Elektroantriebe mit Wasserstoff und Brennstoffzelle. Das liegt an der etwa 4-fach höheren Energiedichte für die Speicherung von Wasserstoff (700 bar, Wirkungsgrad eingerechnet) im Vergleich zu Batterien [4]. Mit der sehr hohen Leistungsdichte heutiger Brennstoffzellen benötigen diese nicht mehr Einbauraum als der klassische Verbrennungsmotor.

Um alle Fahrzeuge der Welt mit großen Batterien auszurüsten, reicht die Verfügbarkeit vieler Rohstoffe – wie Kupfer und Nickel - bei weitem nicht aus [4]. Das Recyclen der Rohstoffe wird essentiell. Allerdings werden recycelte Materialien erst mit einer zeitlichen Verzögerung von 10 bis 20 Jahren (Nutzungsdauer der Batterien) wieder verfügbar. Bei den sehr hohen Wachstumsraten der nächsten Jahre und Jahrzehnte in der Batterieproduktion kann deshalb recyceltes Material nur eine untergeordnete Rolle spielen. Bei chemischen Energieträgern wie Wasserstoff oder auch Methanol, Methan oder Ammoniak ist die Energiespeicherung nur mit relativ geringem Materialaufwand verbunden (z.B. Stahltanks, Kavernen). Beim Energiewandler Brennstoffzelle sind Edelmetalle als kritische Rohstoffe zu sehen. Hier kommt allerdings der Vorteil zum Tragen, dass die Brennstoffzelle Verbrennungsmotoren substituiert, in denen die gleichen Edelmetalle für die Abgastechnik eingesetzt werden. Durch den Substitutionseffekt stehen diese für die Brennstoffzelle zur Verfügung. Hinzu kommt, dass die PTM-Edelmetalle relativ einfach recycelt werden können.

Die Rohstoffproblematik lässt sich deshalb nur mit einem ausgewogenen Mix aus den beiden emissionsfreien Technologien, von batterie-elektrischen Antrieben und Elektroantrieben mit Wasserstoff/Brennstoffzelle, lösen [4].

Abbildung 6 fasst die vielfältigen Aspekte der Nutzung der Antriebstechnologien der Zukunft zusammen.

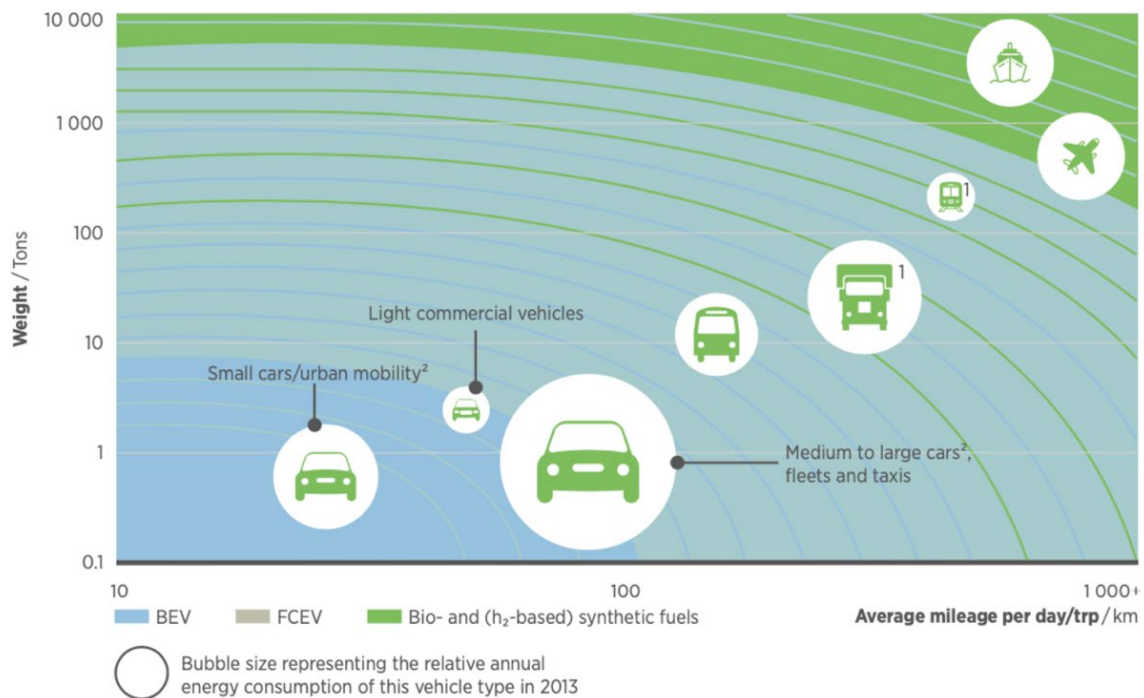


Abbildung 6: Vergleich von batterie-elektrischen Antrieben (BEV) mit Elektroantrieben auf Basis von Wasserstoff/Brennstoffzelle (FCEV) und mit klassischen Antrieben mit synthetischen Kraftstoffen (Bio- and H₂-based synthetic fuels) in Abhängigkeit von Gewicht (weight) und täglicher Fahrstrecke [2].

Fazit

Die heute häufig genutzte, sehr plakative Argumentation, dass Elektroantriebe mit Wasserstoff aufgrund des schlechteren Wirkungsgrades nicht sinnvoll seien, ist extrem vereinfachend und hält einer ganzheitlichen Betrachtung nicht Stand. Bei der zukünftig angestrebten Stromerzeugung, die primär auf Sonne und Wind basieren wird, ist die Gleichzeitigkeit der Stromnutzung zum Laden von Fahrzeugbatterien durch deren starke Fluktuation eher die Ausnahme als die Regel. Damit wird Zwischenspeicherung des Stroms eine wichtige Rolle spielen. Das bedeutet allerdings auch eine deutliche Reduzierung der Wirkungsgrad-Vorteile von batterie-elektrischen Antrieben. Bei Berücksichtigung der Kosten für die Zwischenspeicherung und der sehr niedrigen Strompreise in Zeiten von überschüssigem Strom entstehen sogar Vorteile für Wasserstoff als Energieträger. Findet die Wasserstoffherzeugung zusätzlich in Regionen mit sehr viel Wind- oder Sonnenenergie statt, bietet der Import von Wasserstoff weitere interessante Perspektiven für dessen Nutzung im Verkehrssektor. Die Verfügbarkeit von Rohstoffen wird den sehr breiten Einsatz von Batterien limitieren. Ganzheitlich betrachtet, ist deshalb die Verwendung von Wasserstoff und dessen

Umwandlung in Strom über eine Brennstoffzelle für viele Fahrzeuge sinnvoll. Für kleine Fahrzeuge, die eher wenig und über kürzere Strecken genutzt werden, bleibt der batterieelektrische Antrieb attraktiv.

Literaturverzeichnis

[1] Energy Charts, Fraunhofer ISE, <https://energycharts.info/charts/power/chart.htm?l=de&c=DE>

[2] Hydrogen Council, Hydrogen Scaling Up, 2017
https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-Scaling-up_Hydrogen-Council_2017.compressed.pdf

[3] Siemens Energy, Cascade Gastransport, Whitepaper, Hydrogen infrastructure – the pillar of energy transition, 2020
<https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:3d4339dc-434e-4692-81a0-a55adbcaa92e/200915-whitepaper-h2-infrastructure-en.pdf>

[4] R.Wurster, W.Tillmetz, The Impact of Fuel Cell and Battery Electric Vehicles on Critical Materials and Energy Supply , Ulm Electrochemical Talks (UECT), 2018

Die Autoren

Prof. Dr. Werner Tillmetz

w.tillmetz@web.de

Mitglied der Fakultät für Naturwissenschaften der Universität Ulm (emeritiert)

Fachinteressen: Batterien, Brennstoffzellen, Wasserstoff, Mobilität, Energie und Innovation

Dipl.-VW André Martin

andre.martin-nc@t-online.de

André Martin Consulting – Management- und Technologieberatung

Fachinteressen: Innovation, Strategie, Brennstoffzellen, Wasserstoff, Mobilität

Batterien: Game Changer für die globale Energiewende

Daniel Messling, Dr. Stephan Hensel, Prof. Dr. Maximilian Fichtner
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Abstract

Die elektrochemische Energiespeicherung ist eine der Schlüsseltechnologien der nächsten Jahrzehnte mit zunehmender Relevanz in allen Anwendungsbereichen, von der Mikrobatterie bis zur Großbatterie. Lithium-Ionen-Batterien haben nicht nur die Revolution in der Unterhaltungselektronik ermöglicht, sie ermöglichen auch den elektrisch angetriebenen Transport und werden wesentlich zur Energiewende beitragen, indem sie elektrische Energie für die effiziente Nutzung intermittierender erneuerbarer Energien wie Sonne oder Wind in dezentralen Anlagen zwischenspeichern. Während diese Anwendungen entweder bereits realisiert wurden oder in Sicht sind, ist eine schnell steigende Nachfrage nach zukünftigen Batterien zu beobachten, die Folgendes umfassen:

- Nachhaltige Materialien und Herstellungsprozesse
- Erhöhte volumetrische/gravimetrische Energiedichte
- Eigensichere Konstruktion
- Lange Betriebs- und Lagerfähigkeit
- Niedriger Preis pro kWh
- Second-Life- und Recycling Optionen

Zwischen den Forschungsstandorten Ulm und Karlsruhe hat sich sukzessive aus unterschiedlichsten Institutionen ein Netzwerk zur Batterieforschung gebildet, das zu den größten weltweit gehört. Seit dem Jahr 2011 bündeln das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die Universität Ulm und das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) ihre Kompetenzen in der Batterieforschung im Helmholtz-Institut Ulm. Über die zu Beginn des Jahres 2018 gegründete Forschungsplattform CELEST (Center for Electrochemical Energy Storage Ulm | Karlsruhe) wird die standortübergreifende Zusammenarbeit in den Bereichen der elektrochemischen Energiespeicherung und -wandlung weiter intensiviert.

Hauptteil

Batterien können einen Game Changer für die globale Energiewende darstellen. Die Lithium-Ionen-Batterie ist im Moment der meist genutzte Batterietyp unter den Hochleistungsakkus, da sie hohe Spannungen und damit hohe Energiedichten bietet. Allerdings scheinen die derzeit verwendeten Batteriechemien mittel- und langfristig nicht nachhaltig zu sein und bergen ein Risiko für Lieferengpässe. [1] Zudem stößt die weitere Steigerung der Lithium-Packungsdichten in den Wirtsmaterialien an ihre natürlichen Grenzen. [2, 3]

Die Vorkommen für Lithium liegen zu großen Teilen im außereuropäischen Ausland und sind auf wenige Staaten konzentriert. Dies macht eine stabile Versorgung unsicher. Daher hat die Europäische Kommission Lithium auf ihre Liste der kritischen Rohstoffe gesetzt. Für Elektrofahrzeugbatterien und stationäre Energiespeicherung würde die EU, verglichen mit der derzeitigen Versorgung der gesamten EU-Wirtschaft, 2030 bis zu 18-mal mehr Lithium und 2050 fast 60-mal mehr Lithium benötigen. Dieser Nachfrageanstieg könnte unter heutigen Bedingungen zu Versorgungsengpässen führen. [4]

Komplizierter ist die Versorgungslage beim Metall Kobalt. Dieses gibt es grundsätzlich nur äußerst selten - nur 0,004 Prozent der Erdkruste bestehen daraus. Derzeit gehen ca. 60 Prozent des geförderten Kobalts in die Akkuproduktion (vor allem für Handys und Notebooks, die hohe Kobaltanteile enthalten). 60 Prozent des weltweit abgebauten Kobalts stammen aus dem Kongo. [5] Aufgrund fehlender Arbeitsschutzmaßnahmen im Kleinbergbau kommt es häufiger zu tödlichen Unfällen. Gleichzeitig werden Kinder teilweise für schwerste und risikoreiche Arbeiten in Vollzeit eingesetzt. Mittelfristig wird versucht, kein Kobalt mehr in den Batterien nutzen zu müssen. [6] Der chinesische Batterie- und Fahrzeughersteller BYD und TESLA verwenden bereits heute kobalt- und nickelfreie freie Batterien auf Eisenbasis in ihren neueren Modellen. VW und PSA haben angekündigt, dies ebenfalls zu tun.

Neue, nicht auf Lithium basierende Speichersysteme besitzen das Potential, die Grenzen der Lithium-Ionen-Technologie zu überwinden und möglichen Engpässen bei der Verfügbarkeit der verwendeten Materialien zu begegnen. Diese Systeme verwenden nachhaltigere Ladungsträger wie z.B. Natrium (Na), Magnesium (Mg), Zink (Zn), Calcium (Ca), Aluminium (Al) und Chlor (Cl) -Ionen und werden „Post-Lithium“-Systeme genannt. Sie stellen eine vielversprechende langfristige Option für Massenanwendungen in stationärer und mobiler Energiespeicherung.

Für Anwendungen, bei denen die volumetrische Energiedichte besonders wichtig ist, wie z. B. in mobilen Geräten, können Ionen, die mehr als eine Elementarladung tragen, wie z. B. Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , von Vorteil sein. Aber auch einfach geladene Ionen wie Na^+ und Cl^- , die deutlich häufiger vorkommen als Lithium, sind vielversprechende Alternativen, z. B. in stationären Anwendungen. Alle diese Alternativen haben intrinsische Eigenschaften, die die aktuelle Lithium-Technologie zukünftig erreichen oder übertreffen können und gleichzeitig nachhaltiger sind. [7, 8]

Auf dem Weg zu einer Kommerzialisierung dieser Post-Lithium Systeme müssen noch einige Hürden genommen werden:

- Niedrige Mobilität von Ionen in Festkörpern und Flüssigkeiten
- Fehlen maßgeschneiderter Materialgrenzflächen mit geeigneten Ladungstransfer Eigenschaften
- Schnelle Alterung von Aktivmaterialien und Elektrolyt
- Unzureichende Reversibilität bei Be- und Entladeprozessen

Zwei sehr vielversprechende Materialien sind Natrium und Magnesium. Die Natrium-Ionen-Batterie gehört zu den am weitesten fortgeschrittenen Post-Lithium-Technologien. Sie steht im Vergleich zu anderen Alternativen bereits näher an der Markteinführung. Natrium hat jedoch zwei Nachteile: Es ist dreimal so schwer wie Lithium. Die niedrigere Speicherkapazität bisher bekannter Materialien und die etwas niedrigere Zellspannung führen insgesamt dazu, dass die mittlerweile kommerziell erhältlichen Natrium-Ionenbatterien im Vergleich zu aktuellen Li-Ionen-Batterien etwa die Hälfte des Energieinhalts pro Masse und Volumen der Batterie besitzen. Die Markteinführung von Natrium-Ionen-Batterien wird sich deshalb auf Anwendungen beschränken, bei denen die Nachteile nicht ins Gewicht fallen, wie bei stationären Speichern. [9]

Natrium stellt ein nachhaltigeres Batteriematerial dar. Es ist eines der häufigsten Elemente auf der Erde, findet sich im Meersalz und ist überall auf der Welt verfügbar, was zu niedrigeren Kosten und größeren Produktionsmengen führen könnte. Außerdem verbraucht die Natrium-Ionen-Technologie keine knappen Ressourcen: Kobalt oder ähnlich seltene Ressourcen werden nicht benötigt. Noch umweltschonender wird die Natrium-Batterie, wenn für die Anode ein Kohlenstoff genutzt wird, der aus Biomasse, wie Apfelresten oder Erdnussschalen hergestellt wird. [10]

Magnesium bietet viele nützliche Eigenschaften für die elektrochemische Energiespeicherung: Es ist in hohem Maße auf der Erde vorhanden und ungiftig, es transportiert zwei Ladungen pro Magnesium-Ion anstatt nur einer (wie z.B. Lithium), und es ermöglicht hinreichend hohe Zellspannungen. [11] Zudem gelten Magnesium-Batterien als noch sicherer als die Lithium-Ionen-Batterie, bei der es, im Gegensatz zu Magnesium-Batterien, zu durch Ablagerungen an den Elektroden verursachten Kurzschlüssen kommen kann. [12] Damit hat die Magnesium-Batterie großes Potential, sich zu einer sicheren, nachhaltigen und leistungsfähigen Batterietechnologie zu entwickeln. Auf dem Weg zu einer wettbewerbsfähigen Magnesium-Batterie muss die Forschung allerdings noch zahlreiche elektrochemische Hindernisse beseitigen.

Mit dem Konzept - der Erforschung von Post-Lithium-Batterien - haben sich das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die Universität Ulm, das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) und die Universität Gießen in der Exzellenzstrategie von Bund und Ländern - als einziger deutscher Exzellenzcluster für die Batterieforschung - durchgesetzt. 2019 nahm der Exzellenzcluster POLiS (Post Lithium Storage) mit einer Förderperiode von sieben Jahren und einem Volumen von 47 Mio. Euro seine Arbeit auf. [13]

Die Forschungsaktivitäten von POLiS konstituieren eines von drei Forschungsfeldern der Plattform CELEST (Center for Electrochemical Energy Storage Ulm | Karlsruhe). [14] Ebenso dazu gehören die Forschungsfelder „Lithium-Ionen-Batterien“ und „Alternative elektrochemische Energiespeichersysteme und -wandler“. Über CELEST bündeln das KIT, die Universität Ulm und das ZSW ihre Aktivitäten in diesen Forschungsfeldern. Hierdurch ist es möglich, Aktivitäten entlang der gesamten Forschungs- und Entwicklungskette, von der Grundlagenwissenschaft bis hin zur Pilotfertigung, zusammenzubringen. So entsteht ein Rahmen für die Beteiligung von Instituten und Forschungseinrichtungen aus Chemie, Physik

und Ingenieurwissenschaften, welcher den interdisziplinären Charakter von CELEST verdeutlicht. CELEST ist darüber hinaus aktiv in der Qualifizierung von Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftlern im gesamten Bereich der elektrochemischen Energiespeicherung durch den Betrieb der Graduiertenschule Electrochemical Energy Storage. Im Bereich Kommunikation wird über die Plattform CELEST ein breites Portfolio an Formaten zu Themen um die Batterieforschung und ihrem Beitrag zur globalen Energiewende angeboten. Hierzu zählen unter anderem kurze Erklärvideos zu grundlegenden und aktuellen Fragen der Energiespeicherung sowie ein Podcast, in dem CELEST Mitglieder sich zu aktuellen Themen ihrer Energiespeicherforschung äußern. [15]

Fazit

In der Summe übertreffen die Entwicklungen im Bereich E-Mobilität alle bisher gesteckten Ziele und Erwartungen und die Entwicklungsgeschwindigkeit ist rasant. Die Speicherkapazitäten der Batteriepacks werden durch neue Entwicklungen im Materialbereich und bei den Batteriedesigns in den nächsten Jahren um mehrere 10 Prozent steigen und die Preise für die Batterien werden voraussichtlich weiter sinken, so dass ab 2022 damit gerechnet werden kann, dass die ersten Batteriefahrzeuge billiger angeboten werden als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor gleicher Fahrzeugklasse. Heutige Fahrzeugbatterien besitzen eine Lebensdauer von 2000 Vollzyklen, was bei einer Reichweite von 400 km pro Ladung etwa 800.000 km entspricht. Die sinkenden Beschaffungskosten, die mittlerweile höhere Lebensdauer im Vergleich zu Verbrennerfahrzeugen, die nicht mehr benötigten Serviceintervalle und der geringere Kraftstoff- bzw. Strompreis haben dazu geführt, dass Batteriefahrzeuge deutlich an Attraktivität gewonnen haben.

2020 war das Jahr, in dem die europäischen Zulassungszahlen für E-Autos erstmals die von Dieselfahrzeugen übertrafen. Wenn sich die Entwicklung, auch mit den derzeit weiter sinkenden Preisen für Fahrzeugbatterien, fortsetzt, werden – schon aus rein ökonomischen Gründen - ab 2025 nahezu ausschließlich Elektroautos verkauft werden.

Allerdings werden für die absehbare starke Steigerung der Batterieproduktion auch deutlich höhere Mengen an Rohstoffen wie Lithium, Nickel, Mangan und Graphit benötigt werden. Hinzu kommt Kobalt, das wegen seiner besonderen Kritikalität im Fahrzeugbereich bereits kurzfristig durch nachhaltigere Lösungen ersetzt werden muss. Im Jahre 2020 kamen die ersten Fahrzeugmodelle auf den Markt, welche mit kobalt- und nickelfreien Batterien ausgestattet sind.

Die stark steigende Nachfrage im Fahrzeugbereich sowie im ebenfalls stark wachsenden Segment der stationären Energiespeicherung machen es erforderlich, auch alternative Lösungen zur elektrochemischen Energiespeicherung in Li-Ionen-Batterien zu entwickeln. Auch wenn diese derzeit die Leistungsdaten einer Li-Ionen-Batterie (noch) nicht erreichen, ist die Verwendung einer nachhaltigen Materialkombination insbesondere bei großvolumigen Batterien mit hohem Materialeinsatz (wie z.B. im Stationärbereich) ein Muss. Die Forschungsstandorte Ulm und Karlsruhe haben sich dazu zu einem der international größten F&E-Verbünde zusammengeschlossen (CELEST), um in diesem Bereich Lösungen zu

erarbeiten. Der gemeinsame Exzellenzcluster POLiS ist eine der weltweit größten Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet.

Literaturverzeichnis

Sammelband:

[1] M. Weil, S. Ziemann, J. Peters, "The issue of metal resources in Li-ion batteries for electric vehicles", in Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles, G. Pistoia and B. Liaw, Editors, (2018) p. 59.

[2] T.B. Reddy, D. Linden, Linden's Handbook of Batteries, 4. ed, McGraw-Hill, New York (2010).

[11] M. Fichtner, "Motivation for a Magnesium Battery", in Magnesium Batteries: Research and Applications, M. Fichtner, Royal Society of Chemistry (2019), p. 1-16.

Fachzeitschrift:

[3] M.M. Thackeray, C. Wolverton, E.D. Isaacs, "Electrical energy storage for transportation-approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries", Energ. Environ. Sci. 5 (2012) 7854

[7] D. Larcher & J-M. Tarascon, „Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage,“ Nature Chemistry volume 7, pages19–29(2015).

[8] T. Placke, R. Kloeppel, S. Dühnen & M. Winter, „Lithium ion, lithium metal, and alternative rechargeable battery technologies: the odyssey for high energy density“, Journal of Solid State Electrochemistry volume 21, pages1939–1964(2017)

[9] K. M. Abraham, „How Comparable Are Sodium-Ion Batteries to Lithium-Ion Counterparts?“, ACS Energy Lett. 2020, 5, 11, 3544–3547

[10] L. Wu, D. Buchholz, C. Vaalma, G. A. Giffin, S. Passerini, "Apple-Biowaste-Derived Hard Carbon as a Powerful Anode Material for Na-Ion Batteries", Chem Electro Chem, Volume3, Issue2, February 2016, Pages 292-298.

[12] M. Jäckle, A. Groß, "Microscopic properties of lithium, sodium, and magnesium battery anode materials related to possible dendrite growth", J. Chem. Phys. 141 (2014) 174710

Internetquelle:

[4] Europäische Kommission. (2020, 9 3). Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>.

[5] Deutsche Rohstoffagentur. Rohstoff Kobalt. [Online]. Available: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/m-kobalt.pdf?__blob=publicationFile&v=4

[6] Fraunhofer. Faktencheck: Batterien für E-Autos. (2020) [Online]. Available: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf>

[13] <https://www.postlithiumstorage.org/de/>

[14] <https://www.celest.de/en/>

[15] <https://www.celest.de/en/news>

Die Autoren

Daniel Messling

Referent für Öffentlichkeitsarbeit des Post Lithium Storage Exzellenzclusters (POLiS)

daniel.messling@kit.edu

Dr. Stephan Hensel

Leiter der Geschäftsstelle des Center for Electrochemical Energy Storage Ulm | Karlsruhe (CELEST)

stephan.hensel@kit.edu

Prof. Dr. Maximilian Fichtner

Sprecher des Post Lithium Storage Exzellenzclusters (POLiS) und Wissenschaftlicher Sprecher des Center for Electrochemical Energy Storage Ulm | Karlsruhe (CELEST)

m.fichtner@kit.edu

Gehen Klimaschutz und Wirtschaftswachstum zusammen?

Prof. Dr. Roland Koenigsdorff, Laurens Bortfeldt
Hochschule Biberach, Biberach University of Applied Sciences

Abstract

Klimaschutz, eine der zentralen Aufgabe des 21. Jahrhunderts zur Gestaltung einer nachhaltigen Zukunft, geht häufig mit der Frage nach den Wechselwirkungen mit dem Wirtschaftswachstum einher. Dabei ist davon auszugehen, dass die Begrenztheit materieller und biologischer Ressourcen eine unbegrenzte Zunahme des Ressourcenverbrauchs nicht zulässt.

Im vorliegenden Beitrag werden grundlegende Trends der Treibhausgasemissionen und des Wirtschaftswachstums aufgezeigt und mit Entwicklungen der Ressourceneffizienz verglichen.

Während bei den Treibhausgasemissionen die Reduzierung in Richtung Treibhausgasneutralität innerhalb der nächsten Generation bei einiger Anstrengung noch möglich erscheint, erfordert eine globale und signifikante Verbesserung der Ressourceneffizienz, z. B. beim Materialfußabdruck, nochmals deutlich stärkere Anstrengungen. Eine Entkopplung durch verstärkte Digitalisierung und positiv-disruptive Veränderungen ist zwar denkbar, bisherige Entwicklungen lassen dies aber nicht erkennen. Alleine darauf zu setzen erscheint sehr riskant.

Ein verstärkter Diskurs in Richtung ganzheitlicher Nachhaltigkeit wird deshalb in Gesellschaft und Wissenschaft als dringend erforderlich angesehen. Dies wird durch die dargestellte Faktenlage gestützt.

Einleitung

Gehen Klimaschutz und Wirtschaftswachstum zusammen? Diese Frage wird kontrovers diskutiert. Und wo sie nicht explizit angesprochen wird, schwingt sie häufig unterschwellig mit oder scheint sogar bewusst vermieden zu werden. Im Kern handelt es sich dabei um vier Einzelfragen:

1. Welche wirtschaftlichen Anstrengungen sind notwendig, um dem Klimawandel hinreichend zu begegnen?
2. Sind diese wirtschaftlichen Anstrengungen leistbar bzw. durchsetzbar?
3. Sind Klimaschutz und Ressourcenschonung überhaupt mit einem auf dauerhaftes Wachstum angelegten Wirtschaftssystem vereinbar?

4. Welche Entwicklungen sind beim Wirtschaftswachstum zu beobachten und für die Zukunft zu vermuten?

Dieser Beitrag kann und will weder alle diese Fragen behandeln, noch eine der Fragen im Detail erschöpfend und eindeutig beantworten. Vielmehr sollen auf Basis vorliegender Daten für Deutschland und die Welt sowie Untersuchungen und Erörterungen Dritter einige Aspekte, vor allem der beiden letzten Fragen, beleuchtet werden. Dabei wird versucht, die Teilbereiche Klimaschutz und Wirtschaftswachstum jeweils wechselseitig aus einer Art Außenperspektive zu betrachten.

Treibhausgas-Emissionen und Treibhausgas-Intensität der Wirtschaftsleistung

Bei den für den Klimaschutz wesentlichen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) zeigt sich für Deutschland ein grundsätzlich positiver Trend (Abb. 1). Gegenüber 1990 gingen die Treibhausgasemissionen Deutschlands bis einschließlich 2020 um 40,8 % zurück. Da in diesem Zeitraum die Wirtschaftsleistung (Bruttoinlandprodukt BIP) nahezu kontinuierlich gewachsen ist, geht dies mit einer Reduktion der THG-Intensität der Wirtschaftsleistung (THG/BIP in Abb. 1) von über 55 % einher. Um das langfristige Ziel einer Treibhausgasneutralität bis 2050 [1] zu erreichen, sind allerdings deutlich stärker ausgeprägte Reduktionsraten erforderlich, welche in Abb. 1 als extrapolierte Kurven von 2021 bis 2050 eingetragen sind.

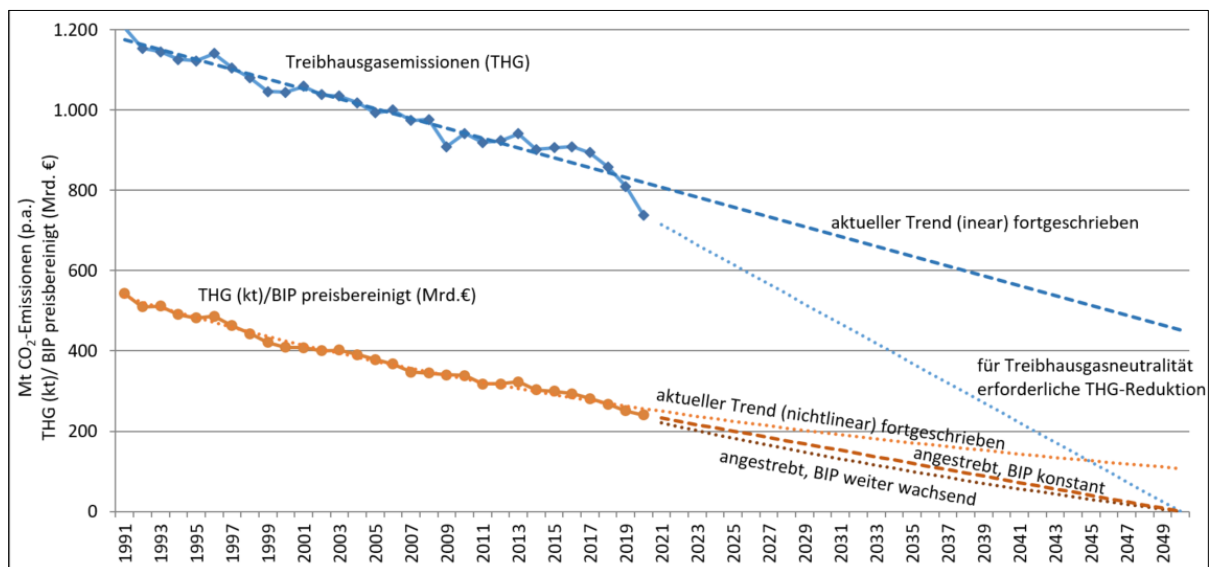


Abb. 1: THG-Emissionen und THG-Intensität der Wirtschaftsleistung (THG/BIP) in Deutschland [2,3]

Im weltweiten Maßstab ist die Situation für den Klimaschutz deutlich ungünstiger und die Herausforderungen für eine Treibhausgasneutralität bis 2050 sind ungleich größer, s. Abb. 2. Ein signifikanter Rückgang der Treibhausgasemissionen war lediglich im Pandemie-Jahr 2020 zu beobachten. Ansonsten gilt es nach wie vor, eine Trendwende erst herbeizuführen.

Aus beiden Abbildungen, Abb.1 und Abb. 2, ist ersichtlich, dass die bisherigen Effizienzfortschritte bei der THG-Intensität der Wirtschaftsleistung (THG/BIP) bei weitem nicht ausreichen, um eine Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen. Die dafür künftig notwendigen Verläufe der Größe THG/BIP stellen in beiden Abbildungen die beiden unteren extrapolierten

Kurven dar, wobei bei Fortschreiten des derzeitigen Wachstumstrends des BIP (jeweils unterste Kurve) anfangs noch größere Anstrengungen erforderlich sind als bei einem auf dem jetzigen Niveau stagnierenden BIP (jeweils die Kurve direkt darüber).

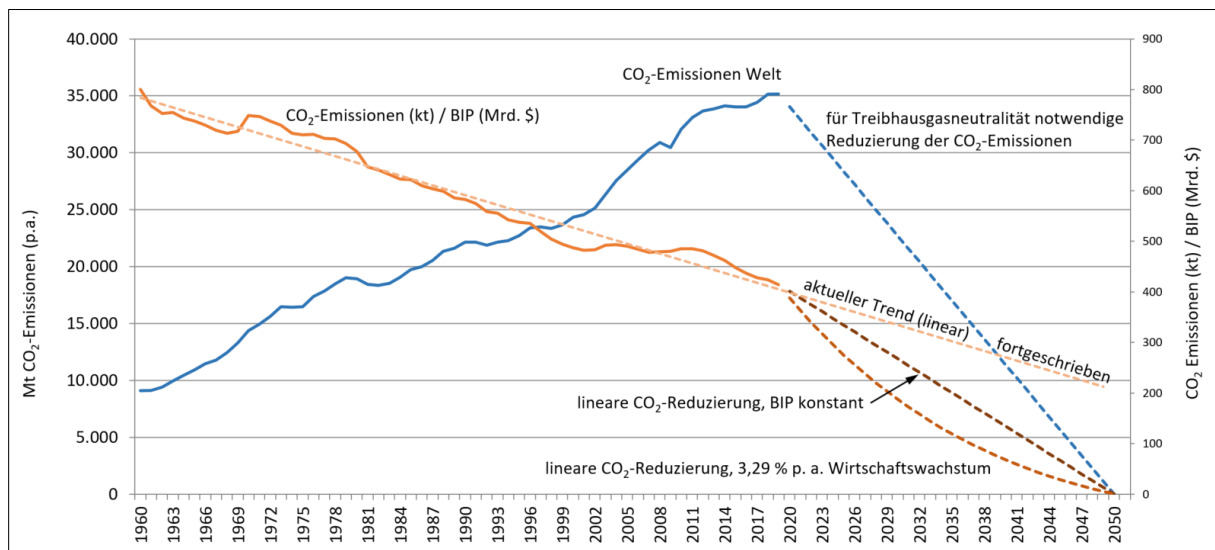


Abb. 2: THG-Emissionen und THG-Intensität der Wirtschaftsleistung (THG/BIP) global (Welt) [4,5]

Ressourcenverbrauch als weitergehender Indikator

Treibhausgasneutralität binnen einer Generation ist zwar ein sehr ambitioniertes Ziel, könnte aber mit deutlich verstärkten weltweiten Bemühungen noch erreichbar sein (ob rechtzeitig, ist allerdings fraglich). Je geringer die anthropogen verursachten Treibhausgasemissionen jedoch sind, desto wichtiger werden andere Indikatoren des ökologisch relevanten Ressourcenverbrauchs. Das gilt nicht nur, aber auch für eine (nahezu) treibhausgasneutrale Energieversorgung, da auch Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien grundsätzlich endliche Ressourcen benötigen bzw. beanspruchen (Rohstoffe und Materialien, Flächeninanspruchnahme, Anfall von Abfall- und Reststoffen, Auswirkungen auf die biologische Vielfalt usw.).

Hierbei zeigt sich ein ernüchterndes Bild [6]. Abb. 3 ist zu entnehmen, dass der gesamte Endenergieverbrauch und der Pro-Kopf-Verbrauch in Deutschland während der letzten drei Dekaden nur wenig zurückgegangen sind, obwohl sich die Endenergie-Intensität der Wirtschaftsleistung (Endenergieverbrauch/BIP) kontinuierlich deutlich verringert hat. Die Reduktion der THG-Emissionen und die Verbesserung der energetischen Effizienz bezogen auf das BIP sind damit im Wesentlichen auf technische Fortschritte und Veränderungen zurückzuführen, während der wirtschaftliche und individuelle Konsum an Endenergie nur marginal zurückgeht.

Als Beispiel für die weltweite Entwicklung sind in Abb. 4 das weltweite BIP (Global GDP), der globale Rohstoffbedarf (Global material footprint MF) sowie die globalen CO₂-Emissionen aus der Verbrennung und Nutzung fossiler Energieträger (Global CO₂ FFI) normiert aufgetragen [7]. Globaler Rohstoffbedarf und Weltwirtschaftsleistung wachsen demnach seit Jahrzehnten in gleichem Maße.

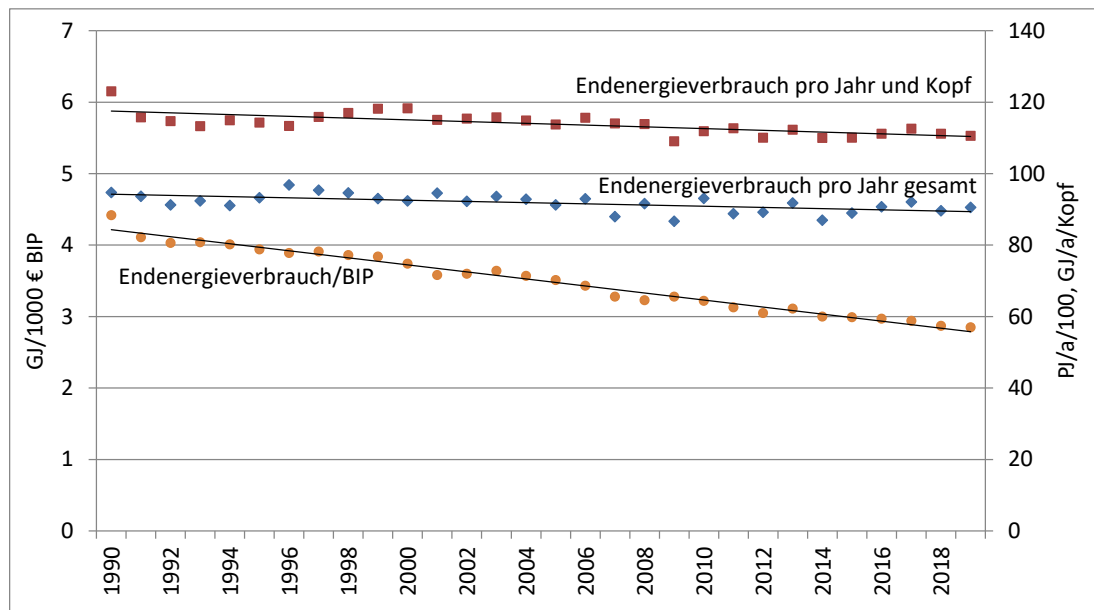


Abb. 3: Endenergieverbrauch in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2019 [6]

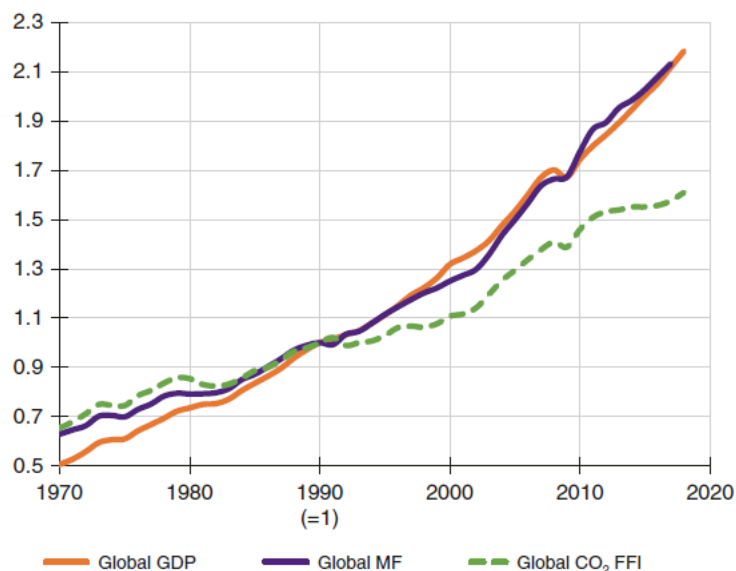


Abb. 4: Relative Veränderung wesentlicher ökonomischer und umweltrelevanter Indikatoren von 1970 bis 2017 – globales BIP (GDP), global material footprint (MF), globale CO₂-Emissionen aus fossilen Brennstoffen und Industrieprozessen (CO₂ FFI), entnommen (Fig. 1) aus [7], lizenziert unter Creative Commons Attribution 4.0 International License, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Während bei den THG-Emissionen global zumindest eine Verringerung der THG-Intensität der Wirtschaftsleistung und in einzelnen Ländern darüber hinaus sogar eine Abnahme der absoluten THG-Emissionen erreicht worden ist, steht eine derartige Entwicklung hinsichtlich anderer wesentlicher ökologischer Parameter nach wie vor aus. In Deutschland gilt dies, neben dem Endenergieverbrauch, z. B. für den Flächenverbrauch (und z. B. seine Auswirkungen auf Flora und Fauna), der zwar gesunken ist, aber immer noch auf einem zu hohen Niveau liegt [8]. Insbesondere auf globaler Ebene werden (technische) Effizienzgewinne, wenn überhaupt vorhanden, durch das Wirtschaftswachstum teilweise oder ganz aufgezehrt, da dieses mit steigendem materiellem Konsum verbunden ist. Über den Klimaschutz hinaus stellt sich somit die grundsätzliche Frage nach den ökologisch

erforderlichen Grenzen des globalen Wirtschaftswachstums, d. h. nach notwendigen systemischen Veränderungen in Konsum und Wirtschaftsweise [7].

Wahrnehmung und Entwicklung des Wirtschaftswachstums

Das globale Wirtschaftssystem in seiner gegenwärtigen, kapitalistischen Form ist aus mehreren Gründen auf permanentes Wachstum angelegt, zumindest auf die zuverlässige Erwartung einer solchen Entwicklung [9]. Diese Erwartung und ihre wiederkehrende Erfüllung führten und führen zu der – historisch einmaligen – wirtschaftlichen Entwicklung, von der weltweit der größte Teil der Menschheit im Sinne von zunehmendem Wohlstand, wenngleich auch in unterschiedlichem Maße, profitiert.

Gleichzeitig bedeutet dies eine Abhängigkeit von der Wachstumsdynamik. Nicht das Niveau der Wirtschaftsleistung und ihres Nutzens sind die entscheidenden Indikatoren, sondern das Wachstum der Wirtschaftsleistung. Ein gewisses Maß an „immer mehr“ ist zur Voraussetzung für „gleichbleibend gut“ geworden. Dies drückt sich auch in der offiziellen Darstellung der wirtschaftlichen Entwicklung und ihrer Rezeption aus: Die wirtschaftliche Entwicklung wird als Veränderung des realen (preis-/inflationsbereinigten) jährlichen Bruttoinlandsprodukts (BIP) bezogen auf den Vorjahreswert dargestellt und diskutiert. Abb. 5 enthält ein entsprechendes, vom Statistischen Bundesamt herausgegebenes Diagramm für Deutschland, dessen Daten und Darstellung zumindest in Teilen von praktisch allen Medien übernommen werden. Demnach scheint das Wirtschaftswachstum in Deutschland zurückzugehen, weil die auf den jeweiligen Vorjahreswert bezogene, prozentuale Wachstumsrate zurückgeht. Dies bedeutet allerdings zunächst lediglich, dass das Wirtschaftswachstum in Deutschland hinter einem gleichbleibend exponentiellen Wachstum zurückbleibt.

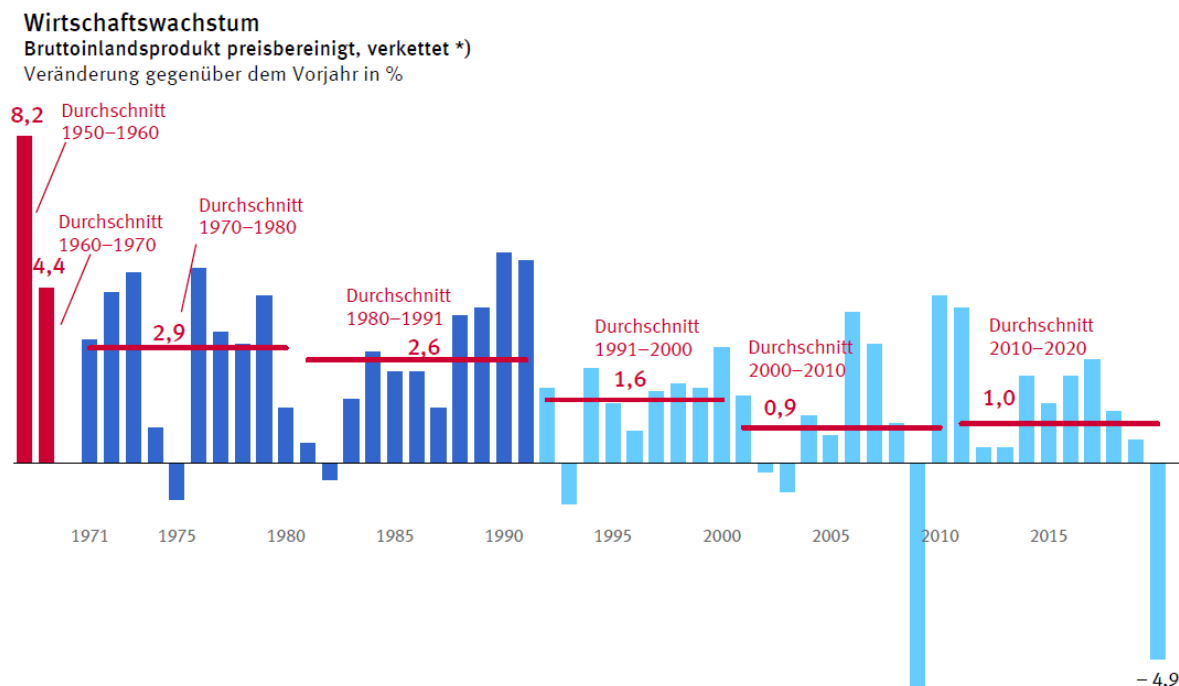


Abb. 5: Wirtschaftswachstum in Deutschland, entnommen aus [3]

Trägt man dagegen preisbereinigte Absolutwerte der jährlichen Wirtschaftsleistung auf, zeigt sich für die gesamte Nachkriegsgeschichte Deutschlands, trotz deutlich erkennbarer Auf- und Abschwünge, ein linearer Anstieg mit einem Bestimmtheitsmaß (Determinationskoeffizient) R^2 von ca. 98 – 99 % (Abb. 6 und Abb. 7). Dies bedeutet einerseits, dass, gemessen am realen (preisbereinigten) BIP, die Wirtschaftsleistung Deutschlands im Grundsatz heute immer noch jährlich gleich stark zunimmt wie in der Wiederaufbauzeit nach dem Krieg. Andererseits fußen nicht nur die psychologische Wahrnehmung, sondern auch viele in die Zukunft gerichtete wirtschaftliche Entscheidungen und Konstrukte auf der Annahme zumindest halbwegs stabiler prozentualer Wachstumsraten, z. B. bei der privaten langfristigen Geldanlage, der Altersvorsorge oder, zumindest in der Vergangenheit, der Refinanzierbarkeit von Staatsschulden [10,11].

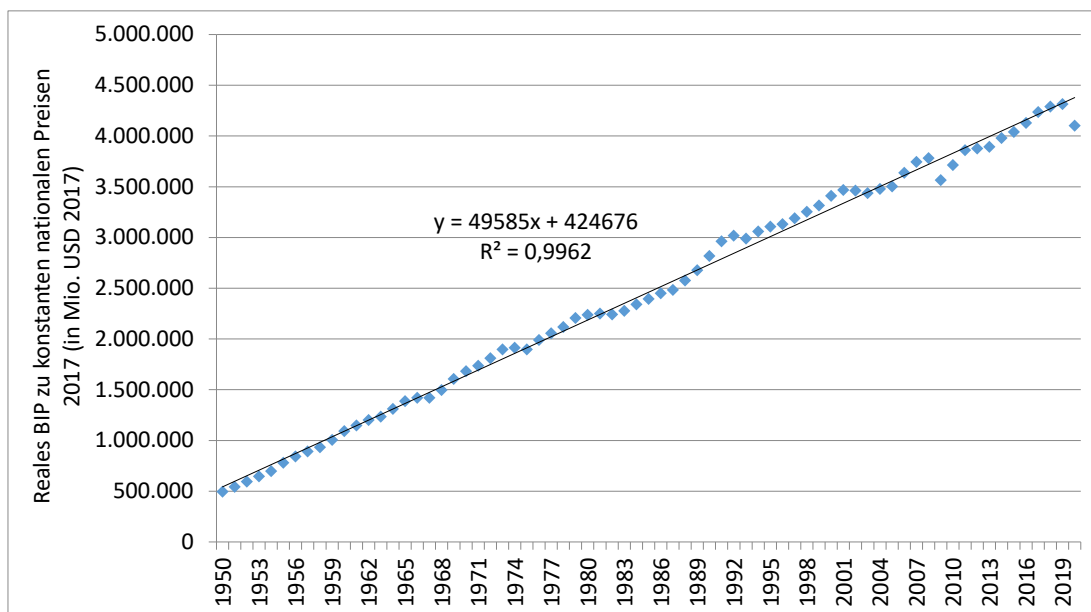


Abb. 6: Entwicklung des jährlichen Bruttoinlandsprodukts (BIP) Deutschlands, preisbereinigt zu konstanten nationalen Preisen in US-Dollar 2017, Daten aus [12], lizenziert unter Creative Commons Attribution 4.0 International License, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Im Unterschied zu Deutschland und den meisten anderen „alten“ Industrienationen, verläuft das globale Wirtschaftswachstum seit langem exponentiell, in den letzten vier Dekaden mit einer Wachstumsrate von im Mittel knapp 3,3 % pro Jahr. Dies ist jedoch bislang mit der in Abb. 4 dargestellten, ökologisch auf Dauer nicht tragbaren Entwicklung verbunden. Zudem dürfte das globale Wirtschaftswachstum zu einem erheblichen Teil der Zunahme der Weltbevölkerung und dem wirtschaftlichen Nachholbedarf der meisten Länder und Menschen in der Welt geschuldet sein. Verschiedene Studien gehen deshalb davon aus (oder halten es zumindest für wahrscheinlich), dass mit fortschreitender wirtschaftlicher und demografischer Entwicklung in mehr und mehr Ländern Brems- oder gar Sättigungseffekte wie in Deutschland (und z. B. noch stärker in Japan) auftreten [13].

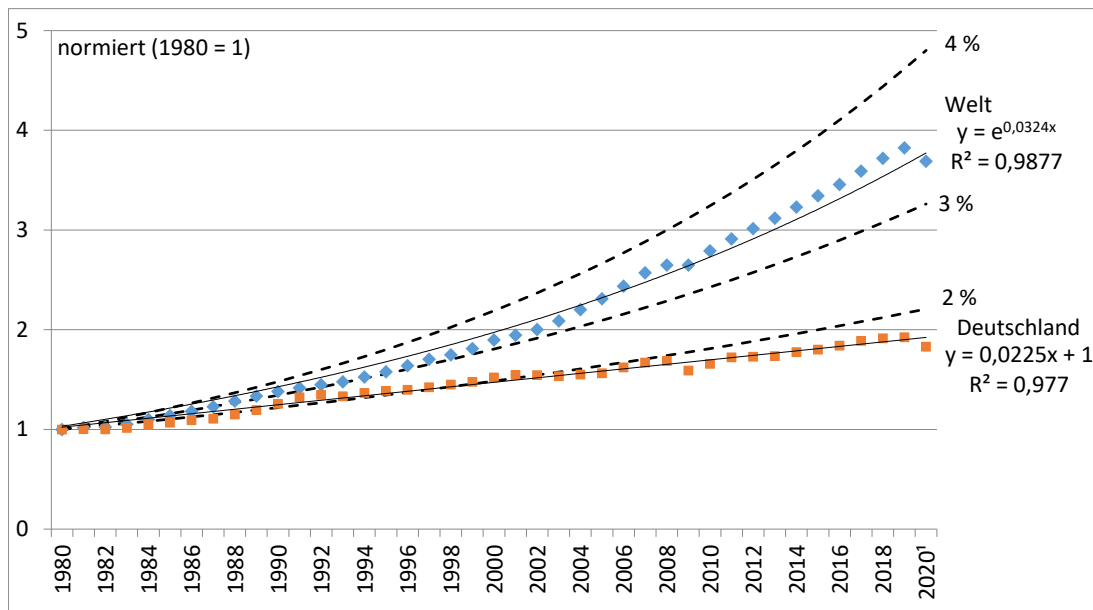


Abb. 7: Entwicklung des realen (preisbereinigten) BIP der Welt und Deutschlands und exponentielle Entwicklung von 2, 3 und 4 %, normiert auf das Jahr 1980 [13,14]

Das „klassische“ exponentielle Wirtschaftswachstum ist damit bereits aus sich heraus ein auf Dauer in Frage stehendes Modell. Und selbst ein „nur noch“ lineares globales Wachstum wäre auf Dauer unbegrenzt und müsste mit einer ständig verbesserten, gegen Null gehenden Ressourcenintensität einhergehen, um bestimmte ökologische Grenzen einzuhalten. Bis zu welchem Grad sich reale Wirtschaftsleistung de-materialisieren oder virtualisieren lässt, ist fraglich. Selbst virtuelle Währungen wie Bitcoin werden schnell zu signifikanten Energieverbrauchern. Auch sind rein monetäre, „virtuelle“ Zuwächse und Vermögen nur dann real, wenn sie früher oder später in reale Produkte oder Dienstleistungen eingetauscht werden, die stets mit einem gewissen Maß an Ressourcenverbrauch verbunden sind.

Fazit

Aus den in diesem Beitrag dargestellten Daten und Interpretationen lassen sich folgende Punkte als Fazit ziehen:

- Um den erforderlichen Klimaschutz zu erreichen, sind national, vor allem aber international, deutlich stärkere Anstrengungen als bisher erforderlich. Insbesondere bei weiterhin wachsender Wirtschaft sind die Herausforderungen enorm, erscheinen aber grundsätzlich bewältigbar (ob rechtzeitig, ist allerdings fraglich).
- Bei einigen anderen ökologisch relevanten Parametern stellt sich die Situation allerdings deutlich kritischer dar. Soweit überhaupt vorhanden, werden Effizienzgewinne vom Wirtschaftswachstum weitgehend oder sogar komplett aufgezehrt.
- Technologischer und wirtschaftlicher Fortschritt sind zur Bewältigung dieser Herausforderungen zwar unabdingbar, aber es ist sehr fraglich, ob sie alleine ausreichen.

- Daher ist eine politische und gesellschaftliche Debatte (und daraus folgend konkrete Schritte) längst überfällig, welches Maß an materiellem Reichtum erforderlich ist, was als schädlicher Überfluss zu betrachten ist und welche Veränderungen in der Lebens- und Wirtschaftsweise erforderlich sind. Vor allem die entwickelten Staaten „haben die besten Voraussetzungen, um einen Plan B zu erarbeiten, der aus der Abhängigkeit vom Wachstum führt“ [13].
- „Green Growth“ und ein „Green New Deal“ mit lediglich verbesserter Effizienz und neuen Technologien, aber althergebrachtem Wachstumsmodell gehen deshalb mit einem sehr hohen Risiko einher, sich als „ökologische Mogelpackung“ [13] zu erweisen.
- In diesem Sinne sind Forschung und Entwicklung im Bereich der Energieversorgung und Energienutzung zwar notwendige Voraussetzungen, um einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz zu leisten und den erreichten Wohlstand (insbesondere eines Industrielandes wie Deutschland) zu sichern. Sie sind aber alleine nicht hinreichend, um den ökologischen, sozialen und ökonomischen Herausforderungen der Zukunft insgesamt zu begegnen.

Natürlich ist einzuwenden, dass eine zukünftige Entwicklung auch weit positiver verlaufen könnte, indem z. B. nicht vorhersehbare technologische oder andere Entwicklungen derartige Effizienzfortschritte erlauben, dass ein weiteres materielles Wirtschaftswachstum auf lange Sicht für die gesamte Welt möglich ist. Derartige positiv-disruptive Veränderungen in der Zukunft können natürlich nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Aber alleine darauf zu vertrauen, erscheint angesichts der Datenlage und der bisherigen Entwicklung sehr riskant.

Zunehmend mehren sich die Stimmen in Gesellschaft und Wissenschaft, die eine weitergehende Reform bzw. Veränderung unserer Konsum- und Wirtschaftsweise für erforderlich halten und hier neben politischem Handlungsbedarf auch weiteren Forschungsbedarf sehen [7].

Materielle Suffizienz wird dabei sicherlich ein zentrales Thema sein. Bereits Ludwig Erhard schrieb: *„Wir werden sogar mit Sicherheit dahin gelangen, daß zu Recht die Frage gestellt wird, ob es noch immer richtig und nützlich ist, mehr Güter, mehr materiellen Wohlstand zu erzeugen ... Niemand dürfte dann so dogmatisch sein, allein in der fortdauernden Expansion, d. h. im Materiellen, noch länger das Heil erblicken zu wollen.“* [15]

Literaturverzeichnis

[1] Bundestag, Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften vom 12. Dezember 2019, Bundesgesetzblatt, Bonn, no. 48, pp. 2513-2521, 2019

[2] Umweltbundesamt. (2019/01/15). Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen. [Online]. Available:

UBA

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2019_01_15_em_eentwicklung_in_d_trendtabelle_thg_v0.6.1_f-gase.xlsx.

- [3] Statistisches Bundesamt. (2021/02/24). Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen; Bruttoinlandsprodukt, Bruttonationaleinkommen, Volkseinkommen, Lange Reihen ab 1925. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/14397/umfrage/deutschland-bruttoinlandsprodukt-bip/>.
- [4] P. Friedlingstein et. al., „Global Carbon Budget 2020,“ Earth Syst. Sci. Data, vol. 12, pp. 3269–3340, 2020 [Open Access, online]. Available: <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>. Download Daten (2021/04/19) unter: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>.
- [5] The World Bank. (2021/04/19). GDP (constant 2010 US\$). [Online]. Available: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>.
- [6] AG Energiebilanzen e.V. (2021/04/13). Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. & Ausgewählte Effizienzindikatoren zur Energiebilanz Deutschland. [Online]. Available: <https://www.ag-energiebilanzen.de/>.
- [7] T. Wiedmann, M. Lenzen, L. Keyßer and J. Steinberger, „Scientists’ warning on affluence“, Nature Communications, vol. 11, no. 3107, 2020. [Open Access, online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16941-y>
- [8] Statistisches Bundesamt. (2021/04/17). Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche. [Online]. Available: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Publikationen/Downloads-Flaechennutzung/anstieg-suv.pdf>.
- [9] A. Bleicher, „‘Kein Ort – Nirgends?’ Der Kapitalismus im Wachstumsdilemma,“ Sozialimpulse, vol. 29, no. 1, pp. 3-6, 2018.
- [10] K. Bourcarde, „Lineares Wirtschaftswachstum – exponentielle Staatsverschuldung,“ Zeitschrift für Wachstumsstudien, no. 3, pp. 4-7, 2007. [Online]. Available: www.wachstumsstudien.de.
- [11] K. Bourcarde, K. Hermann, Die Scheinkrise – warum es uns besser geht als je zuvor und wir dennoch das Gefühl haben zu scheitern. Frankfurt: Wochenschau Verlag, 2018.
- [12] R. C. Feenstra, R. Inklaar and M. P. Timmer, "The Next Generation of the Penn World Table," American Economic Review, vol. 105, no. 10, pp. 3150-3182, 2015. [Online]. Available: www.ggdc.net/pwt.
- [13] R. Klingholz und M. Slupina, Was tun, wenn da Wachstum schwindet?, Berlin: Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung (Eds.), 2017. Available: <https://www.berlin-institut.org/studien-analysen/detail/was-tun-wenn-das-wachstum-schwindet>
- [14] Statistisches Bundesamt. (2021/04/16) Wachstum des weltweiten realen Bruttoinlandsprodukts (BIP) von 1980 bis 2022 (gegenüber dem Vorjahr). [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/197039/umfrage/veraenderung-des-weltweiten-bruttoinlandsprodukts/>.
- [15] L. Erhard, Wohlstand für Alle. Düsseldorf: Econ Verlag, 1957.

Die Autoren

Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff

koenigsdorff@hochschule-bc.de

Professor an der Hochschule Biberach, Studiengänge Energie-Ingenieurwesen & Energie- und Gebäudesysteme Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE)

Fachgebiete und Fachinteressen:

Simulationstechnik, Energiekonzepte, Geothermie, Systemanalyse, Nachhaltigkeit im Kontext von Klimaschutz, ökologischer und wirtschaftlicher Entwicklung

Laurens Bortfeldt (M.Sc.)

bortfeldt@hochschule-bc.de

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Biberach

Projekt InnoSÜD: Transfer Forschungsergebnisse Transdisziplinär in der Energiewende

Fachgebiete und Fachinteressen:

Nachhaltigkeitsmanagement, Energie- und Ressourcenmanagement, Energiewende- und Klimaschutzwissen sowie Lösungsansätze, Systemanalysen

Sektorenübergreifende Priorisierung von Flexibilität zur Vermeidung von Stromnetzengpässen in Redispatch2.0

David E. Langer*, Dr. Holger Ruf, Prof. Dr. Georg Kleiser
Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm (SWU), Technische Hochschule Ulm (THU)

Abstract

Die Sektorenkopplung wird im Rahmen der nationalen Klimaschutzziele kontrovers diskutiert. Dabei werden häufig die Sektoren Wärme und Verkehr, ausgehend vom elektrischen Sektor, betrachtet. Mit zunehmenden lokalen und zeitlich begrenzten Überschüssen der Stromproduktion, schreitet die Energiewende hier bisher mit dem größten Fortschritt in Deutschland voran. Der elektrische Sektor wird damit zunehmend zum Nukleus der Energieversorgung. Jedoch ist das Ziel des Pariser Klimaabkommens, Emissionen von Treibhausgasen in allen Sektoren zu stoppen, da alle Sektoren bidirektional miteinander verbunden sind. Dabei ist die Energiespeicherung eine zentrale Funktion, die nicht länger mit chemisch gebundenen fossilen Energieträgern, wie Öl, Kohle und Erdgas, selbstverständlich verfügbar ist. Da sowohl bei der Energieumwandlung als auch der Speicherung eine Vielzahl neuer Technologien, mit unterschiedlichen Eigenschaften, verfügbar ist und diese dezentral in großer Anzahl zur Anwendung kommt, ist es sinnvoll deren Einsatz zu Priorisieren, um einen möglichst ressourceneffizienten Betrieb des Gesamtsystems zu erreichen. Die sich aktuell in der Entwicklung befindenden Regeln zur Vermeidung von Netzengpässen (Redispatch2.0) und angedachte marktgestützte Beschaffung von Flexibilitätsdienstleistungen im Elektrizitätsverteilnetz, reicht nun bis zu den Stromerzeugungsanlagen in den unteren Spannungsebenen und steuert zusätzlich die Auswahl dieser Anlagen. In diesem Beitrag wird ein Ansatz für eine ressourceneffiziente Priorisierung vorgestellt und ein Vergleich mit den aktuellen Regeln des Redispatch2.0 durchgeführt.

1. Einleitung

In Deutschland hat sich die Bundesregierung zum Ziel gesetzt, dass der Primärenergieverbrauch gegenüber 2008 bis 2020 um 20%, bis 2030 um 30% [1] und bis 2050 um 50% reduziert werden soll [2]. Im Jahr 2019 konnte dabei ein Rückgang von rund 13% erreicht werden [3]. Gleichzeitig wird der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung in einem festen Korridor, auf Basis der Ziele der Einsparung des Primärenergieverbrauchs, möglichst fixiert. Im Jahr 2019 betrug der Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch rund 15%. Dabei zeigt sich, dass ein Voranschreiten der Sektorenkopplung unumgänglich ist, um eine Umstellung des Energiesystems zu schaffen bevor der Klimawandel für die Menschheit unumkehrbare Auswirkungen erreicht [4].

Angesichts der Gefahr einer zunehmenden Erhöhung der globalen Jahresdurchschnittstemperatur gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter, und der damit einhergehenden Verstärkung lokaler Unwetterereignisse, einem steigenden Meeresspiegel oder Dürren, hat

sich die Weltgemeinschaft darauf verständigt, Gegenmaßnahmen zu ergreifen [5]. Davon ausgehend, wird weltweit eine Substitution fossiler Primärenergie durch erneuerbare vorangetrieben, um fossile Treibhausgasemissionen zu verhindern.

Klassische erneuerbare Energieträger, wie Holz oder Wasserkraft, bieten dabei häufig nicht die nötigen und nachhaltigen Ausbaupotenziale. Technologien wie Photovoltaik (PV) und Windkraft ergänzen dieses Portfolio. Auch im Speicherbereich werden konventionelle Technologien wie Pump- und Druckluftspeicher mit z.B. unterschiedlichen elektrochemischen Batterien ergänzt. Für den Schwerlastverkehr auf der Straße, Schiene und in der Luft, aber auch für produzierende und chemische Industrieprozesse, sind nach heutigem Stand der Technik auch weiterhin chemische Energieträger häufig unausweichlich. In diesen Sektoren wurden bisher die geringsten Fortschritte erzielt, um erneuerbare und technisch verfügbare Ansätze zu etablieren.

In diesem Beitrag wurden ein Bewertungssystem sowie eine Priorisierung von elektrischen Lasten und Stromerzeugungsanlagen auf Basis eines ressourceneffizienten Ansatzes, durchgeführt. Mit Hilfe von Beispieldaten aus dem Stromnetzgebiet der Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH, konnte ein erster vereinfachter Vergleich des entwickelten Ansatzes und des Redispatch2.0 [6] durchgeführt werden.

2. Bewertungssystem zur Flexibilität

In Deutschland sind bis zum Jahr 2021 im elektrischen Sektor die größten Fortschritte zur Substitution fossiler Primärenergieträger erreicht worden. Gleichzeitig sind dort die größten Ausbaupotenziale verfügbar [7]. Daher liegt es nahe, als eine zentrale Maßnahme alle anderen Sektoren mit dem Elektrischen zu verbinden, um dort ebenso fossile Primärenergie zu substituieren. Abbildung 1 zeigt welche Sektoren über welche Technologien und Prozesse gekoppelt sind.

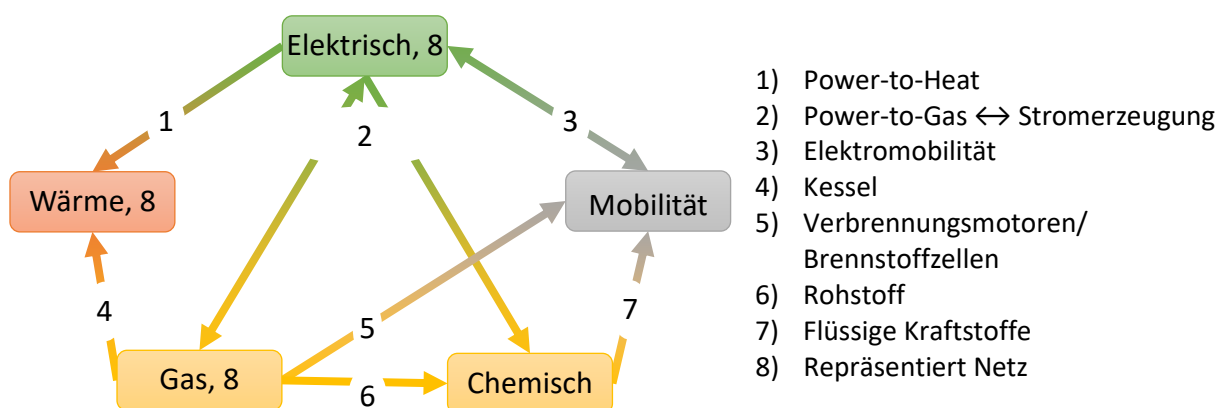


Abbildung 1: Schematische Übersicht der Sektorenkopplung

Die Notwendigkeit der Kopplung der anderen Systeme wird umso deutlicher, wenn neben Energie ebenfalls Leistung berücksichtigt wird. Es zeigt sich, dass Angebot und Nachfrage nur in begrenztem zeitlichem Umfang direkt zueinander passen [8]. Im Gegensatz zu Wärme- und Gasnetzen, mit ihrem physikalischen Speichervermögen, müssen die Erzeugung und der Verbrauch im Stromnetz ständig ausgeglichen sein [9].

2.1. Energiewandler

Verschiedene Energieformen wie elektrischer Strom, Wärme oder Gas, sind differenziert zu bewerten. Dabei ergeben sich Unterschiede beim Aufwand der Bereitstellung, des Nutzens in der Endenergie und nicht zuletzt der ökonomischen Rahmenbedingungen. Bei den Rahmenbedingungen greift der Gesetzgeber mit verschiedenen Instrumenten wie Steuern, Umlagen oder Abgaben [10], aber auch Förderprogrammen wie dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) [11], dem Kraft-Wärme-Kopplung-Gesetz (KWKG) [12] oder Subventionen in der fossilen Energiewirtschaft [13], [14], [15] ein. Daher wird in diesem Beitrag ein Ansatz entwickelt, der dies unter ressourceneffizienten Gesichtspunkten einheitlich bewertet. Dieser Ansatz ist ausdrücklich keine Empfehlung für ein gesamtheitliches Preisbildungsinstrument, denn internationale, politische und insbesondere soziale Einflüsse müssen in einem gesamtgesellschaftlichen Ansatz ebenfalls berücksichtigt werden.

Eine Leistungsänderung kann, unabhängig vom Stromverbraucher oder –erzeuger, ausgehend von einem zum Zeitpunkt anliegenden Betriebsstatus, in beide Richtungen herbeigeführt werden. Daher werden Erzeuger und Lasten allgemein unter einheitlichen Regeln bewertet. Im Betrieb muss für jeden Zeitpunkt, zu dem Flexibilität benötigt wird, die vorhandene Flexibilität für alle Sektoren individuell und dynamisch bewertet werden. In der Planung müssen statische Werte zur Bewertung herangezogen werden. Dies wurde auch für den Ansatz in diesem Beitrag verwendet.

Der primäre technische Wirkungsgrad eines Wandlungsprozesses ($\eta_{\text{primär}}$) ist eine signifikante Größe zur Bewertung der Qualität. Dabei ist ebenfalls zu berücksichtigen, ob der Wandlungsprozess weitere nutzbare Sekundärprodukte bereitstellen kann und mit welchem Wirkungsgrad ($\eta_{\text{sekundär}}$). Häufig wird, z.B. in technischen Prozessen, Abwärme erzeugt. In der Praxis werden Sekundärprodukte nicht immer für 100% der Betriebsstunden genutzt. Daher wird ein Nutzungsfaktor ($F_{\text{sekundär}}(t)$) zur Bewertung herangezogen. Damit lässt sich generell mit folgender Formel der Wandlungswirkungsgrad (η_{Wandlung}) einer Flexibilität ermitteln:

$$\eta_{\text{Wandlung}}(t) = \eta_{\text{primär}} + \eta_{\text{sekundär}} \cdot \int F_{\text{sekundär}}(t) \cdot dt \quad (1)$$

Um den Wandlungswirkungsgrad berechnen zu können wurde der Nutzungsfaktor für verschiedene Sekundärprodukte als integraler Mittelwert wie folgt angenommen:

- Anlagen in Kraft-Wärme-Kopplung $F = 1$
- Elektrochemische (Batterie) und Erneuerbare Stromerzeuger (z.B. Photovoltaik): $F = 0$
- Power-to-Gas: $F = 0,5$

Power-to-Gas, wie z.B. Elektrolyseure, sind nicht immer im Umfeld von Wärmesenken installiert und können im zeitlichen Verlauf nicht immer deren Wärmeleistung an die der Last anpassen. Dem wird mit dem angenommenen Nutzungsfaktor Rechnung getragen.

Ausnahme vom oben beschriebenen Sachverhalt bilden Wärmepumpen, die durch lokale Nutzung von Umgebungswärme, z.B. Erdwärme, mehr Nutzwärme bereitstellen können als elektrische Energie eingesetzt werden muss. Da diese Umgebungsenergie nur lokal am Standort zur Verfügung steht und keine Ressourcenverbrauch verursacht wird sie in der

energetischen Bilanzierung direkt berücksichtigt. Damit können Wärmepumpen eine Effizienz größer eins erreichen.

2.2. Energiespeicher

Bei Speichern ergibt sich die Effizienz nicht nur aus dem Effizienzfaktor für die Energiewandlung beim Einspeichern, siehe Gleichung (1). Je nach Speichertyp ist die Umwandlung beim Einspeichern und Ausspeichern nicht gleich. In diesem Beitrag wurde dafür folgende Annahme getroffen: Für elektrochemischen Speicher deckt der Wandlungswirkungsgrad beide Fälle zusammen ab. Bei Wärmespeichern wird der Wandlungswirkungsgrad für Ein- und Ausspeicherung separat bewertet. Bei chemischen Energiespeichern ist zum Zeitpunkt der Einspeicherung nicht zwingend klar, durch welche Wandlungsprozesse die gespeicherte Energie einer Nutzung zugeführt wird. Dies gilt insbesondere dann, wenn die chemisch gespeicherte Energie in das Gasnetz eingespeist und weiter verteilt wird. Da andere Anlagen, wie z.B. Block-Heizkraftwerke, Flexibilität aus chemischen Energieträgern bereitstellen, ist dieser Wandlungsschritt mit deren Einsatz abgedeckt. Nachgelagerte Anwendungen, z.B. in Produktionsprozessen, verlaufen außerhalb der für die Bewertung der Flexibilität in diesem Beitrag nötigen Systemgrenzen (Abbildung 1). Zur weiteren Charakterisierung von Speichern ist zusätzlich ein Kapazitäts- und Speichereffizienzfaktor zu beachten.

Die Speichereffizienz wird durch die spezifische Selbstentladung (SE) repräsentiert. Sie gibt an, wie viel Leistung ($P_{\text{Selbst.}}$) der Speicher, unabhängig von aktiven End- oder Beladevorgängen, im Verhältnis zu gespeicherter Energie (E_{Speicher}), über einen gewissen Zeitraum (t) abgibt. Daraus ergibt sich der Speicherwirkungsgrad wie in Gleichung (2).

$$\eta_{\text{Speicher}} = 1 - \frac{\int P_{\text{Selbst.}}(t) \cdot dt}{E_{\text{Speicher}}} = 1 - SE \quad (2)$$

Um die Speichereffizienz in diesem Beitrag berechnen zu können, wird die Selbstentladung mit einer fixen Speicherdauer (T) für verschiedene Speichertypen angenommen. Diese repräsentiert eine durchschnittliche Speicherdauer für den entsprechenden Speichertyp.

- Elektrochemisch (Batterie): $T = 12$ Stunden
- Wärmespeicher (sensibel): $T = 24$ Stunden
- Chemischer Speicher: $T = 84$ Stunden

Der Kapazitätsfaktor, auch Ausspeisedauer oder Entladedauer genannt ($T_{\text{Kapazität}}$), ermittelt für Speicher-Zeiträume die sich aus dem Verhältnis der Leistung des gekoppelten Energiewandlers (P_{Nenn}) zu der technischen Speicherkapazität (E_{Nenn}) ergeben. In Gleichung (3) wird dargestellt, wie lange ein Speicher eine bestimmte Nennleistung bereitstellen kann bis er ent- oder beladen ist.

$$T_{\text{Kapazität}} = \frac{E_{\text{Nenn}}}{P_{\text{Nenn}}} \quad (3)$$

Bereits heute verfügbare und umfangreich ausgebaute Wärme- und Gasnetze können als Speicher eingesetzt werden, da sie, durch deren physikalische Eigenschaften, Temperatur- oder Druckbereiche nutzen können. Wärmenetze sind nur lokal verfügbar und könnten technische signifikante Speicherkapazitäten für einen Zeithorizont von Stunden bis zu

mehreren Tagen bereitstellen, haben aber technisch bedingt eine relativ hohe Selbstentladung (siehe Kapitel 2.3). Gasnetze bieten die größten Speicherkapazitäten und haben zusätzlich eine geringe Selbstentladung. Hier ist technisch jedoch ein relativ geringer Wirkungsgrad beim Be- und Entladen gegeben.

2.3. Energieverteilung

Die Effizienz der Energieverteilung ist ein weiterer zu berücksichtigender Punkt in der Prozesskette. Hier haben Gas- und Wärme-Netze einen entscheidenden Vorteil gegenüber lokal begrenzten Speichern. Mit dem Einspeisen in diese Netze wird Energie auch direkt zum Abnehmer transportiert. Netzengpässe können zeitlich begrenzt die Verteilung behindern. Insbesondere im Stromnetz ist dies zu beachten: Hier sind das Spannungsband und die Überlastung von Betriebsmittel entscheidende Netzbetriebsparameter. Im Jahr 2020 betrugen die Verluste nach Sektoren im Netzgebiet der Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH: Strom 12,26 kWh [16], Gas 0,0 kWh, Wärme 233,73 kWh pro Meter Leitungslänge [17]. Die Verluste im Gasverteilnetz wurden, nach Rücksprache mit der Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH, kleiner der Messtoleranz angegeben und werden daher für dieses Netz mit Null angenommen. Ebenso wurden im Austausch mit der Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH für das Wärmenetz in diesem Beitrag ausschließlich die Wärmeverluste berücksichtigt, die elektrische Energie für den Netzbetrieb wurde nicht mit einbezogen. Damit ergibt sich der mittlere Wirkungsgrad der Netzsektoren wie folgt: Strom ($\eta_{\text{Stromnetz}}$) 97,63 %, Gas (η_{Gasnetz}) 100 % und Wärme ($\eta_{\text{Wärmenetz}}$) 82,6 %. Diese durchschnittlichen Jahreswirkungsgrade beinhalten den Transport und die Speicherung. Die Netztopologie (Leitungslänge, etc.) zwischen Flexibilitätsanbieter und Netzengpass wurde in diesem Beitrag nicht tiefergehend berücksichtigt.

Für die Verteilung von Energie ($E_{\text{Trans.}}$) durch Fahrzeuge haben heute nur chemische Energieträger eine technisch sinnvolle Energiedichte. Dazu zählen Wasserstoff, synthetisch hergestelltes Methan oder Biogas, sowie flüssige chemische Energie wie z.B. Ethanol. Bei der Berechnung der Verlustenergie ($E_{\text{Trans.Verl.}}$) für den Transport kommt es wesentlich auf die Länge der Transportstrecke (s) sowie die Effizienz des Antriebssystems des Fahrzeugs pro Streckenlänge an. Der Wirkungsgrad für den Transport ergibt sich damit wie folgt:

$$\eta_{\text{Trans.}}(s) = 1 - \frac{E_{\text{Trans.Verl.}}(s)}{E_{\text{Trans.}}} \quad (4)$$

2.4. Ermittlung eines Flexibilitäts pools

Die Ermittlung eines Anlagen pools für Flexibilität muss anhand der Wirksamkeit auf den Engpass im elektrischen Netz ermittelt werden. So kann sichergestellt werden, dass nicht unnötig viel Flexibilität bereitgestellt werden muss. Der verwendete Ansatz in diesem Beitrag baut dabei auf dem in [18] vorgestellten auf. Flexibilität aus Anlagen, die direkt auf einen Netzengpass wirken können, haben einen topologischen Wirkungsfaktor ($\eta_{\text{Topologie}}$) von 100%. Flexibilität, die nicht mit dem Netzengpass topologisch gekoppelt ist, hat einen topologischen Wirkungsfaktor von 0%. Dabei wird in diesem Beitrag die Annahme getroffen, dass jede Flexibilität, die in einer Spannungsebene über dem Netzengpass verknüpft ist, nicht auf das Netz der unterlagerten Spannungsebene wirken kann. An den Transformatoren zwischen der Mittel- und Niederspannungsebene ist in der Praxis häufig eine starre Kopplung des

Übersetzungsverhältnisses der Spannung gegeben, weshalb die in diesem Beitrag gewählte Annahme hier eine Vereinfachung darstellt. In vermaschten Netzen kann Flexibilität nur zum Teil auf einem bestimmten Netzengpass wirken. Dieser relativ statische Wirkungsfaktor muss neu bewertet werden, wenn das Netz durch Um- oder Ausbaumaßnahmen verändert wird oder Schaltmaßnahmen die Netztopologie beeinflussen.

2.5. Prozesskette

Zusammenfassend kann die Effizienz von Flexibilität im Verhältnis zu einem bestimmten Netzengpass und für einen Zeitraum (T_{Bedarf}) wie in der nachfolgenden Gleichung, bewertet werden. Das Subskript „pri.“ steht für das primär produzierte Wandlungsprodukt, das Subskript „sek.“ für Sekundärprodukte, wie z.B. Abwärmenutzung.

$$\eta_{\text{Prozess}} = (\eta_{\text{Wandlung,pri.}} \cdot \eta_{\text{Speicher,pri.}} \cdot \eta_{\text{Netz,pri.}} \cdot \eta_{\text{Trans.,pri.}} + \eta_{\text{Wandlung,sek.}} \cdot \eta_{\text{Speicher,sek.}} \cdot \eta_{\text{Netz,sek.}} \cdot \eta_{\text{Trans.,sek.}}) \cdot \eta_{\text{Topologie}} \text{ WENN } T_{\text{Kapazität}} > T_{\text{Bedarf}} \quad (5)$$

Es wurden weitere allgemeine Annahmen in diesem Beitrag getroffen. Für nicht betroffene Bereiche in (5), wird der entsprechende Wirkungsgrad mit dem Faktor 1 in der Gleichung eingesetzt. Falls keine Sekundärprodukte durch die Flexibilität bereitstellende Anlage verfügbar sind, werden für alle Effizienzfaktoren mit dem Subskript „sek.“ Null eingesetzt. Der Effizienzfaktor für Wärme- und Gasnetze deckt sowohl Speicher als auch Transport mit dem Faktor Eins in (5) ab. Für Flexibilität, die durch Wandlung aus Energienetzen bereitgestellt wird, kann $T_{\text{Kapazität}}$ größer T_{Bedarf} vorausgesetzt werden. Für brennstofflose Stromerzeuger, wie PV oder Windkraftanlagen, wird der Umwandlungswirkungsgrad mit 1 eingesetzt. Damit ist für diese Anlagengruppe einzig die Wirksamkeit auf den Netzengpass für die technische Bewertung entscheidend. Zusätzlich wird für brennstofflose Stromerzeuger dem sozialen Aspekt Rechnung getragen, indem innerhalb des technisch ermittelten Pools per Zufall und unter Berücksichtigung der gesamten abgerufenen Zeit pro Anlage, die Flexibilität bestimmt wird. Damit werden Anlagen, die bereits abgerufen worden sind, bei einem erneuten Abrufereignis mit einer niederen Priorität berücksichtigt. Für Anlagen im wärmegeführten Kraft-Wärme-Kopplung- (KWK) Betrieb ist die Wärme, aus Sicht des Anlagenbetreibers die primäre Nutzenergie. Daher werden für solche Anlagen, im Falle des Abschaltens aufgrund eines Netzengpasses, Ersatzanlagen ohne Verknüpfung zum elektrischen Netz, wie z.B. Gas-Kessel, in Betrieb genommen. Solche potenziellen Ersatzanlagen verursachen ebenfalls einen Ressourcenverbrauch, der in diesem Beitrag nicht weiter berücksichtigt wurde.

3. Priorisierung von Flexibilität

3.1. Ressourceneffizienter Ansatz

In [18] wurden die folgenden übergeordneten Gruppen für die Bereitstellung von elektrischer Leistung definiert und priorisiert: brennstofflose, biogene und fossile, elektrische Stromerzeugung, sowie elektrische Last. Innerhalb der Gruppen wird Flexibilität nach deren Effizienz priorisiert (siehe Kapitel 2). Prinzipiell werden effizientere Anlagen zuletzt abgeschaltet und zuerst zugeschaltet. Dabei müssen grundsätzlich zwei Fälle für eine Priorisierung unterschieden werden: Bereitstellungsüberschuss und Bezugsüberschuss. Im Falle eines Bereitstellungsüberschusses wird die Last gegenüber brennstoffloser

Stromerzeugung höher priorisiert, da das Stromangebot in solch einem Fall, z.B. in Speichern, genutzt werden soll anstatt abgeregelt zu werden.

In der Gruppe der elektrischen Last ist der Wert von elektrischer Leistung von zusätzlichen Faktoren abhängig. Dies ist nicht immer mit dem monetären Wert oder der Effizienz zu bemessen. In Krankenhäusern (kritische Infrastruktur) können z.B. Menschenleben an der Stromversorgung hängen, weshalb hier mit Notstromaggregaten zusätzliche Sicherheit bereitgestellt wird. Im regulären Netzbetrieb wird der Wert von Flexibilität über verschiedene Märkte (Intra-Day oder Regelleistung) monetär repräsentiert. Damit wird ein Anreiz geschaffen, dem Gesamtsystem ausreichend Flexibilität zuzuführen. Im Fall von lokalen Netzengpässen greifen überregional gesteuerte Märkte allerdings nicht, da deren Anforderungen konträr zu lokalen Netzsituationen laufen können. Daher wurde in diesem Beitrag ein allgemeiner Ansatz definiert, der nachfolgend Untergruppen für eine Priorisierung der Last definiert:

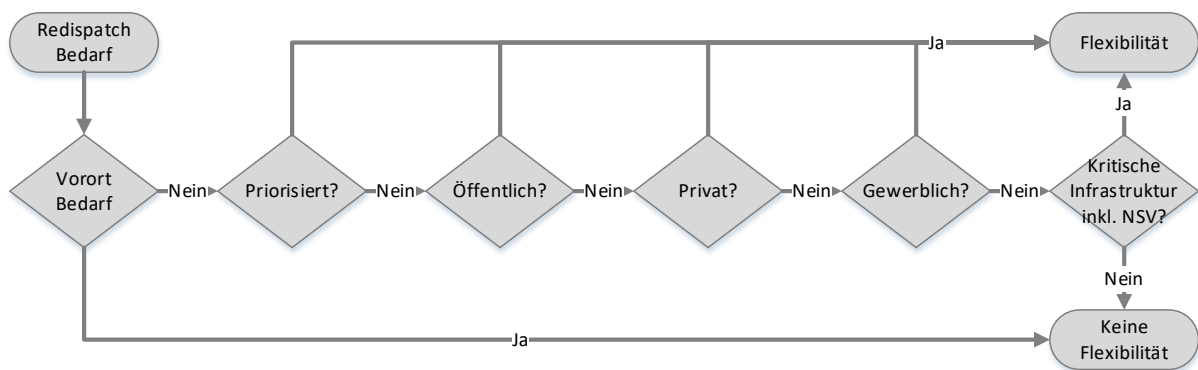


Abbildung 2: Schematische Darstellung der übergeordneten Priorisierung von Lasten

Die einzelnen Untergruppen bauen aufeinander auf, bis die benötigte Flexibilität verfügbar ist. Priorisierte Last-Flexibilität ist solche, die im Vorfeld für einen Netzengpass im gegenseitigen Einverständnis vertraglich verpflichtet wurde. Als Gegenleistung wird ein ermäßigter Strompreis dem Flexibilitätsanbieter zur Verfügung gestellt. Der Gesamtumfang solcher Flexibilität wird vom Netzbetreiber festgelegt. Dieser Ansatz lehnt sich an vertraglich gesicherte, sofort abschaltbare Lasten zur Frequenzstabilisierung [19]. Eine priorisierte Last-Flexibilität bietet zudem die Möglichkeit für gewerbliche Anbieter in der Priorisierung der Gruppen frühzeitig einen Beitrag zur Netzstabilisierung und unter wettbewerblichen Rahmenbedingungen beizutragen.

3.2.Redispatch2.0 Ansatz

Die Basis für das neue, zum 1. Oktober 2021 in Kraft tretende, Redispatch2.0 Verfahren ist eine Prognose oder ein Fahrplan für den jeweils folgenden Tag. Im Falle eines Abrufs wird eine Leistungsänderung bei Anlagenbetreibern angefordert, die den Netzengpass heilt. Ein Abruf der angeforderten Leistung führt ebenfalls dazu, dass ein energetischer Ausgleich notwendig wird, so dass die Gesamtbilanz im System unverändert bleibt.

Im Redispatch2.0 werden verschiedene Anlagengruppen, Leistungsklassen und Typen unterschieden. Es gelten dabei Regeln, die die Auswahl der Anlagengruppen steuern. Es werden bisher ausschließlich Stromerzeugungsanlagen berücksichtigt. Anlagen der

erneuerbaren Energien (EE) und KWK haben eine preisbasierte Vorrangberechtigung. Diese bewirkt, dass in deren Betrieb möglichst nicht durch Redispatch eingegriffen werden soll [20]. Anlagen innerhalb dieser Gruppen werden abgerufen, wenn durch die vorrangberechtigte Anlage, ein vielfaches an nicht vorrangberechtigter Erzeugung ersetzt werden kann. Bei EE-Anlagen wurde der Faktor mit 10 und bei KWK-Anlagen mit 5 festgelegt [21]. Dabei wird dieser Faktor im Rahmen des Redispatch2.0 in einen einheitlichen kalkulatorischen Preis umgerechnet, welcher mit den jeweiligen kalkulatorischen Kosten verglichen wird [22]. Die Übertragungsnetzbetreiber mit Regelzonenverantwortung bestimmen jährlich pauschal den kalkulatorischen Preis gemäß § 13 Abs. 1a S. 2 EnWG, für EE-, KWK- und Netzreserve- Anlagen [20]. Die kalkulatorischen Kosten dienen damit ausschließlich dem Auswahlmechanismus (Priorisierung).

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, ergibt sich die Wirksamkeit der Leistungsänderung eines Abrufs auf einen bestimmten Netzknoten über die Netztopologie zwischen dem Netzengpass und dem Standort der Flexibilität. Netzengpassheilende Schalthandlungen direkt im Netz werden vor dem Anfordern eines Redispatch durchgeführt. Dies ist technisch überwiegend im Übertragungsnetz möglich. Im Verteilnetz stehen solche Schalthandlungen nur stark begrenzt zur Verfügung.

Die tatsächliche Entschädigung für die Anlagenbetreiber wird berechnet, indem eine Entschädigungszahlung für entgangene Einnahmen plus zusätzliche Aufwendungen und abzüglich ersparter Aufwendungen erfolgt [20]. Dabei wird den Anlagenbetreibern die Entschädigung von dem Netzbetreiber ausbezahlt. Der Netzbetreiber ist gesetzlich verpflichtet möglichst kostengünstige Anlagen aus dem verfügbaren Flexibilitätspool auszuwählen [23].

4. Analyse und Vergleich

Insgesamt sind in dem untersuchten Gebiet nur neun Stromerzeugungsanlagen konventionell betrieben und nicht durch das KWKG bzw. EEG gefördert, demgegenüber stehen 6012 Anlagen. Tendenziell ist die Anzahl der konventionellen Anlagen in Verteilnetzen eher gering. Auf Grund der Größe haben konventionelle Anlagen jedoch, in dem hier untersuchten Gebiet, an der installierten Leistung einen Anteil von 27%. Damit wird deutlich, dass mit beiden oben beschriebenen Ansätzen konventionelle Anlagen in dem untersuchten Gebiet einen erheblichen Anteil an Flexibilität bereitstellen - im ressourceneffizienten Ansatz aufgrund der fossilen Brennstoffe, die hier zum Einsatz kommen, und im Redispatch2.0 wegen der Vorrangberechtigung von EEG und KWKG geförderten Anlagen. Im laufenden Betrieb könnten die konventionellen Anlagen aus verschiedenen Gründen zum Zeitpunkt des Abrufes keine Flexibilität bereitstellen, z.B. wegen Wartungsarbeiten. Daher könnten trotz des hohen Leistungsanteiles auch KWKG oder EEG geförderte Anlagen miteinbezogen werden.

Für eine Priorisierung der Stromerzeugungsanlagen wurde in diesem Beitrag für die Kategorie BHKW (KWKG) die KWKG-Vergütung herangezogen. Batterien und Wärmepumpen werden zwar nicht im Redispatch2.0 berücksichtigt, deren Abruf wurde aber aufgrund einer besseren Vergleichbarkeit mit einem einheitlichen Arbeitspreis des Grundversorgers von 0,31592€/kWh berücksichtigt [24].

Für 1565 Wärmepumpen sind Verbrauchsdaten vorhanden. Dabei wurde die maximale Leistung mit dem Standardlastprofil (WP2) ermittelt. Die tatsächliche Nennleistung liegt aufgrund von Sicherheitszuschlägen bei der Planung etwas höher. Exakt kann die tatsächliche Nennleistung mit den vorhandenen Daten allerdings nicht ermittelt werden. Diese Wärmepumpen werden zum größten Teil im Gebäudesektor für Raumwärme und Warmwasser eingesetzt. In diesem Beitrag wurde für die Priorisierung der Kategorie Wärmepumpe ein Anteil an der ermittelten Leistung von rund 73% an Luftwasser-Wärmepumpen auf Basis der Absatzzahlen zwischen 2014 und 2020 angenommen, die restlichen Anlagen wurden den erdgekoppelten Wärmepumpen zugeordnet [25]. Dabei wurde für die Luftwasser-Wärmepumpen eine pauschale Effizienz (Jahresarbeitszahl) von 3,1 und für die erdgekoppelten Wärmepumpen 4,1 angenommen [26]. Untergruppen zur Priorisierung dieser Last, nach dem in Kapitel 3.1 beschriebenen Ansatz, standen nicht zur Verfügung.

Insgesamt konnten 106 Batterien in die Auswertung miteinbezogen werden. Dabei sind 97 Batterien der Lithium-Ionen Technologie zuzuordnen, weitere neun sind Blei-Batterien. Deren Effizienz und Selbstentladung wurde der Literatur entnommen [27]. Auch für diesen Anlagentyp konnte für den Lastfall keine Unterkategorie, nach dem in Kapitel 3.1 beschriebenen Ansatz, zugeordnet werden. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht des gesamten Anlagenpools im betrachteten Gebiet.

Tabelle 1: Übersicht des Flexibilitätspool mit Kennzahlen zur Priorisierung

Anlagentyp	Installierte Leistung [kW]	Preis [€/kWh]	Selbstentladung [-/d]	Ausspeisedauer [h]	Installierte Kapazität [kWh]	Effizienz primär [-]	Effizienz sekundär [-]
Biogas	27668	k.A.	0	>Bedarf	0	k.A.	k.A.
Deponie-, Klär- und Grubengas	290	k.A.	0	>Bedarf	0	k.A.	k.A.
PV	117718	k.A.	0	>Bedarf	0	1	0
Wasserkraft	13065	k.A.	0	>Bedarf	0	1	0
Erdgas-BHKW KWKG	1549	0,0523	0	>Bedarf	0	0,30	0,61
Erdgas-BHKW konventionell	7752	k.A.	0	>Bedarf	0	0,41	0,44
Erdgekoppelt-WP	186	0,3159	0	>Bedarf	0	4,10	0
Luft-Wassert-WP	503	0,3159	0	>Bedarf	0	3,10	0
Blei	39	0,3159	0,00170	3,90	129	0,83	0
Lilon	481	0,3159	0,00025	1,70	699	0,94	0

Für die Kategorie BHKW-KWKG wurde ein direkter Vergleich der Priorisierung des Anlagenwirkungsgrades und des Preises durchgeführt, siehe Abbildung 3. Für eine Priorisierung, wie im Redispatch2.0, nach dem Preis (dunkel blaue Kurven) ist ersichtlich, dass vielen Anlagen der gleiche Preis zugeordnet wird. Bei keinem eindeutigen Unterschied des Preises, würde auf eine Verstetigung der Abrufzeit der betroffenen Anlagen zurückgegriffen. Dabei werden weniger effiziente Anlagen gleichwertig einbezogen, gleichzeitig würde daraus im Mittel und über eine Anzahl von Abrufereignissen ein höherer Brennstoffeinsatz resultieren. Auf der

anderen Seite ist mit einer Priorisierung nach der Effizienz, wie im ressourceneffizienten Ansatz (helle blaue Kurven), bei einige Anlagen mit höherer Effizienz auch ein höherer Preis zugeordnet. Eine solche Anlage würden mit höherer Priorität bei einem Abruf zugeschaltet, was die Kosten erhöht.

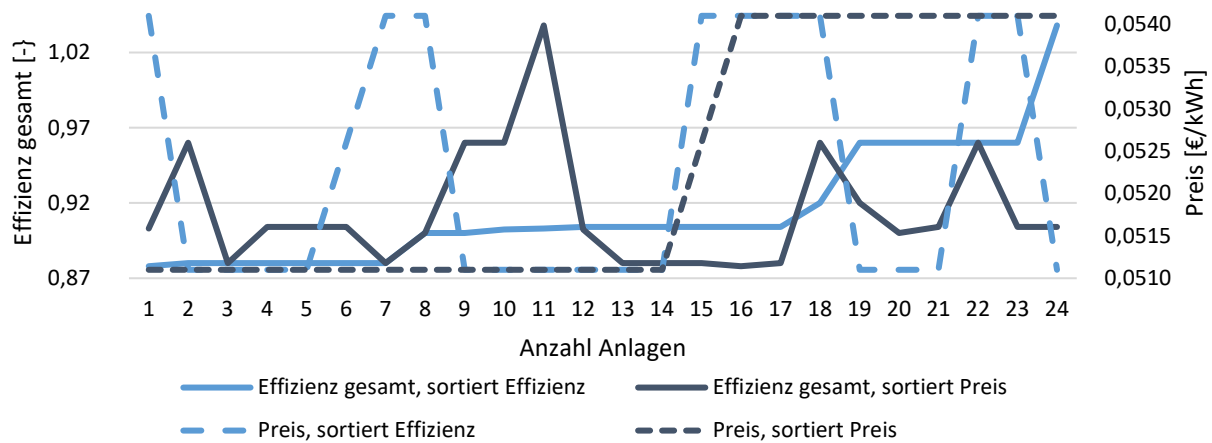


Abbildung 3: Vergleich der Effizienz und der Preise von Anlagen der Kategorie BHKW-KWKG

5. Ausblick

Es konnte in diesem Beitrag ein sektorenübergreifender allgemeiner Ansatz für einen einheitlichen Vergleich des Wertes einer Flexibilität dargestellt werden. Durch die Trennung potenzieller Flexibilität in allgemeine Kategorien, die sowohl Last als auch Erzeugung berücksichtigen und übergeordnet, fallabhängig priorisiert werden, ist eine gesamtheitliche Effizienz von Flexibilität sichergestellt. Jedoch werden dadurch die Kosten der Flexibilität zweitrangig betrachtet, weshalb tendenziell mit einer Kostensteigerung gegenüber dem Ansatz im Redispatch2.0 zu rechnen ist. Der Umfang und die Vielfalt der Anlagen in einem städtischen Verteilnetz macht eine quantitative Auswertung jedoch sehr aufwendig. Aufgrund der für diesen Beitrag sondierten Datenbasis konnte noch keine valide und vollumfängliche Bewertung der Ansätze geliefert werden. Mit weiterführender Forschung soll diese Lücke in den kommenden Monaten geschlossen werden. Dabei sollen die nachfolgenden Punkte umgesetzt, analysiert und bewertet werden.

Der verfügbaren Datenbasis sollen alle notwendigen Informationen hinzugefügt werden. Dazu soll in Zusammenarbeit mit der Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netzen GmbH Annahmen und Literaturwerte weitestgehend reduziert werden und die tatsächlichen technischen Daten und kaufmännischen Preise ermittelt werden. Auf dieser Basis sollen für den gesamten Pool an Anlagen die sortierten Preise, die sortierte Effizienz und die daraus potenziell resultierenden CO₂-Emissionen für beide Ansätze ermittelt werden.

Darüber hinaus sollen zur Präzisierung der Ergebnisse mit Hilfe historischer Zeitreihen saisonale Effekte der Verfügbarkeit berücksichtigt werden. Beispielsweise stehen KWK-Anlagen als zuschaltbare Last vornehmlich außerhalb der Heizperiode zur Verfügung.

Um eine exakte Zuordnung der Anlagen im Netzgebiet durchführen zu können wird aktuell ein topologisches Netzmodell aufgebaut, in das die einzelnen Anlagen einsortiert werden. Damit

können für tiefergehende Auswertungen verschiedene Abrufszszenarien sowohl durch den vorgelagerten Übertragungsnetzbetreiber als auch durch den Verteilnetzbetreiber, definiert und ausgewertet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi); Energieeffizienzstrategie 2050; Dezember 2019; Berlin, Deutschland; [online] <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.pdf> [geprüft 05.04.2021]
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi); Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung; 28. September 2010; Berlin, Deutschland; [online] <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.html> [geprüft 05.04.2021]
- [3] Umweltbundesamt; Primärenergieverbrauch; [online] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#entwicklung-und-ziele> [geprüft 05.04.2021]
- [4] PCC veröffentlicht Sonderbericht über 1,5 °C globale Erwärmung (SR1.5); 8. Oktober 2018; Incheon, Südkorea; [online] <https://www.de-ipcc.de/256.php> [geprüft 05.04.2021]
- [5] European Commission; Übereinkommen von Paris; [online] https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_de#tab-0-0 [geprüft 05.04.2021]
- [6] Bundesnetzagentur (BNetzA); Erste Regeln zur Umsetzung des „Redispatch 2.0“ im Strommarkt; [online] https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2020/20201106_Redispatch2.html [geprüft 05.04.2021]
- [7] Agentur für Erneuerbare Energien e.V.; ERNEUERBARE ENERGIEN 2020 POTENZIALATLAS DEUTSCHLAND; Februar 2010; Berlin, Deutschland; [online] http://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/319.Potenzialatlas_2_Auflage_Online.pdf [geprüft 05.04.2021]
- [8] Agora Energiewende; Agorameter; [online] https://www.agora-energiewende.de/service/agorameter/chart/power_generation/05.03.2021/05.04.2021/ [geprüft 05.04.2021]
- [9] netzfrequenz.de; Regelleistung; [online] <https://www.netzfrequenz.info/regelleistung> [geprüft 05.04.2021]
- [10] Bundesnetzagentur (BNetzA); Preise und Rechnungen; [online] <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Verbraucher/Preis/eRechnTarife/preiseundRechnungen-node.html;jsessionid=6996A3ED048C21D94E188E6647BDFD5B> [geprüft 05.04.2021]
- [11] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz; Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien; [online] https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/ [geprüft 05.04.2021]
- [12] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz; Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung; [online] https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2016/ [geprüft 05.04.2021]

- [13] Umweltbundesamt; Umweltschädliche Subventionen; [online] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/wirtschaft-umwelt/umweltschaedliche-subventionen#direkte-und-indirekte-subventionen> [geprüft 05.04.2021]
- [14] Florian Zerzawy, Swantje Fiedler und Alexander Mahler; Subventionen für fossile Energien in Deutschland; Greenpeace e.V.; Juni 2017; Hamburg, Deutschland; [online] https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/2017-07-04_gpd_report_subventionen_fuer_fossile_energien_in_deutschland.pdf [geprüft 05.04.2021]
- [15] Bundesministerium der Finanzen; Sechs und zwanzigster Subventionsbericht; 23.8.2017, Berlin, Deutschland; [online] https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Oeffentliche_Finanzen/Subventionspolitik/2017-08-23-subventionsbericht-26-anlage.pdf?jsessionid=DFB716DE02D68C84E2FA0568560CD31F?_blob=publicationFile&v=1 [geprüft 05.04.2021]
- [16] Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH; Downloads; [online] <https://www.ulm-netze.de/online-services/downloads> [geprüft 09.04.2021]
- [17] SWU Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm GmbH; Zahlenspiegel 2019; [online] <https://www.swu.de/fileadmin/content/unternehmen/SWU-Zahlenspiegel-2019.pdf> [geprüft 09.04.2021]
- [18] David Stakic, Falko Ebe, Gerd Heilscher; Netzzellen Organisieren - Vorschläge für ein Energiesystem als kooperativer Verbund; Zukünftige Stromnetze für erneuerbare Energien; 2019; Berlin, Deutschland
- [19] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.; Automatische Letztmaßnahmen (VDE-AR-N 4142); [online] <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/netzbetrieb-sicherheit/netzbetrieb/fnn-automatische-letztmassnahmen-e-vde-ar-n-4142> [geprüft 09.04.2021]
- [20] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.; BDEW-Leitfaden zur Berechnung der Ausfallarbeit, Redispatch 2.0; Mai 2020, [online] https://www.bdew.de/media/documents/Awh_2020-05_RD_2.0_LF_Ausfallarbeit.pdf [geprüft 09.04.2021]
- [21] Bundesnetzagentur (BNetzA); Beschluss Az. PGMF-8116-EnWG § 13j; [online] https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Konsultationen/LaufendeKonsultationen/Redispatch/FestlegungMindestfaktoren.pdf?_blob=publicationFile&v=5 [geprüft 09.04.2021]
- [22] Deutscher Bundestag, 19. Wahlperiode; Entwurf eines Gesetzes zur Beschleunigung des Energieleitungsausbaus; Drucksache 19/7375; Januar 2019; [online] <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/073/1907375.pdf> [geprüft 09.04.2021]
- [23] Bundesanzeiger Verlag; Bundesgesetzblatt Online, Bürgerzugang; Gesetz zur Beschleunigung des Energieleitungsausbaus vom 13. Mai 2019 [online] https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav#_bgbl_%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl119s0706.pdf%27%5D_1618837976974 [geprüft 19.04.2021]
- [24] SWU Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm GmbH; Allgemeines zur Grund- und Ersatzversorgung Strom; [online] <https://www.swu.de/privatkunden/service/strom/preise-grund-und-ersatzversorgung-strom/> [geprüft 19.04.2021]

- [25] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V.; Positives Signal für den Klimaschutz: 40 Prozent Wachstum bei Wärmepumpen; [online]
<https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/positives-signal-fuer-den-klimaschutz-40-prozent-wachstum-bei-waermepumpen/#content> [geprüft 19.04.2021]
- [26] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE; Abschlussbericht Wärmepumpen in Bestandsgebäuden, Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „WPsmart im Bestand“; Freiburg; Version 2.1 (Stand: 23.07.2020) [online]
https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Forschungsprojekte/BMWi-03ET1272A-WPsmart_im_Bestand-Schlussbericht.pdf [geprüft 19.04.2021]
- [27] Michael Sterner, Ingo Stadler; Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration; Springer-Verlag; 2014; ISBN 978-3-642-37379-4

Die Autoren

David E. Langer

david.langer@thu.de

Promovend an der Technischen Hochschule Ulm und der Universität für Technologie und Ökonomie Budapest

Asset-Manager und Mitglied des Kompetenzteams-Wasserstoff bei den Stadtwerken Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH

Fachinteressen: Erneuerbare Energien, Sektorenkopplung, Netzsimulation, Stadtgebiete, Wasserstoff

Dr. Holger Ruf

holger.ruf@ulm-netze.de

Gruppenleiter Asset-Management u. Planung/Projektierung innerhalb der Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm Netze GmbH

Fachinteressen: Integration von Erzeugungsanlagen in Verteilnetze und die Prognose von Flexibilität

Prof. Dr.-Ing. Georg Kleiser

Georg.Kleiser@thu.de

Dekan der Fakultät Produktionstechnik und Produktionswirtschaft, Mitglied des Senats, Mitglied Institut für Energie und Antriebstechnik

Fachinteressen: Industrielle Energiesysteme und Energiemanagement, Energieeffizienz und Energierückgewinnung und -speicherung in industriellen Versorgungssystemen

Demonstrationsprojekt „SoLAR“ in Allensbach

Erfolgreiche Energiewende durch intelligente Sektorkopplung

Stefan Werner
Easy Smart Grid GmbH

Abstract

Das Projekt SoLAR in Allensbach am Bodensee demonstriert die Möglichkeiten intelligenter Sektorkopplung. Durch ein Echtzeit-Preissystem auf der Basis von Netzzustandsgrößen können flexible Geräte jeder Art, Leistung und Verfügbarkeit als „virtuelle Batterien“ eingesetzt werden. Der Ansatz löst damit das Hauptproblem der Energiewende: die nicht an herkömmliche Verbrauchsprofile angepasste und volatile Verfügbarkeit erneuerbarer Energien. Die Kosten für Energiespeicherung und Netzausbau werden minimiert bei gleichzeitiger hoher Verfügbarkeit und Sicherheit und geringer Komplexität des Systems.

Das Projekt ging aus einer Initiative engagierter Bürger hervor und wird von renommierten Forschungsinstituten und Unternehmen getragen. Die Demonstration erfolgt in einer neu errichteten Liegenschaft mit 22 Wohneinheiten in 12 Doppelhaushälften und 2 Mehrfamilienhäusern sowie einem Bestandsgebäude mit 3 Wohneinheiten. Gesteuert werden ein BHKW, 12 Wärmepumpen, diverse Haushaltsgeräte, Ladestationen für Elektrofahrzeuge und Batteriespeicher. Ziel in der Liegenschaft ist die Steigerung der Eigenverbrauchsrate des Stroms aus BHKW und lokalen PV-Anlagen von etwa 50% auf über 80%.

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass das gesteckte Ziel erreichbar ist. In einer nachfolgenden Demonstration mit dem Stadtwerk Haßfurt soll anschließend gezeigt werden, dass das System auf ein ganzes Verteilnetz anwendbar und wirtschaftlich ist. In diesem Zusammenhang soll auch ein neues dynamisches Tarifsysteem vorgeschlagen werden, dass intelligente Sektorkopplung generell ermöglicht und einen maximalen volks- und betriebswirtschaftlichen Nutzen ermöglicht. Damit wird der Regulierungsvorgabe der EU entsprochen.

Hauptteil

Das Projekt „SoLAR“ (Smart Grid ohne Lastgangmessung Allensbach – Radolfzell) wurde durch engagierte Bürger der Lokalen Agenda 21 in Allensbach initiiert und wird für den Zeitraum 2018 bis 2021 durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg im Rahmen des Förderprogramms „BWPLUS“ gefördert.

Vorausgegangen war eine Klimaschutzrichtlinie der Gemeinde von 2006, in der sich die Gemeinde das Ziel setzte, bis 2050 klimaneutral zu sein. Mit Geldern aus dem Wettbewerb

„Klimaneutrale Kommune“ wurden dazu seit 2010 vielfältige Untersuchungen vorgenommen, u.a. eine Studie zur Sektorkopplung Strom-Wärme, die zeigte, dass durch die Kopplung von BHKW und Wärmepumpen Strom in der Menge von 80% des konventionellen Bedarfs aus Photovoltaik und Windkraft erzeugt und lokal im Netz aufgenommen werden kann.

2016 entwickelte die Lokale Agenda aus der Studie ein Konzept („Klimaplan“), wie der Ort weitgehend mit erneuerbaren Energien versorgt werden könnte, wenn alle Sektoren, Strom, Wärme und Verkehr weitgehend elektrifiziert und intelligent miteinander gekoppelt werden. Die Gemeinde engagierte sich beim SINTEG Projekt C/Sells und wurde als „Partizipationszelle“ in die soziologischen Untersuchungen von C/Sells eingebunden [1]. Die Einbindung der Bevölkerung ist eine wichtige Komponente des Projektes.



Abbildung 1: Klimaplan der Lokalen Agenda 21 und Klimaaktivitäten der Gemeinde Allensbach

Abbildung 1 zeigt die geschätzten erforderlichen Installationsleistungen der verschiedenen Energieanlagen in Allensbach, die unter Nutzung von Erdgas für BHKW und geeigneten Dämmmaßnahmen im Gebäudebestand zu einer Reduzierung des CO₂-Ausstoßes um 75% gegenüber der Referenz 2002 führen würden.

Für eine wirtschaftliche Umsetzung der Energiewende war die Prämisse des Konzeptes, weitgehend auf Batteriespeicher und Netzausbau verzichten zu können. Notwendig ist dazu die intelligente Steuerung der Geräte und Anlagen auf Basis des Angebotes an erneuerbaren Energien in Echtzeit. In der Projektantragsphase wurde dazu die patentierte Technologie zum dezentralen Energiemanagement der Easy Smart Grid GmbH (ESG) [2] als geeigneter Ansatz identifiziert. Im Laufe des Projektes wurde die ursprünglich für Inselnetze konzipierte Technologie auf Anwendungen im kontinentaleuropäischen Netz angepasst und weiterentwickelt.

Abbildung 2 zeigt ein typisches Bedarfsprofil flexibler Geräte für europäische Haushalte [3] und die mögliche Anpassung an ein typisches Angebot erneuerbarer Energien durch dezentrales Energiemanagement. Die Flexibilität der Geräte ist abhängig vom verfügbaren Speicher, z.B. in Form von Kälte in Kühlgeräten, und der Nutzungsflexibilität, z.B. der Bereitschaft der Nutzer, beim Aktivieren eines Geschirrspülers dem Gerät durch Zeitvorwahl

einen längeren Zeitraum bis zur Entnahme des Geschirrs zur Verfügung zu stellen, innerhalb dessen der Spülprozess flexibel verschoben werden kann. Das Beispiel zeigt eine mögliche Bedarfsverlagerung zur Nutzung erneuerbarer Energien unter Berücksichtigung typischer Restriktionen.

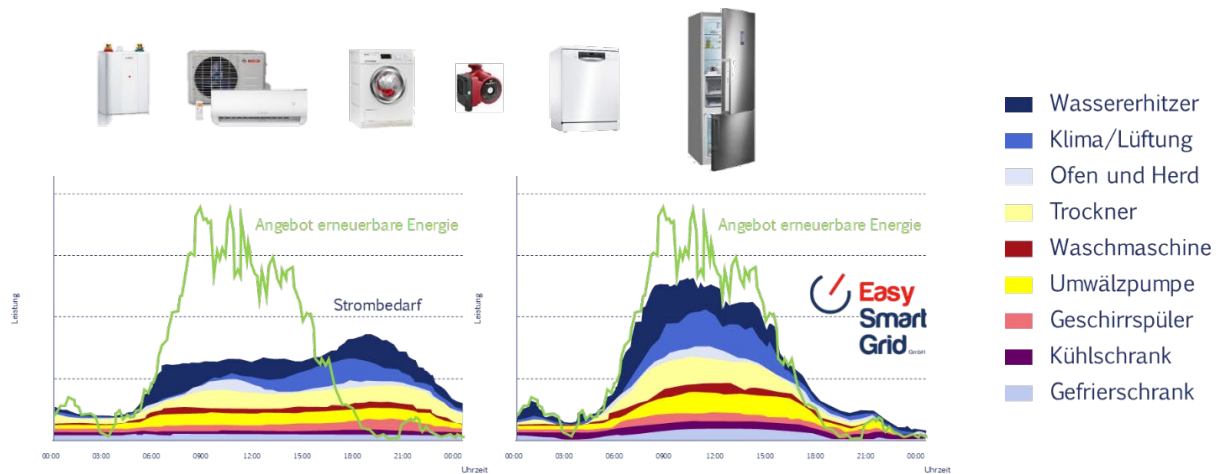


Abbildung 2: typisches Bedarfsprofil und Flexibilitätspotential Haushaltsgeräte

Der dargestellte Effekt ist von der Wirkung her identisch zur Aufnahme überschüssiger elektrischer Energie in einer Batterie und Abgabe an Geräte mit normalem Bedarfsprofil. Durch intelligente Steuerung der Geräte werden also kostengünstige „virtuelle Batterien“ erzeugt. Nach einer internen Schätzung von ESG können perspektivisch 50% des Energieverbrauchs elektrischer Geräte und Anlagen in Haushalt, Gewerbe und Industrie mit virtuellen Batterien der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien angepasst werden.

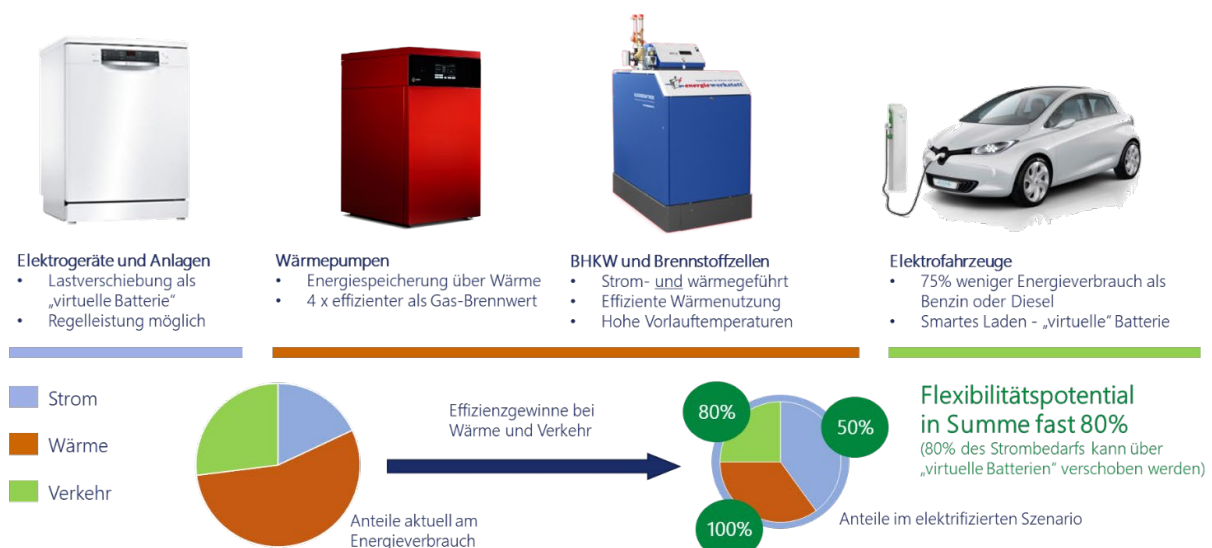


Abbildung 3: Hohe Effizienz und Flexibilität durch intelligente Sektorkopplung

Durch die Sektorenkopplung steht zukünftig ein noch deutlich größeres Flexibilisierungspotential durch intelligent gesteuerte BHKW, Wärmepumpen und Ladevorgänge für Elektrofahrzeuge zur Verfügung, wie Abbildung 3 in Anlehnung u.a. an [4] illustriert. Während der Stromverbrauch sich durch die Sektorkopplung deutlich erhöhen wird, stellt sie

gleichzeitig ein Flexibilitätspotential von geschätzt 80% des zukünftigen Stromverbrauchs zur Verfügung. Wärmepumpen, BHKW und Elektrofahrzeuge bieten gleichzeitig ein hohes Effizienzpotential, das den notwendigen Ausbau der erneuerbaren Energien begrenzt.

„Dunkelflauten“ werden im Allensbacher Konzept mit BHKW überbrückt. Die zukünftig notwendige saisonale Speicherung erneuerbarer Energie kann durch den Ersatz von Erdgas durch Wasserstoff bzw. regenerativ erzeugtes Methan geleistet werden.

Die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit intelligenter Sektorkopplung soll in SoLAR demonstriert werden. Dazu konnte die Kaufmann GmbH, Oberstadion, als Eigentümer und Generalunternehmer eines klimafreundlichen Wohnprojektes [5] in Allensbach gewonnen werden. Kaufmann errichtet dort 12 Doppelhaushälften (DHH) und 2 Mehrfamilienhäuser (MFH) mit insgesamt 22 Wohneinheiten in KfW 40 Holzbauweise.

Abbildung 4 zeigt die Liegenschaft und eine Übersicht der wichtigsten Projektpartner. Details können der Projektseite im Internet [6] entnommen werden. Für die wissenschaftliche Begleitung der Umsetzung wurden das International Solar Energy Research Center (ISC) Konstanz und das European Institute for Energy Research (EiFER) aus Karlsruhe gewonnen. In der Liegenschaft wird ein privates Stromnetz als Kundenanlage installiert, das von der Energiedienst AG in Rheinfelden als wettbewerblicher Betreiber für intelligente Messstellen (iMSB) und Energieversorger betrieben wird. Die DHH verfügen jeweils über eine eigene PV-Anlage und ggf. einen Batteriespeicher (KfW 40+). Auf den MFH sind PV-Anlagen durch Energiedienst installiert. Die PV-Leistung beträgt insgesamt etwa 80 kWp.



Abbildung 4: Demonstrationsliegenschaft und Projektpartner

Abbildung 5 zeigt einen Schnitt durch das Kellergeschoss der Liegenschaft mit einer verbindenden Tiefgarage. Gelb markiert sind die 12 DHH, die jeweils durch eine eigene Wärmepumpe versorgt werden. Wärme aus Grundwasser wird über eine Sole-Ringleitung verteilt, die auch zum Kühlen aller Gebäude genutzt werden kann. Die 2 MFH und ein Bestandsgebäude werden über ein zentrales BHKW von Energiedienst mit 21 kW elektrischer Leistung mit Wärme versorgt. Die Wärmeerzeuger werden intelligent gesteuert, zusammen mit Ladepunkten für Elektrofahrzeuge, Haushaltsgeräten in allen Wohnungen sowie Batteriespeichern in einigen DHH. Insgesamt werden so bis zu 100 Geräte in der Liegenschaft koordiniert. Ziel ist die Erhöhung der Eigenverbrauchsrate der vor Ort erzeugten elektrischen Energie von 50% auf über 80%.



Abbildung 5: Schnitt durch das Kellergeschoss der Demonstrations-Liegenschaft

Das Prinzip der intelligenten Steuerung der Geräte durch ESG zeigt schematisch Abbildung 6. Basis der Technologie ist die Ableitung eines Preissignals in Echtzeit, idealerweise jede Sekunde, aus dem Netzzustand. Das Signal (Balance Indicator, BI) zeigt in einem normierten Wertebereich zwischen -1 und +1 an, ob tendenziell Energieüberschuss (niedriger Preis) oder -mangel (hoher Preis) herrscht. Je nach Nutzungs- bzw. Geschäftsmodell werden andere Werte gemessen. Die Energiebilanz eines Inselnetzes kann an jedem Ort im Netz direkt aus der Frequenz ermittelt und in einen BI umgesetzt werden. Im Fall der SoLAR-Liegenschaft handelt es sich um eine gekoppelte Netzzelle, deren Energiebilanz als Leistungswert am Anschluss der Kundenanlage zum Netz der öffentlichen Versorgung gemessen werden kann.

Ergänzend zur Leistungsbilanz können auch Engpässe im Netz direkt aus der Spannung am Netzanschluss oder aus der Strombelastung einer Netzeinheit, z.B. an einem Abgang eines Ortsnetztransformators (ONT), in ein Preissignal (Congestion Indicator, CI) zwischen -1 und +1 umgewandelt werden. Sind mehrere Netzzustände relevant, werden die unterschiedlichen Preissignale zu einem Signal geeignet zusammengeführt.



Abbildung 6: Prinzip der dezentralen Gerätesteuerung durch Preissignale aus Netzzuständen

Im Zielszenario wird das Preissignal direkt im Smart Meter aus Messungen gebildet (BI Generator) bzw. von Extern empfangen und an die flexiblen Geräte weitergeleitet. Die Bildungsvorschrift für das Preissignal kann cybersicher durch einen plombierten Softwarestecker vorgegeben werden

Die Steuerungen der flexiblen Geräte reagieren völlig autonom auf das Preissignal, indem sie, in Abhängigkeit ihrer aktuell verfügbaren Flexibilität, zu wirtschaftlich optimalen Zeiten in Betrieb gehen. Eine Datenübermittlung an zentrale Steuerungen ist nicht notwendig. Der Rückkanal wird direkt aus der Reaktion des Netzes auf die Schalthandlungen der Geräte gebildet.

Da lediglich das Preissignal an die Geräte übermittelt wird (ca. 1 Byte/sec) und die Algorithmen sehr einfach gehalten werden können, können zur Steuerung direkt die vorhandenen Gerätecontroller genutzt werden. Zum Abschluss des Projektes werden die Hersteller der Wärmepumpen (Weider, Hard in Österreich) und des BHKW (Energiewerkstatt, Hannover) die optimierten Algorithmen direkt in ihre Steuerungen übernehmen.

Im Fall von SoLAR wird das Preissignal nicht direkt in einen Tarifpreis umgesetzt, sondern nur zur Optimierung genutzt. Zukünftige dynamische Tarife könnten das Signal direkt in einen Strompreis oder ein Netzentgelt umrechnen, indem das Preissignal mit einem fixen „Flexibilitätsbonus“ multipliziert und als Bonus bzw. Malus von einem fixen Basispreis subtrahiert wird. Die Werte können im Smart Meter gespeichert und nach einer Abrechnungsperiode als Mittelwert oder Zuordnung von Arbeit zu verschiedenen Tarifstufen ausgegeben werden.

Abbildung 7 und 8 zeigen den Effekt des Preissignals aus der Leistungsbilanz am Liegenschaftsanschluss auf das Verhalten der Wärmeerzeuger in der Liegenschaft. Dargestellt sind jeweils 2 Tage. Sie basieren auf Simulationen mit dem „Virtuellen Demonstrator“, einem digitalen Zwilling der Liegenschaft, der vom EIFER in das Projekt eingebracht wird, und die Liegenschaft mit allen Geräten realitätsnah im Sekundentakt virtuell nachstellt. Im Laufe des Jahres 2021 werden die Berechnungen in der Realliegenschaft verifiziert.

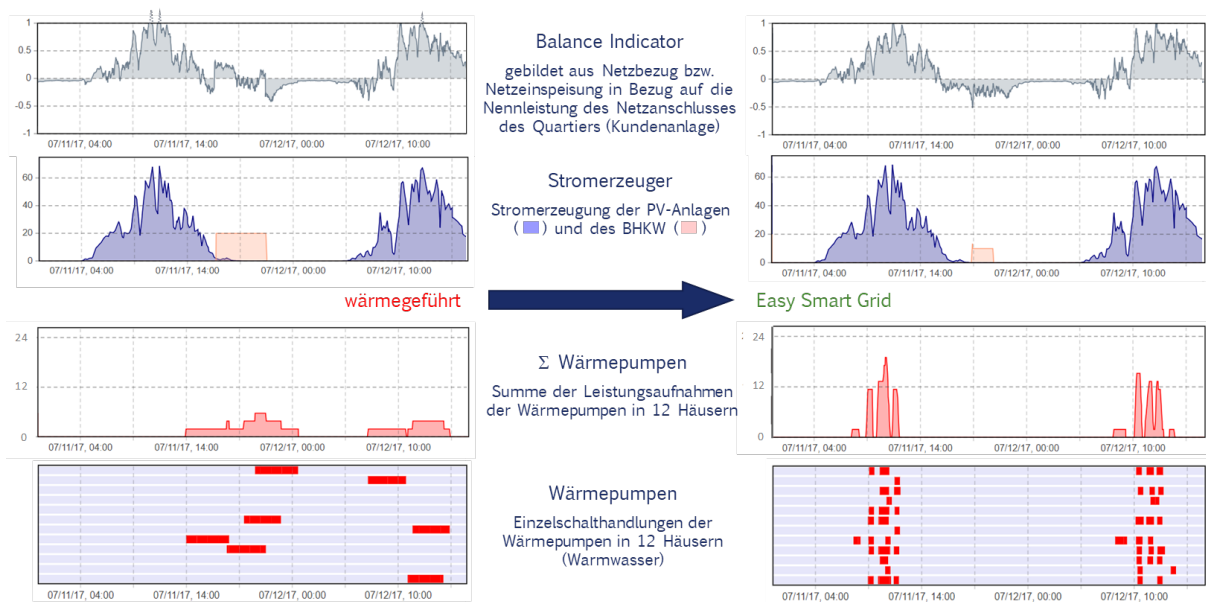


Abbildung 7: Reaktion von BHKW und Wärmepumpen auf das Preissignal, Szenario Sommer

Links ist jeweils das Verhalten bei rein wärmegeführter Steuerung über einen 2-Punkt-Regler anhand der Temperatur am Pufferspeicher dargestellt, rechts das Verhalten bei Empfang und Auswertung des Preissignals (Balance Indicator). Im Sommer-Szenario (nur Warmwasserbereitstellung) ist deutlich zu erkennen, dass die Wärmepumpen ihre Betriebszeiten zu den Zeiten maximaler PV-Leistung verschieben. Dabei lernen sie die zu erwartenden Preisbereiche, in denen eine Aktivierung lohnt. Geräte, deren Pufferspeicher weniger gefüllt sind, reagieren aufgrund ihrer geringeren Flexibilität als Erste. Durch das Echtzeitsystem wird gleichzeitig Regelenergie zur Verfügung gestellt: Bricht die Leistungsbilanz ein, z.B. durch Wolkenzug, schalten die Wärmepumpen sofort aus, wenn es ihre Betriebsparameter (z.B. Mindestlaufzeit) erlauben. Das BHKW hat seinen Betriebsbereich auf die Abendstunden mit dem höchsten Leistungsbedarf verlegt und drosselt die Leistung, so dass es jeden Tag einmal zu Zeiten mit maximalem Ertrag (niedrigster BI, höchster Preis) in Betrieb geht.

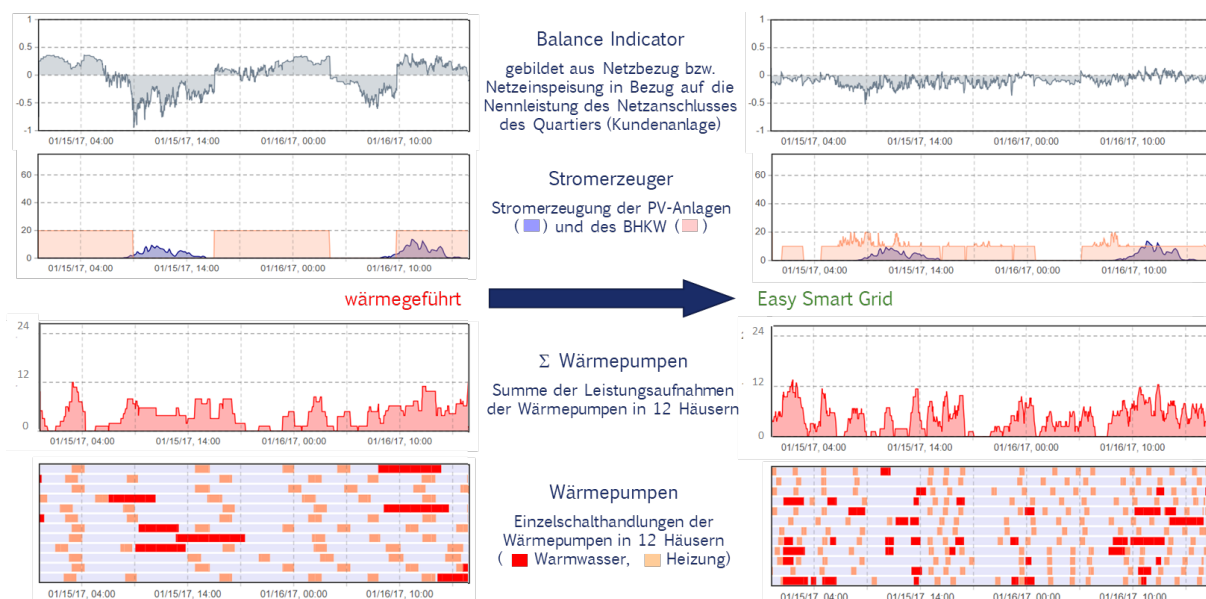


Abbildung 8: Reaktion von BHKW und Wärmepumpen auf das Preissignal, Szenario Winter

Da die Wärmeerzeuger im Sommer wenig in Anspruch genommen werden, ist die netzstabilisierende Wirkung sichtbar, aber nicht maximal. Im Winter ist die Laufzeit durch den zusätzlichen Heizenergiebedarf deutlich länger und die netzstabilisierende Wirkung des intelligenten Betriebs entsprechend hoch. Die hohe Nachfrage der Wärmepumpen nach Strom und das große Angebot des BHKW führen im Zusammenspiel zu einem stabilen „Preis“, der sich in einer gleichmäßigen Netzbelastung abbildet. Der BI ist nahe dem Zielwert 0, was einer Quasiautarkie entspricht. Wären die unterschiedlichen Wärmekreise gekoppelt, wäre der BI durch das flexible Zusammenspiel der Wärmeerzeuger noch gleichmäßiger und näher am Zielwert.

Abbildung 9 zeigt die Steuerung von Geräten im Rahmen von SoLAR, die mit herkömmlichen Energiemanagementsystemen auf der Basis von Fahrplänen und Aggregatoren nicht möglich wäre: Kühl- und Gefriergeräte sind zwar prinzipiell flexibel, haben im Normalfall aber eine so geringe Energiespeicherkapazität und damit zeitliche Flexibilität, dass die Teilnahme an Strommärkten nicht möglich ist. Innerhalb eines Echtzeitpreissystems können sie aber durchaus einen wertvollen Beitrag zur Netzstabilisierung leisten. Im Rahmen von SoLAR stellt die BSH Hausgeräte GmbH deshalb jedem Haushalt kostenlos ein Kühlgerät zur Verfügung, um diesen Effekt in der Realität zu testen. In der Simulation mit 48 Geräten ist erkennbar, wie die Geräte ihre Betriebszeiten als „Energieschwarm“ sinnvoll verschieben, ohne dass ein destabilisierender „Gleichzeitigkeitseffekt“ auftritt. Die Leistungsbilanz am Netzanschluss wird gleichmäßiger. Auf das Zuschalten des BHKW (rote Markierungen) reagieren die Kühlgeräte mit maximaler Leistungsaufnahme in Summe und dämpfen so den Leistungssprung im Netz.

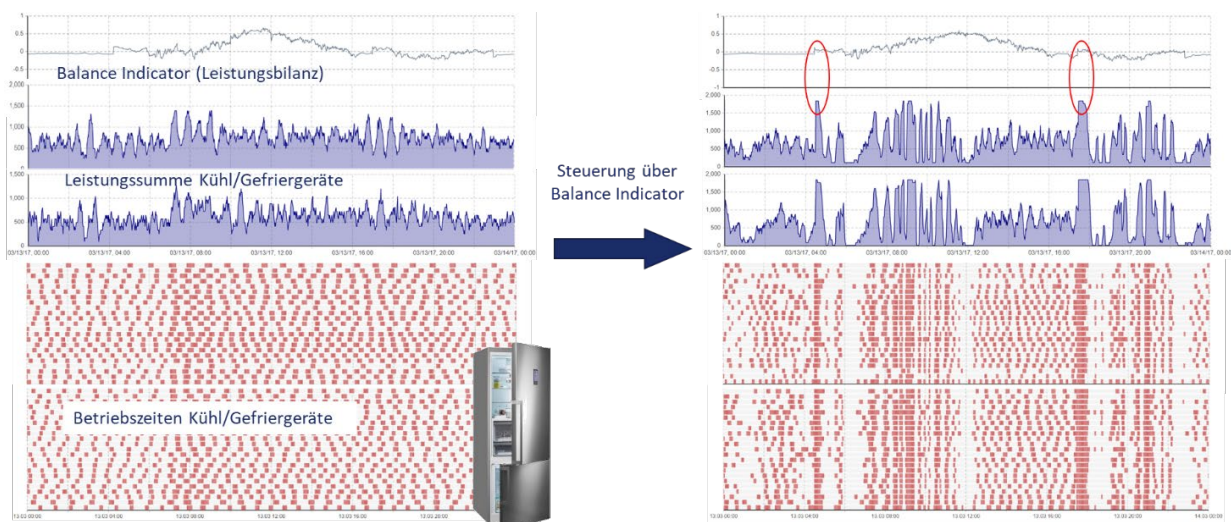


Abbildung 9: Reaktion von Kühl- und Gefriergeräten auf das Preissignal.

Mitarbeiter des Deutschen Forschungszentrum für künstliche Intelligenz (DFKI) in Bremen haben die Netzstabilisierung durch die Kühlgeräte für SoLAR quantitativ untersucht und visualisiert (Abbildung 10): Die kurzfristige Abweichung der Leistung von einem gleitenden Mittelwert wird um etwa 10% verringert. Laut Auskunft von BSH wären allein in Deutschland 2,4 GW Regelleistung durch Kühlgeräte verfügbar - die gesamte Primärregelleistung für das europäische Verbundnetz beträgt 3 GW. Somit könnten die Kühlgeräte durch intelligente Sektorkopplung einen wertvollen Beitrag zur Primärregelenergie leisten. Siehe auch [7].

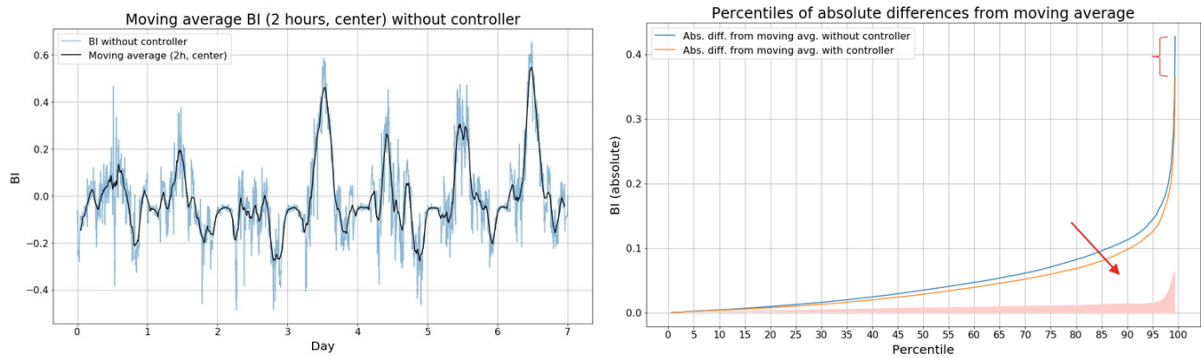


Abbildung 10: Glättung des Lastprofils durch die intelligente Steuerung der Kühlgeräte

Die Steuerung von zeitlich flexiblen Geräten ohne Pufferspeicher, wie Elektroladestationen, Geschirrspüler, Waschmaschinen und Trockner, wird aktuell in der Simulation vorbereitet, genauso wie die Umsetzung der Ansteuerung der Geräte in der realen Liegenschaft. Abbildung 11 zeigt dazu das Steuerkonzept.

Der Balance Indicator wird zentral am Netzanschluss der Kundenanlage ermittelt und von dort direkt an die Steuerungen für das BHKW, der Ladepunkte für Elektrofahrzeuge und der Haushaltsgeräte in den Mehrfamilienhäusern übermittelt. In den Doppelhaushälften wird das zentrale Preissignal mit einem individuellen Balance Indicator für das jeweilige Haus geeignet zusammengefasst, um die Eigenversorgung der Doppelhaushälften mit privatem PV-Strom zu maximieren, und dann an die Steuerungen für Wärmepumpe und Haushaltsgeräte übermittelt.

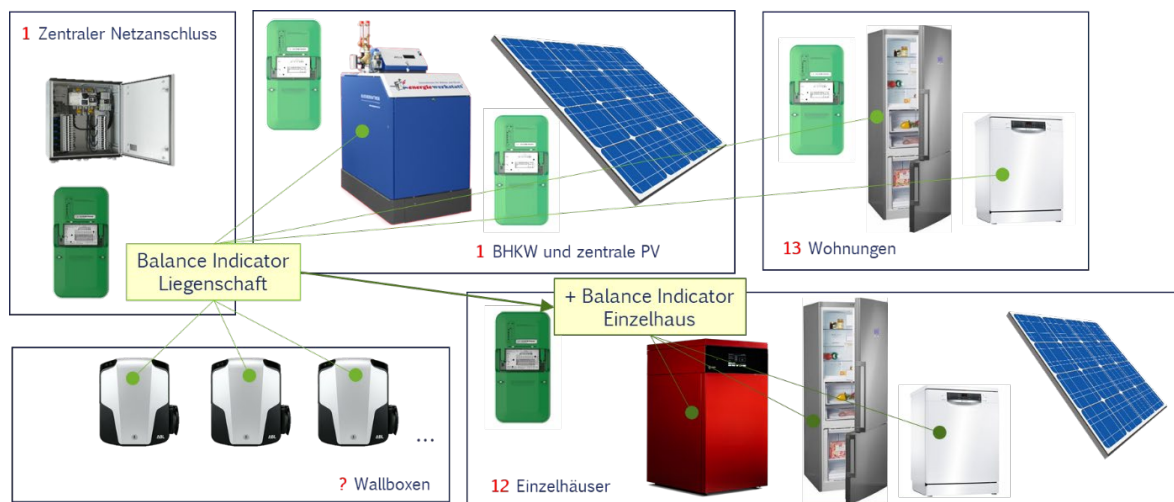


Abbildung 11: Implementation des Steuersystems in der Demo-Liegenschaft

Die reale Ausgestaltung der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) im Projekt durch das ISC Konstanz zeigt Abbildung 12. Zur Bildung der Preissignale (Balance Indicator, BI) und zur Steuerung der Geräte (Markierung „C“ = Controller) werden Kunbus RevPi Microcontroller eingesetzt, die über ein lokales Ethernet miteinander verbunden sind und die Netzzustandsdaten an wichtigen Netzknoten aus den Smart Meter Gateways (SMGW) auslesen. Die Kommunikation zur Steuerung des BHKW und der Wärmepumpen erfolgt mit Modbus RTU über jeweils eine serielle Schnittstelle. Ladepunkte für Elektrofahrzeuge werden über Ethernet angesprochen. Die Kommunikation mit den steuerbaren Haushaltsgeräten erfolgt über die zentralen Server von HomeConnect (BSH) bzw. Miele@home (Miele) über das

Internet. Die Hausgeräte sind dabei über WLAN ans Internet angebunden, die Microcontroller direkt über Kabel.



Abbildung 12: Ausgestaltung der IKT zur Gerätesteuerung in SoLAR

Das Demonstrations-System braucht noch zusätzliche Controller, eine aufwändige Verkabelung und die Implementation unterschiedlicher Schnittstellen. Die Anbindung der Hausgeräte über die zentralen Server kann durch Störungen im Internet unterbrochen sein und ist in der Zugriffsrate begrenzt, so dass insbesondere bei den Kühlgeräten Kompromisse bei der Steuerung eingegangen werden müssen.

Abbildung 13 zeigt am Beispiel der SoLAR-Liegenschaft, wie ein zukünftiges IKT-System aussehen könnte.

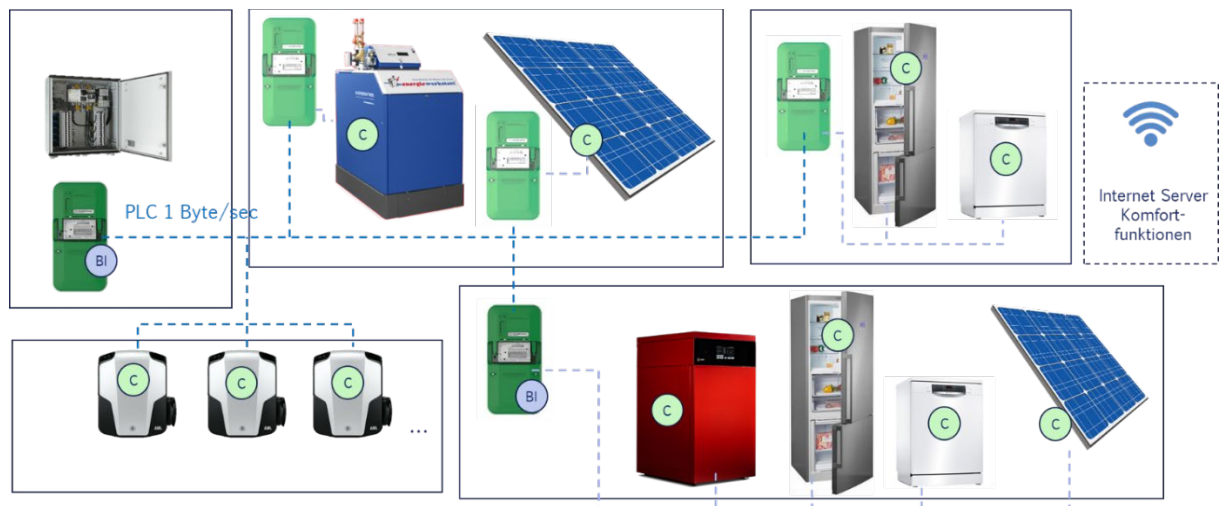


Abbildung 13: Szenario für ein zukünftiges IKT-System für intelligente Sektorkopplung

Die Preissignale werden direkt in den Smart Metern gebildet (BI) und über sie kommuniziert. Als Kommunikationsweg für die Preissignale wird Power Line Communication (PLC) gewählt. Die notwendige Senderate von etwa 1 Byte/sec kann dadurch kostengünstig und störungssicher, ohne die Notwendigkeit der Verlegung von zusätzlichen Kabeln und der Implementation unterschiedlicher Schnittstellen, realisiert werden. In den Geräten sind einfache PLC-Empfänger installiert, die das Preissignal an die geräteeigenen Steuerungen (C)

übergeben, wo sie in Steuerbefehle umgesetzt werden. Internet Server werden nur noch für Komfort-Funktionen verwendet. Die möglicherweise notwendige Abregelung der PV-Anlagen kann über das gleiche System realisiert werden. Eine Einbindung der Geräte über lokale Energiemanagement-Systeme (EMS) ist ebenfalls möglich.

Fazit

Die Entwicklung und Umsetzung der intelligenten Sektorkopplung im Virtuellen Demonstrator und in der realen Liegenschaft im Demonstrationsprojekt SoLAR beweisen, dass eine klimaneutrale Energieversorgung mit 100% erneuerbaren Energien möglich ist. Das verbleibende Hauptproblem der Energiewende, dass die volatile Energieerzeugung aus Sonne und Wind nicht dem Lastprofil der Verbraucher folgen kann, wird durch die maximale Nutzung der Flexibilität im zeitlichen Betrieb insbesondere der Stromverbraucher, aber auch flexibler BHKW, gelöst. Die Einbindung saisonaler Speicherung durch Wasserstoffelektrolyse in die intelligente Sektorkopplung ist im Weiteren zu untersuchen.

Durch Integration der notwendigen IKT direkt in die Hardware von Smart Metern und Gerätesteuern können die Kosten zur Umsetzung zukünftig minimiert werden, so dass Flexibilität zu sehr geringen Kosten verfügbar gemacht wird. Gleichzeitig maximiert das System die Resilienz des Stromsystems im Rahmen eines zellulären Ansatzes [8] und bietet maximale Sicherheit vor Cyberangriffen und maximalen Datenschutz.

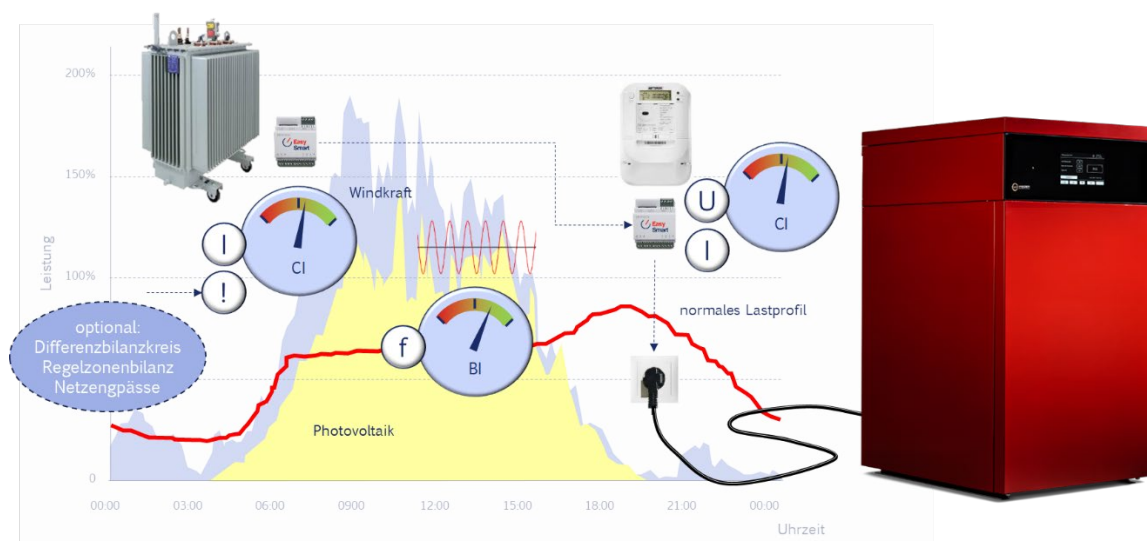


Abbildung 14: Netzsystemdienstleistungen durch intelligente Sektorkopplung

Durch direkte Nutzung der Frequenz (f) zur Preisbildung und durch Bildung und Übermittlung von Preissignalen per PLC aus Spannung (U), Strombelastung (I) oder Leistungsbilanzen über das Stromnetz kann ein „Plug-and-Play“ System realisiert werden. Zentrale Größen der Netzbetreiber (!) können über Ortsnetzstationen, die an die Leitzentralen angebunden sind, per PLC an die Netzanschlüsse übermittelt werden. Siehe Abbildung 14.

In einer nächsten Demonstrationsstufe will das Stadtwerk Haßfurt, assoziierter Partner von SoLAR, die Technologie aus SoLAR nutzen, um den Eigenverbrauch erneuerbarer Energien in

einem ganzen Verteilnetz zu maximieren. Zusammen mit verschiedenen Akteuren der kommunalen Energiebranche sollen dabei Vorschläge gemacht werden, wie das heutige Tariffsystem weiterentwickelt und zukunftssicher gemacht werden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] Smart Grid-Plattform BW. (2021, April 19). Ich bin Zukunft - Allensbach [Online]. Available: <https://www.ich-bin-zukunft.de/regionen/allensbach/>.
- [2] T. Walter, „Verfahren zum Regeln des Verhältnisses zwischen eingespeister und entnommener elektrischer Energie in einem elektrischen Energieversorgungsnetz“, Europäisches Patent EP 2 875 560 B1, Juli 19, 2012.
- [3] R. Stamminger, Synergy Potential of Smart Domestic Appliances in Renewable Energy Systems. Bonn: Shaker Verlag, 2009.
- [4] V. Quaschnig, Sektorkopplung durch die Energiewende. Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung. Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin, 2016.
- [5] Kaufmann Bau. (2021, April 19). „Wohnen in Allensbach“. [Online]. Available: <https://www.wohnen-allensbach.de/>.
- [6] ISC Konstanz. (2021, April 19). SoLAR - Smart Grid ohne Lastgangmessung Allensbach - Radolfzell. [Online]. Available: <https://solarlago.de/solar-allensbach/>.
- [7] E. Kremers et al., „Emergent synchronisation properties of a refrigerator demand side management system“, Applied Energy, vol. 101, pp. 709 - 717, 2013.
- [8] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Zellulares Energiesystem. Ein Beitrag zur Konkretisierung des zellularen Ansatzes mit Handlungsempfehlungen. Frankfurt am Main: Energietechnische Gesellschaft (ETG), 2019.

Der Autor

Stefan Werner

stefan.werner@easysg.de

Solution Manager, Easy Smart Grid GmbH, Karlsruhe

Projektkoordinator „SoLAR“ im Auftrag des ISC Konstanz

Sprecher Arbeitskreis „Energie, Ressourcen, Klimaschutz“, Lokale Agenda 21, Allensbach

Konzept und Umsetzung eines automationsgestützten Energiemanagements für komplexe Liegenschaften

P. Knoll, M. Straßer, Prof- Dr.-Ing. M. Becker
Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE)
Hochschule Biberach, Biberach University of Applied Sciences

Zusammenfassung

An fast allen Hochschulen für angewandte Wissenschaften (HAW) in Baden-Württemberg gibt es bzgl. des technischen Energie- und Gebäudemanagements keine durchgehenden Strukturen. Vielmehr sind diese Strukturen an den Hochschulen über die letzten Jahre unstrukturiert gewachsen und weisen durch die verschiedenen Ausbausituationen eine Vielzahl von unterschiedlichsten Technologien bezüglich Zählerstrukturen, Automationskomponenten und Kommunikationsschnittstellen auf. Vielfach werden auch noch Zähler manuell abgelesen und erfasst, was zu einem erhöhten Zeitaufwand des Personals führt und fehleranfällig ist. Bezüglich eines systematischen und standardisierten Energiedatenmanagements besteht in vielen Liegenschaften außerdem das Problem, dass bereits automatisch ausgelesene Zähler (z.B. durch M-Bus) in proprietären Datenbanken mit unterschiedlichsten Datenformaten und Bezeichnungen abgelegt werden. Diese Rahmenbedingungen erschweren ein systematisch automationsgestütztes Energie- und Gebäudemanagement mit standardisierten Energieanalysen, -visualisierungen und –berichten als notwendige Basis für einen nachhaltigen Gebäudebetrieb.

In einem wissenschaftlichen Begleitforschungsprojekt der Hochschulen Biberach und Offenburg wird daher ein Konzept für ein automationsgestütztes Energie- und Gebäudemanagement mit Umsetzung von standardisierten Mess- und Zählerstrukturen sowie einem systematischen Energiedatenmanagement speziell für den Hochschultypus HAW in Baden-Württemberg entwickelt. Im Rahmen des Projekts soll ausgehend von der Entwicklung und Erprobung an vier Pilothochschulen u.a. auch ein Leitfaden für ein agiles Energiemanagement erstellt werden, welcher im weiteren Schritt dann auch in der Breite auf Liegenschaften ähnlicher Größe und Nutzung in Baden-Württemberg übertragen werden kann. Ein weiteres zentrales Hauptziel des Projektes ist es, eine standardisierte und automatisierte Archivierung von Messdaten in einer herstellerunabhängigen Datenbank nach einer standardisierten Datenstruktur zu erreichen. Solch eine Datenstruktur stellt auch die notwendige Grundlage für zukünftige Anforderungen digitalisierter Bauprozesse, die mit den Themen Building Information Modeling (BIM) und digitaler Zwilling eng verbunden sind.

Aufbauend auf dieser Datenbank können über eine standardisierte Schnittstelle unterschiedlichste Softwaretools für die Auswertung und Visualisierung von Energie- und Anlagendaten zugreifen, ohne dass zusätzlich oder nachträglich aufwändige und kostenintensive Exportfunktionen oder projektspezifische Schnittstellen eingerichtet werden müssen.

Energiemanagement-Konzept – Entwicklung und erste Umsetzungsschritte

Das Land Baden-Württemberg hat sich zum Ziel gesetzt, eine annähernde Klimaneutralität in der Landesverwaltung bis zum Jahr 2040 zu erreichen. Hierzu sollen die CO₂-Emissionen der Landesgebäude bis 2030 um mindestens 65 % und bis 2040 sogar um 80 % gegenüber dem Referenzwert von 1990 gesenkt werden. Das Hochschulsystem trägt hier mit einem Anteil von 60 % des Gesamtenergieverbrauchs der Landesgebäude bei. Der neu verabschiedete Hochschulfinanzierungsvertrag (HoFV II) schreibt vor, dass zukünftig in den Struktur- und Entwicklungsplänen der Hochschulen ein Kapitel für den Klimaschutz integriert sein muss, um realisierbare und messbare Ziele zur Energieeffizienz festzulegen. Um die Fortschritte der Energieeffizienzsteigerung und somit die CO₂-Einsparung messbar zu machen, wird an den Hochschulen zudem die Einführung eines Monitoring-Systems mit dem Wissenschaftsministerium erarbeitet [1].

Das stellt die HAW vor enorme Herausforderungen, da viele Hochschulen dieser Hochschulart aufgrund ihrer Größe und historischen Entwicklung nicht mit einem durchgehenden Gebäudeautomationsmanagement (GA-M) und/oder einem Energiemanagementsystem (EmS) ausgestattet. Dies führt z.B. dazu, dass viele Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung (Heizung- Lüftungs- und Klimaanlage, Kälteanlagen, Beleuchtungsanlagen, ...) mit über lange Zeiträume unentdeckt mit einem schlechten Wirkungsgrad bzw. schlechter Energieeffizienz betrieben werden und Optimierungsmaßnahmen an der Anlagentechnik nicht oder nur erschwert entdeckt und zeitnah umgesetzt werden können.

Im Kontext dieses sich stark ändernden energiepolitischen Umfelds in Baden-Württemberg wurde 2019 das Pilotprojekt „EnMa-HAW“ von der Hochschule Biberach (HBC) zusammen mit den Hochschulen Furtwangen, Nürtingen/Geislingen und Offenburg als Projektpartner gestartet. Der Projektname „EnMa-HAW“ steht für die Konzeption und Umsetzung einer automationsgestützten Verbrauchserfassung zur Optimierung des Energiemanagements an nicht-universitären Hochschulen mit Umsetzung von Reallaboren an den vier projektbeteiligten Hochschulen. Damit soll zukünftig u.a. die manuelle Ablesung von Strom-, Wasser-, Gas- und Wärmemengenzählern sowie die Weiterleitung der Zählerdaten zur Kostenabrechnung durchgehend automatisiert ermöglicht werden.

Gleichzeitig wurde dadurch auch die Datengrundlage eines systematischen und aktiven Energiemanagements geschaffen. So stellt das EM-Konzept z.B. die Energiedaten zeitnah in einem Intervall von 5-15 Minuten zur Verfügung. Dadurch kann die Betreiberrolle der Hochschule aktiver wahrgenommen werden, da Fehler wie z.B. Leckagen in den Anlagen bzw. eine falsche Betriebsführung der Anlagen frühzeitig erkannt und somit unmittelbar entgegengesteuert werden kann. Ebenso kann durch die kontinuierliche Nutzung der Energiedaten das Nutzerverhalten an Hand von strukturierten Auswertungen und Visualisierungen (z.B. Carpet Plots, Scatter Plots) automatisiert analysiert und besser für gezielte Optimierungsmaßnahmen genutzt werden.

Wie bereits erwähnt, sind viele der HAW in Baden-Württemberg in ihrer Struktur des Gebäude- und Energiemanagements historisch gewachsen und weisen dadurch eine Vielzahl von unterschiedlichsten Technologien bezüglich Zählerstrukturen, Automationskomponenten und Kommunikationsschnittstellen auf. Dies soll exemplarisch mit Abbildung 1 gezeigt werden, in welcher der Ist-Zustand der Topologie am Campus Stadt der Hochschule Biberach (HBC) dargestellt ist. Am Campus Stadt wird beispielsweise eine EM-Software für den von der Hochschule vor einigen Jahren eingeführte EMAS-Prozess, ein firmenspezifisches (proprietäres) Gebäudeautomationsmanagement für Lehrzwecke in den Studiengängen Energie-Ingenieurwesen (Bachelor) und Energie- und Gebäudesysteme (Master), sowie eine

proprietäre Gebäudeleittechnik (GLT) speziell für die Heizungszentrale der Hochschule eingesetzt. Hierzu werden unterschiedlichste Bus-Protokolle wie M-Bus, Modbus-TCP und BACnet-IP sowie proprietäre Bus-Protokolle und verschiedenen Datenbank-Systeme eingesetzt.

Die unterschiedlichen Strukturen dieser Datenbanken erfordern die Kenntnis von verschiedensten Software-Tools und die verschiedenen Bus-Protokolle aufwändige Schnittstellen zum Export zum Zusammenführen und Weiterleiten der relevanten Energiedaten zur weiteren Analyse und gemeinsamen Auswertung für den gesamten Campus.

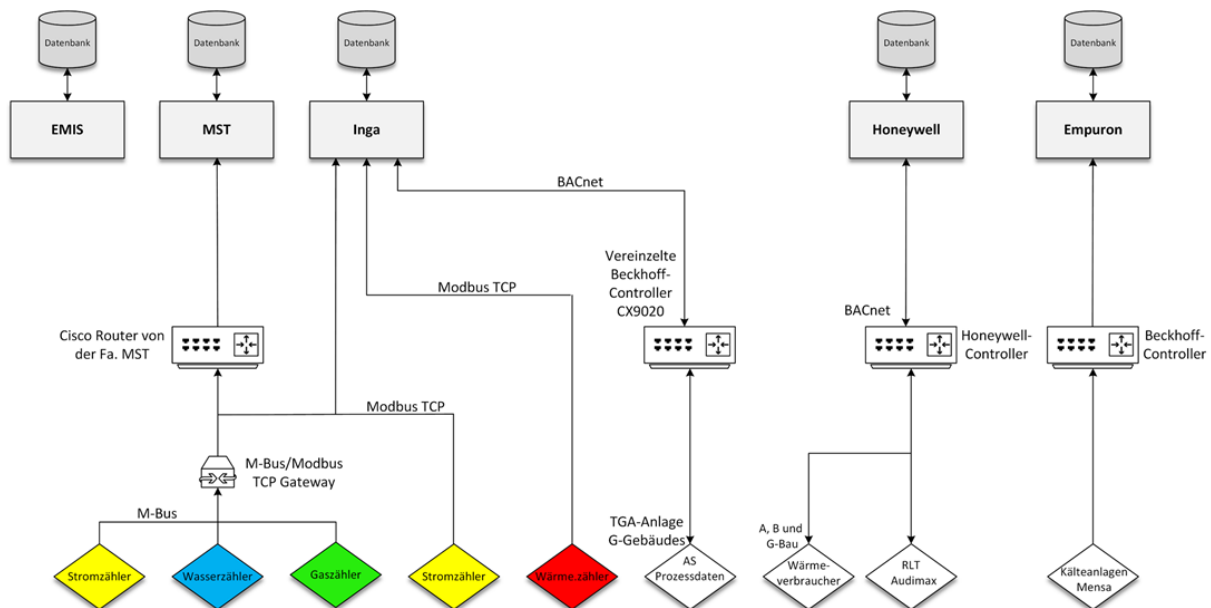


Abbildung 4: Exemplarische Darstellung des Ist-Zustands hinsichtlich der Erfassung von Energiezählern am Beispiel Campus Stadt der Hochschule Biberach

Aus diesem Grund wurde in dem Forschungsprojekt „EnMa-HAW“ ein neuer herstellerübergreifender Ansatz für ein Konzept mit einem durchgängigen Daten- und Informationsmanagement sowie standardisierten Kommunikationsschnittstellen entwickelt. Wie in Abbildung 2 dargestellt ist, werden durch eine neu entwickelte Hardware „Smart Energy Box“ (SEB) über die Busprotokolle M-Bus oder Modbus-TCP verschiedene Zählerarten automatisiert erfasst und ausgelesen. Hierbei bietet die SEB eine Funktion zur automatischen Erkennung der M-Bus-Zähler an. Über eine webbasierte Parametrierung werden die Zählerdaten mit einem einheitlichen Kennzeichnungsschlüssel in Anlehnung an die VDI 3814 Blatt 4.1 versehen. Die SEB übernimmt weiterhin den automatisierten Export der Zählerdaten in eine offene MySQL-Datenbank mit fest definierter Datenbankstruktur vor. Dadurch ist die herstellerübergreifende Erfassung und Archivierung der Energiedaten gewährleistet und die jeweilige Hochschule in ihrer Betreiberrolle jederzeit im Besitz seiner eigenen Energiedaten. Aufbauend auf dieser Datenbank können wiederum über eine offene standardisierte Datenbankschnittstelle diese für unterschiedlichste Auswertungen hinsichtlich eines verbesserten Energie- und Anlagenmanagements genutzt werden. Beispielsweise kann auf diese Datenbank eine beliebige EM-Software, die diese Schnittstelle unterstützt, zur Auswertung der Zählerdaten bzw. zur Berichterstellung und Grenzwertüberwachung aufgesetzt werden.

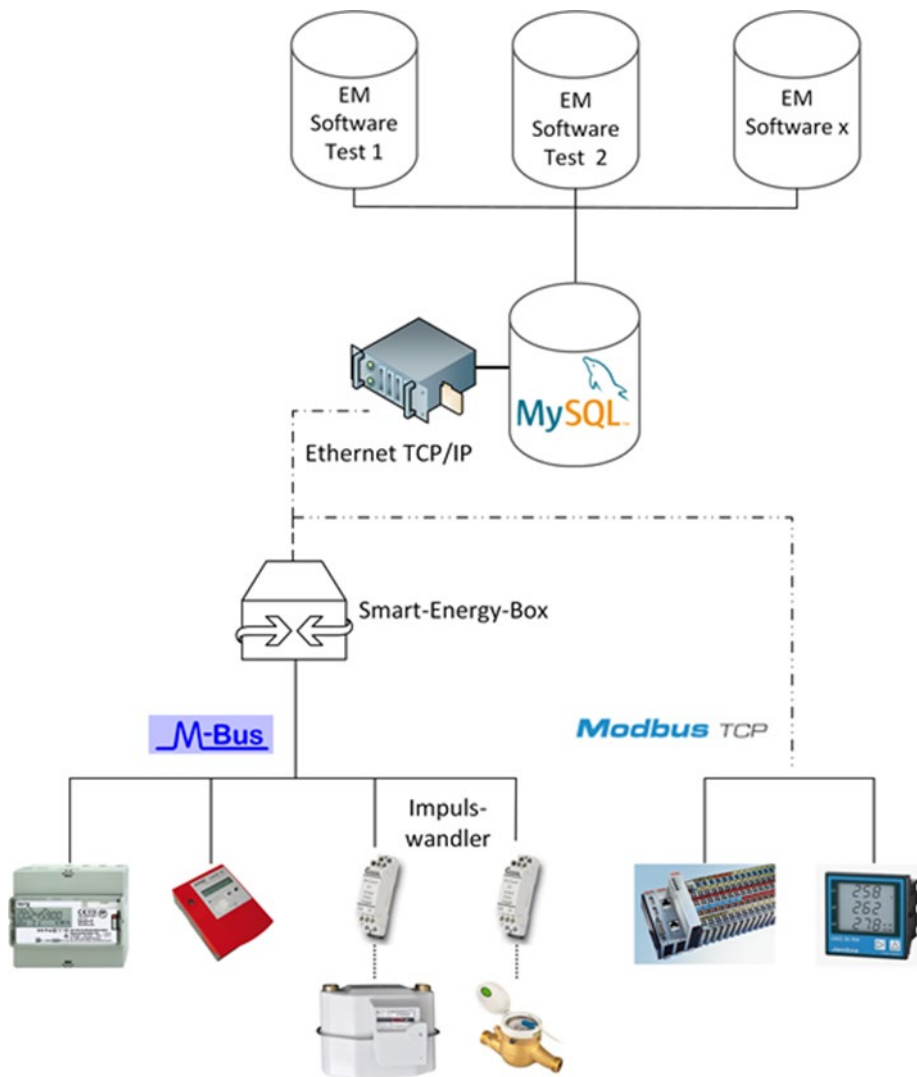


Abbildung 5: Grundkonzept des standardisierten Energiedatenmanagements mit herstellerunabhängiger Datenbank und automationsgestützter Zählerdatenerfassung

Als grundlegende Anforderung an die Zählerstruktur wird eine gebäudescharfe Erfassung vom Land BW in dem Projekt EnMa HAW gefordert. Hierzu wird je Gebäude der Strom-, Wärme- und Wasserverbrauch erfasst. Der Gas-Verbrauch wird hierbei nur zentral an den Erzeugungsanlagen gemessen, da der anteilige Gasverbrauch über die Wärmemengen der einzelnen Gebäude indirekt ermittelt werden kann. Zusätzlich wird der Strom-, Wärme- und Kälteverbrauch von großen TGA-Anlagen wie zentralen Lüftungsanlagen, Kältemaschinen, BHKWs usw. gemessen. Ebenso ggf. die Erfassung von großen Nutzungsbereichen (z.B. Rechenzentrum, Bibliothek, Audimax, Laboren, ...)

Das Konzept erlaubt hierbei auch eine nachträgliche Erweiterbarkeit der Zählerstrukturen zusätzlicher Anlagen bzw. Gebäude einer Liegenschaft. Abbildung 3 zeigt beispielhaft das Konzept für die Hochschule Biberach als Liegenschaft. Pro Liegenschaft muss nur eine Smart Energy Box eingesetzt werden und als Installationsort wird vorzugsweise die TGA-Zentrale des Hauptgebäudes verwendet. Alle weiteren Gebäude werden mit einem M-Bus/Modbus-TCP-Gateway ausgestattet. Auf diesen Gateways werden die M-Bus-Zähler des jeweiligen Gebäudes aufgeschaltet und über Modbus-TCP in das Hochschul-Netzwerk integriert. Dadurch sind alle Gateways mit der SEB vernetzt und können zentral von der SEB parametrisiert bzw. ausgelesen werden. Durch die Kombination aus SEB und Gateways können teure SPS-

Lösungen mit individuellen Programmierungen bzw. Konfigurationen umgangen werden. Ebenso ist der Dienstleistungsaufwand für die Parametrierung der SEB im Gegensatz zu den SPS-Lösungen deutlich geringer, da im gesamten System mit einem standardisierten Kennzeichnungssystem gearbeitet wird.

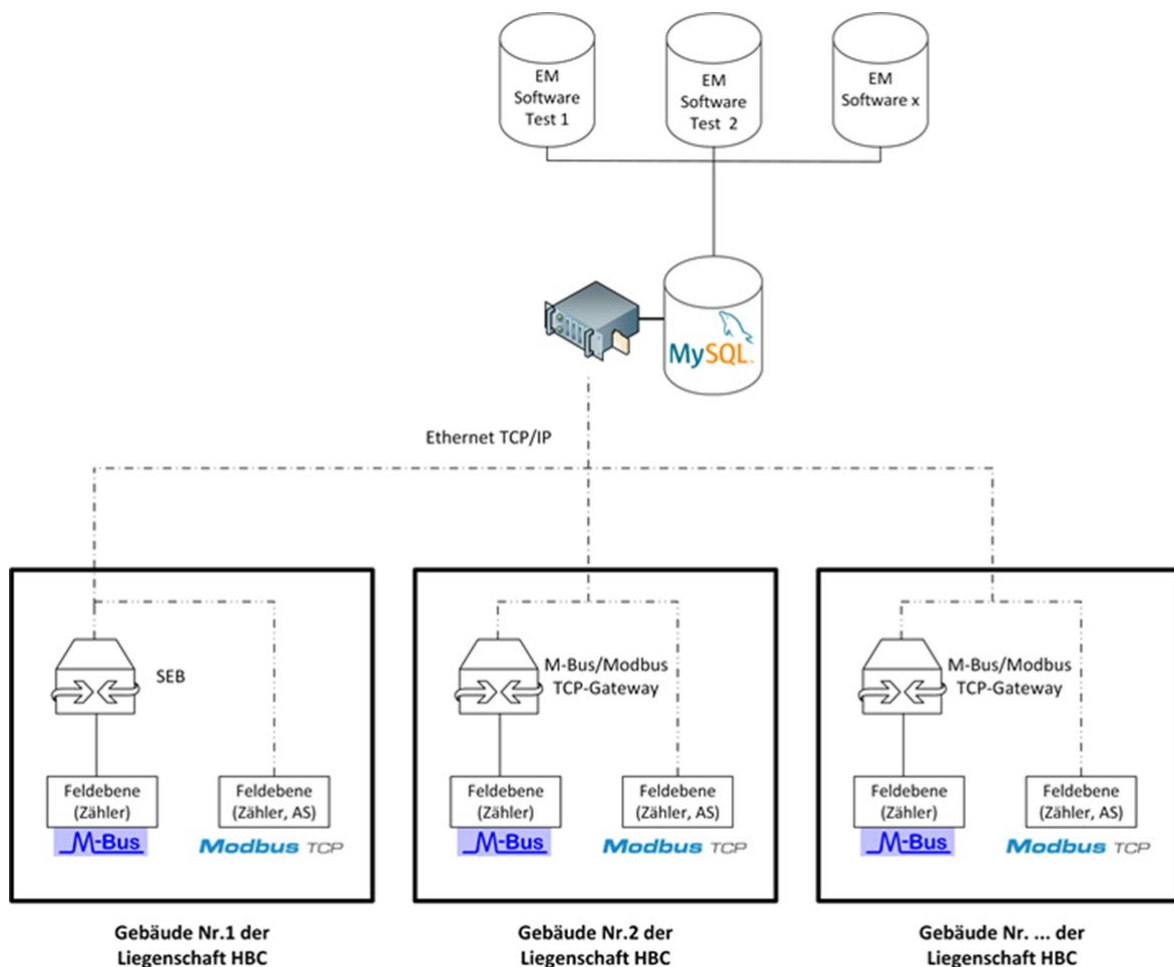


Abbildung 6: Schematische Übersicht zu Energiemanagementkonzept mit Erweiterung beliebig vieler Gebäude innerhalb einer Liegenschaft

Das EM-Konzept kann nicht nur auf einer Liegenschaft beliebig erweitert werden, sondern bietet auch die Möglichkeit verschiedene Liegenschaften auf Basis einer cloudfähigen Plattform miteinander zu verbinden. Dies zeigt die Abbildung 4, in der bei allen Projektbeteiligten Hochschulen Biberach, Nürtingen/Geislingen, Offenburg und Furtwangen jeweils eine SEB mit eigener MySQL-Datenbank aufgesetzt wird. Durch die einheitliche Struktur dieser Datenbanken, kann für das gesamte System eine cloudbasierte Software-Lösung zur übergreifenden Auswertung eingesetzt werden. Dadurch wird über den jeweiligen Hochschulen als Betreiber ihrer Liegenschaften für alle Nutzer wie z.B. Professoren, Studenten, technischen Mitarbeitern, usw. hinaus weiteren Nutzergruppen wie den regionalen Vermögen und Bau-Ämtern (VBA) oder der zentralen Betriebsleitung des Finanzministeriums in Stuttgart bzw. ein angepasster Zugriff auf die relevanten Energiedaten der Liegenschaften webbasiert ermöglicht. Ebenso wird ein liegenschaftsübergreifendes Energiemanagement aller Hochschulen ermöglicht. Hierzu können verschiedensten Key Performance Indikatoren (KPIs) der HAWs automatisch ermittelt und Liegenschaften für ein Benchmarking untereinander verglichen werden.

Die Schnittstelle zwischen der jeweiligen MySQL-Datenbank an den Hochschulen und der übergeordneten EM-Software wird über einen VPN-Zugang eingerichtet. Somit ist dieses Konzept auf sehr viele Liegenschaften erweiterbar und kann nach Abschluss der Pilotphase auf alle HAWs und eventuell weiteren Landesgebäude in Baden-Württemberg übertragen werden.

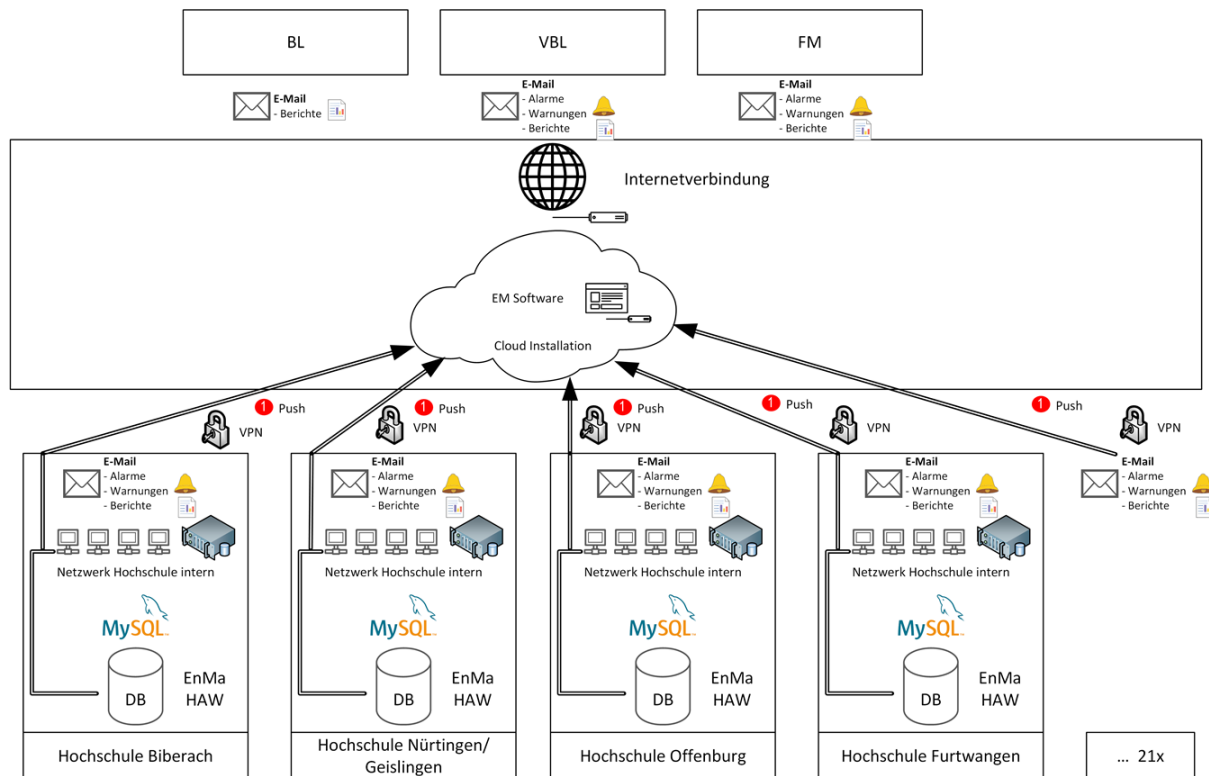


Abbildung 7: Darstellung des gesamten Energiemanagements Konzepts bezogen auf die Liegenschaftsebene mehrerer Hochschulen

Ein wichtiger Aspekt für den Erfolg des Konzeptes ist das einheitliche Kennzeichnungssystem (KS) für alle Zähler- und Anlagen- bzw. Raumdaten, welches an die Richtlinie VDI 3814 Blatt 4.1 [2] angelehnt wurde. Das Kennzeichnungssystem besteht aus insgesamt 31 Feldern und ist als Beispiel für die Hochschule Biberach (HBC) als Liegenschaft in der Abbildung 5 dargestellt. Unterschiedliche Campus (ST=Campus Stadt) werden über die Spalte 3 Liegenschafts-Detail unterschieden. Der Installationsort der SEB wird mit der Spalte 5 und 7 festgelegt. Die Anlagennummer in Spalte 9 setzt sich aus der jeweiligen Kostengruppe der DIN 276 [3] und einer dreistelligen laufenden Anlagennummer zusammen. Somit spiegeln die Ziffern 1-9 das Anlagenkennzeichnungssystem (AKS) der VDI 3814 wieder. Die anschließende Betriebsmittelkennzeichnung (BKS) Ziffer 1-15 gibt an, wo der zugehörige Zähler oder das Gateway installiert ist. Mit der Ziffer 11 und 13 wird das Gebäude und der Installationsraum vorgegeben. Über die Ziffer 15 lässt sich das Betriebsmittel in den Stromlaufplänen identifizieren. Hier wird die Seitenzahl des Stromlaufplans (15), die Art des Betriebsmittels (P=zählende Messeinrichtung) und die Spaltenzahl des Installationsplans des Betriebsmittels (1) angegeben. Die Benutzeradressierung (BAS) von Ziffer 1-31 beschreibt die zugehörigen GA-Funktionen. Die Ziffer 17 gibt die Funktion des Datenpunkts (ZW=Zählwert) an. Mit der Ziffer 19 wird definiert, was genau gemessen wird (E=Elektrische Leistung). Die restlichen Ziffern von 21-31 bieten die Möglichkeit über Zusatzfelder dem Datenpunkt weitere Informationen

zuzuweisen. In der Abbildung 5 werden als Zusatzinformationen der gemessene Anlagenteil für einen Heizkreis (HZK) am Vorlauf (VL) und das Medium Heizungswasser (HW) vorgegeben. Zur Unterscheidung gleichartiger Komponenten an derselben Stelle dient die Ziffer 27 (g1). Das verwendete Bus-Protokoll M-Bus (M) wird mit der Ziffer 29 vorgegeben. Ebenfalls wird dieser Datenpunkt auf die Änderung der Werte überwacht. Sollte sich der Wert für eine bestimmte Zeit nicht ändern, wird automatisch eine E-Mail als Störmeldung generiert. Dies wird mit der letzten Ziffer 31 gekennzeichnet.

Liegenschaft		Trennzeichen		Liegenschaft - Detail		Trennzeichen		Zentrale-Gebäude		Trennzeichen		Zentrale-Raum		Trennzeichen		Anlagennummer		Trennzeichen		Einbaort-Gebäude		Trennzeichen		Einbaort-Raum		Trennzeichen		BMK-Seite		BMK		BMK-Nummer		Trennzeichen		Funktion		Trennzeichen		Datenpunkt		Trennzeichen		Zusatzfeld_01		Trennzeichen		Zusatzfeld_02		Trennzeichen		Zusatzfeld_03		Trennzeichen		Zusatzfeld_04		Trennzeichen		Zusatzfeld_05		Trennzeichen		Zusatzfeld_06	
HBC	-	ST	-	B	-	112	=	420046	+	B	-	112	-	15	P	1	/	ZW	-	E	-	HZK	-	VL	-	HW	-	g1	-	M	-	DpU																																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31																																			
AKS nach VDI 3814 4.1																																																																	
BKS nach VDI 3814 4.1																																																																	
BAS nach VDI 3814 4.1																																																																	

Abbildung 8: Kennzeichnungssystem (KS) bestehend aus Anlagenkennzeichnungssystem (KAS), Betriebsmittelkennzeichnungssystem (BKS) und Benutzeradressierungssystem (BAS) angelehnt an die VDI 3814 Blatt 4.1 [2]

Um eine einheitliche und automatisierte Generierung des Kennzeichnungssystems (KS) zu gewährleisten, wird im Projekt ein neu entwickeltes PHP-Tool verwendet. Dieses Tool bietet die Möglichkeiten über ein vordefiniertes Eingabeformular das Kennzeichnungssystem für die jeweilige Liegenschaft zusammenzustellen. Somit kann das Kennzeichnungssystem für die jeweiligen Zähler zügig und fehlerfrei erstellt werden.

Da das automationsgestützte EM-Konzept nur als technisches Basiswerkzeug dient, muss für ein effizientes Energiemanagement, neben den Zählerstrukturen, in Anlehnung an die DIN EN ISO 50001 [4] auch ein Energiemanagement-Team an den Hochschulen als „Kümmerer“ zur Verfügung stehen, welches kontinuierlich die Auswertungen der Zählerdaten vornimmt und daraus konkrete Optimierungsmaßnahmen vorschlagen und ableiten kann. Zur Unterstützung des Energiemanagement-Teams wird in diesem Pilotvorhaben zusätzlich ein agiles Energiemanagement an allen Hochschulen eingerichtet und erprobt. Hierbei handelt es sich um einen sogenannten Energiezirkel, dessen Teilnehmer*innen aus unterschiedlichen Interessensgruppen besteht. Die Zusammensetzung dieses Energiezirkels kann je nach Organisation und den individuellen Zielen der einzelnen Hochschulen hinsichtlich Klimaschutz und Nachhaltigkeit durchaus unterschiedlich sein. An der HBC wurde hierbei im Kontext des bereits bestehenden Projektbüros Campusbüro zur Verfolgung des Ziels eines klimaneutralen Campus bis 2030 als einer der Zirkel der Energiezirkel eingerichtet, der aus einem sogenannten Schalenmodell mit mehreren Schichten besteht. Die innerste Schale umfasst die Kerngruppe mit Vertretern des EnMa-HAW-Projektes, des Projektbüros Campuserwicklung, der EMAS- und Umweltbeauftragten, der technischen Abteilung sowie Vertretern aus der Gruppe der Professor*innen, Mitarbeiter*innen und Studierenden. Im erweiterten Kreis kommen weitere interessierte Professor*innen, Mitarbeiter*innen und Studierende dazu. Schließlich gibt es einen erweiterten Kreis, bei dem z.B. auch der Austausch mit Vertreter*innen von Vermögen und Bau, Stadt und Landkreis und auch externe Dienstleister ermöglicht wird. Der Kern-Zirkel trifft sich ein- bis zweimal pro Semester, um verschiedene Ideen im Bereich Energiemanagement zu entwickeln und die technische Abteilung bzw. Verwaltung im Bereich Energiemanagement zu unterstützen und zu beraten. Ebenso dient er als

Informationsaustausch zwischen den unterschiedlichen Energiezirkeln der Hochschulen, um das Wissen auch an HAWs ohne ein technisches Studienprofil (z.B. Kunsthochschule) zu übertragen. Wie in Abbildung 7 dargestellt ist, soll der Energiezirkel auf der konzeptionellen, strategischen Ebene agieren, während der Energiemanager bzw. das Energiemanagement-Team nach dem PDCA-Zyklus gemäß DIN EN ISO 50001 [4] primär operativ agiert. Somit können die Ideen aus dem Energiezirkel kontinuierlich und möglichst direkt in den PDCA-Zyklus des operativen Energiemanagement-Betriebs eingebracht werden.

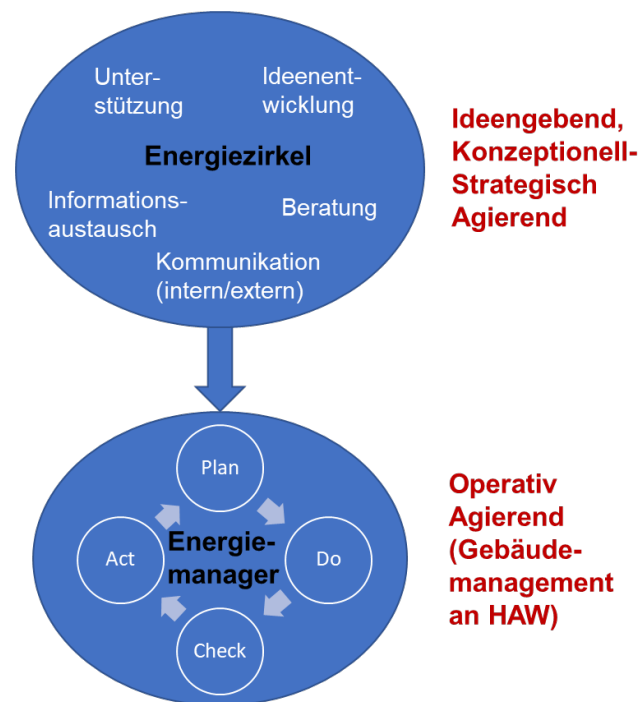


Abbildung 9: Zusammenwirken und Abgrenzung der Aufgabenfelder zwischen Energiezirkel und Energiemanager bzw. Energiemanagement-Team

Im weiteren Verlauf des Projekts wird aufgrund der Erfahrungen an den vier Pilothochschulen ein Leitfaden zur Einführung eines agilen Energiemanagements erarbeitet. Damit soll die Basis geschaffen werden, dass das entwickelte Gesamtkonzept inklusive Energiezirkel schrittweise an allen HAWs in BW ausgerollt werden kann. Der Leitfaden wird unterschiedliche Konzepte zur Einbindung in die jeweilige Hochschulstruktur darstellen. An der Hochschule Biberach wird z.B. als Sonderfall aufgrund des bereits bestehenden Projektbüros Campuserwicklung der Energiezirkel im Laufe des Projektes neben den Zirkeln für Mobilität & Region und dem Zirkel für Nutzungskonzepte & städtebaulichen Entwicklung in die Hochschulstruktur, wie in Abbildung 7 dargestellt ist, integriert werden. Im Aufbau und der ersten Erprobungsphase wird der Zirkel durch das wissenschaftliche Team des Projekts EnMa-HAW geleitet. Der Energiezirkel wird seine Ideen und Ergebnisse aus den Sitzungen über das Projektbüro oder direkt an den Senatsausschuss Campuserwicklung für die ggf. weiteren Diskussionen und Beschlüsse im Senat weitergeben.

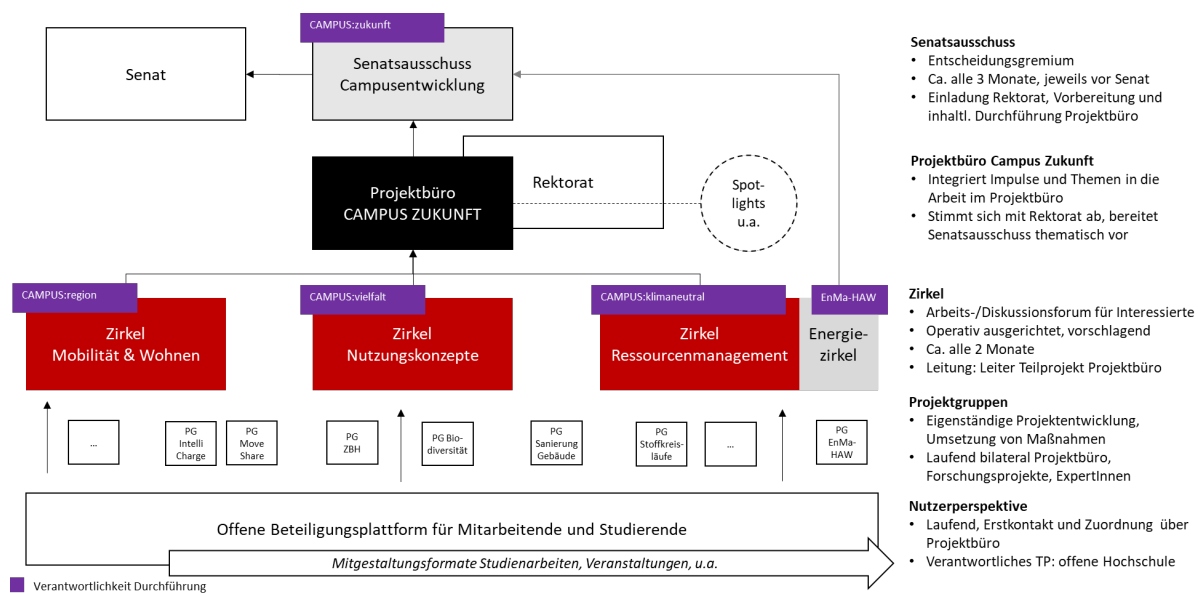


Abbildung 10: Aufbau der Organisation des Energiezirkels an der Hochschule Biberach (Entwurf, Stand April 2021) [M. Spalek B.A. B.Sc.; L. Meyering B.Eng., M.Sc., et al. ,Projektbüro Campus Zukunft]

Fazit

Zur Erreichung der ambitionierten Klimaschutzziele des Landes Baden-Württembergs können u.a. neue Konzepte im Bereich des Energiemanagements der landeseigenen Gebäude bzw. komplexen Liegenschaften einen wichtigen Beitrag leisten. Die vorgegebenen Klimaschutzziele müssen langfristig an allen Standorten und in allen Liegenschaften durch passendes Monitoring messbar und transparent gemacht werden. Hierfür wurde in diesem Beitrag ein neues Energiemanagement-Konzept vorgestellt, das zurzeit an vier Pilothochschulen des Landes Baden-Württemberg umgesetzt und erprobt wird.

Das entwickelte Energiemanagement-Konzept wurde technologieoffen in der Form entwickelt, dass die im Projekt entwickelte Hardware für einen Datenlogger mit den üblichen Bus-Protokollen wie z.B. M-Bus, Modbus-TCP, BACnet oder KNX ausgestattet werden kann. Neben der primären Aufgabe der Zähleraufschaltung und –archivierung in einer offenen mySQL-Datenbank und von offenen Datenschnittstellen können auch weitere Hardwarekomponenten wie z.B. Fühler und Sensoren oder weitere Automationsstationen über Modbus-TCP auf den Datenlogger aufgeschaltet werden. Somit wird dem Nutzer zukünftig auch der weitere Weg für ein Monitoring bis auf Raumbene mit Temperatur, Feuchte und CO₂ –Werte usw. ermöglicht. Neben den technischen Entwicklungen wurde als Baustein für ein agiles Energiemanagement die neu eingeführten Energiezirkel vorgestellt. Diese organisatorischen bzw. strukturellen Aspekte sind zwingend erforderlich, um das Potenzial der eingesetzten Hardware und Software in den Liegenschaften aus Betreibersicht auch in einer aktiven Betreiberrolle im Sinne eines agilen Energiemanagements zu nutzen.

Des Weiteren ist berücksichtigt, dass das Energiemanagement-Konzept flexibel über mehrere Gebäude und Liegenschaften erweitert werden kann. Damit ist es nicht nur für die

landeseigenen Liegenschaften, sondern auch weitergehend für kommunale und industrielle Anwendungsfelder mit mehreren Liegenschaften bzw. Standorten geeignet.

Literaturverzeichnis

- [1] „Hochschulfinanzierungsvereinbarung Baden-Württemberg 2021 - 2025,“ 2020.
- [2] „VDI 3814, Blatt 4.1. Gebäudeautomaiton (GA) – Methoden und Arbeitsmittel für Planung, Ausführung und Übergabe - Kennzeichnung, Adressierung und Listen,“ Januar 2019.
- [3] „DIN 276 - Kosten im Bauwesen,“ Beuth, Berlin, 2018.
- [4] „DIN EN ISO 50001- Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendun,“ Beuth, Berlin, 2018.

Die Autoren

Peter Knoll

knoll@hochschule-bc.de

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Gebäude- und Energiesysteme der Hochschule Biberach, Technischer Leiter des Labors für Automatisierungstechnik

Michael Straßer

strasser@hochschule-bc.de

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Gebäude- und Energiesysteme der Hochschule Biberach; Schwerpunkt Energiemanagement und Kältetechnik

Prof. Dr.-Ing. Martin Becker

becker@hochschule-bc.de

Professur für Fachgebiet MSR-Technik, Gebäudeautomation und Energiemanagement; Lehre in Studiengängen Energieingenieurwesen (Bachelor), Energie- und Gebäudesysteme (Master) sowie Gebäudeautomation (Master, berufsbegleitend,) Forschung und Transfer am Institut für Gebäude- und Energiesysteme der Hochschule Biberach

Vom Passivhaus zum Sonnenhaus – Umsetzung der Wärme- und Stromwende bei der Wohngebäudesanierung

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Mengedoht,
Institut für Energie- und Antriebstechnik (IEA), Technische Hochschule Ulm (THU)

Abstract

Trotz hoher Bäume und ohne zusätzliche Wärmedämmung eines Bestandsgebäudes (Baustandard EnEV 2002) konnte durch einen „Sonnenhaus“-Anbau (Grundfläche ca. 39 m², drei neue Räume, Empore) der Energieverbrauch (Gas und Strom) für zwei separate Gebäude (Bestandsbau, neuer Sonnenhaus-Anbau) halbiert werden. Das Kernelement des Energie-Konzeptes ist ein 7.250 Liter Schichtlanzen-Warmwasser-Pufferspeicher, der architektonisch, energetisch und gebäudeklimatisch sinnvoll in den Sonnenhaus-Anbau integriert wurde. Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt über einen separaten 500 Liter Warmwasserspeicher im Bestandsgebäude.

Der Sonnenhaus-Anbau selbst verfügt über keinen eigenen fossilen Wärmeerzeuger (z. B. Gas-Kessel). Auf dem Dach des Anbaus wurde eine 33,6 m² (21,7 kW) großen Solarthermie-Anlage für Solarwärme sowie eine 16,7 m² (2,45 kW_p) Photovoltaik-Anlage für Solarstrom installiert. Beide Gebäude sind durch ein kleines Nahwärmenetz verbunden und werden nur über offenbare Fenster be- und entlüftet. Durch den neuen Anbau mit einer zusätzlichen Nutzfläche von 89 m² wird für beide Gebäude zusammen ein „3-Liter Haus“ Standard erreicht. Erhöhte Raumtemperaturen infolge des großen und bis zu 95°C heißen Wärmespeichers im Sommer traten infolge einer speziellen passiven Schachtlüftung nicht auf. Um die Nutzfläche zu erweitern war diese Lösung finanziell deutlich attraktiver als das Bestandsgebäude nachträglich vollständig auf Passivhaus-Standard zu dämmen. Es wird aufgezeigt, dass das umgesetzte Sonnenhaus-Konzept ca. 10-fach kosteneffizienter pro kWh Wärme ist als die nachträgliche Dämmung des Bestandsgebäudes. Das vorgestellte Energiekonzept ist damit eine wichtige Option, wie die Energiewende durch eine innovative Kombination von am Markt verfügbarer, bewährter und nachhaltiger Technik wirkungsvoll umgesetzt werden kann.

Seit Sommer 2015 wird ein evtl. sommerlicher solarer Überschuss im Sonnenhausspeicher mit Hilfe eines Wärmeübertragers in einen Schwimmteich bis max. 25°C Wassertemperatur übertragen. Durch diese Wasseroberfläche wird quasi als Nebeneffekt das lokale Mikroklima für Menschen vor Ort, also direkt auf dem Grundstück, im Umfeld vom Großraum München sowie im Kontext zur aktuellen Klimakrise zusätzlich verbessert.

Vorbemerkungen

Gemäß dem 2019 beschlossenen deutschen Energiewende- und Klimagesetz [1] gibt es klare Ziele, die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2050 auf 80-95%, bezogen auf 1990, zu reduzieren. Als Meilenstein sollen diese bis 2030 um 55% reduziert werden [1,2]. Aktuell liegt

die CO₂-Reduktion nach [3] bei 33%. Wohngebäude spielen dabei eine entscheidende Rolle, da sie ca. 14% der CO₂-Emissionen direkt beitragen und bis zu 25% bei Berücksichtigung der indirekten Emissionen für Energiegewinnung und Transport [4]. Prognos et al. [3] prognostizieren, dass mit den derzeitigen Maßnahmen die Ziele nicht erreicht, sondern um 35% verfehlt werden. Insbesondere für 2020 sind die Primärenergie- und Wärmeverbrauchsziele in Gebäuden noch nicht erreicht und die Prognosen sind nicht ermutigend.

Wie in [5] dargestellt, handelt es sich im Gebäudesektor zu 64% um Wohngebäude und von den ca. 19 Millionen Wohngebäuden in Deutschland sind 15,7 Millionen Ein- und Zweifamilienhäuser, die 39% des gesamten Energieverbrauchs, mithin 10% der gesamten deutschen Emissionen (ca. 84 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent), verursachen. Davon entfallen ca. 75-85% (rund 325 TWh) auf Raumwärme und Warmwasser. Gemäß [5] könnten bis 2030 zusätzlich 28 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente emittiert werden (Differenz zum Ziel von 70 Millionen Tonnen im Jahr 2030), wenn die aktuelle Wachstumsrate andauert. Auch bei der in [6] durchgeführten Betrachtung des Endenergieverbrauchs von Nichtwohngebäuden spielt der Raumwärmebedarf die größte Rolle (71%). Weiterhin entfielen 2016 im GHD-Sektor 23% des Endenergieverbrauchs für Wärme- und Trinkwarmwasser auf büroähnliche Betriebe.

In allen Bereichen sind viele Fortschritte notwendig, um den Anteil der erneuerbaren Energien insbesondere im Wärmesektor zu erhöhen und den Primärenergieverbrauch durch Senkung des Endenergieverbrauchs deutlich zu reduzieren. Um die Reduktionsrate zu verstärken, muss die Forschung sich daher jetzt auch vermehrt auf die thermische Seite konzentrieren, denn die Ziele für erneuerbare Energien im Bereich der elektrischen Energie sind bereits auf einem guten Weg. Ermöglicht wird eine aktive Reduzierung des Primärenergiebedarfs in Gebäuden und dadurch resultiert eine Stärkung der erneuerbaren Energien. Im thermischen Bereich bietet sich insbesondere bei der Wohngebäudesanierung die Solarthermie an, die nach [7] über die mit Abstand höchste Flächeneffizienz bei den Erneuerbaren Energien Biomasse, Wind, PV und Solarthermie aufweist. Der jährliche Energie-Ertrag in kWh pro m² Landfläche in Dänemark beträgt bei Biomasse 3 kWh/m², bei Wind 20 kWh/m², bei Photovoltaik 38 kWh/m² und bei Solarthermie 150 kWh/m² [7]. Somit hat die Solarthermie die mit Abstand höchste Flächen-effizienz der Erneuerbaren Energien und ist damit für die bis heute fehlende Wärmewende im Gebäudebereich (Neubau, Sanierung) sowie auch in Wärmenetzen sehr gut einsetzbar. In diesem Kontext weist die Arbeitsgruppe Bioenergie der Deutschen Akademie der Naturforscher (Leopoldina) darauf hin, dass man sich in Deutschland auf andere erneuerbare Energieressourcen als Bioenergie konzentrieren sollte – etwa Photovoltaik, Solarthermie und Windenergie. „Deren Flächeneffizienz, Treibhausgas-Emissionen und andere Umwelt-beeinträchtigungen sind höher als die von Bioenergie“ [8,9].

Warum vom Passivhaus-Standard zum Sonnenhaus-Konzept ?

Für ein bewohntes Einfamilienhaus mit integrierten Homeoffice von 2003 wurde die Nutzfläche im Jahr 2013 durch einen Neubau für zusätzliche Nutzfläche um 89 m² auf 356 m² erweitert. Nachdem zunächst ein Ansatz verfolgt wurde, das vorhandene Bestandsgebäude

auf einen Passivhaus-Standard zu erweitern, wurde vor allem aus Gründen der Kosten- und Energieeffizienz, die Nutzflächen-Erweiterung mit einem innovativen Sonnenhaus-Konzept realisiert.

Nach ca. 8 Betriebsjahren kann nun folgendes Fazit gezogen werden: Bezogen auf diese Anwendung (Energetische Altbausanierung plus Nutzflächenerweiterung) ist das Sonnenhaus-Konzept gegenüber einer Dämmung des Bestandsgebäudes auf Passivhaus-Standard sowohl bei den Investitionskosten als auch bei der Energieeinsparung pro eingesetzten Euro deutlich überlegen. Der Tabelle 1 kann man entnehmen, dass die jährlich Energiekosten-Einsparung beim Sonnenhaus-Konzept mit einem Betrag von 1063 € pro Jahr deutlich höher ausfällt als bei der Dämmung des Bestandsgebäudes auf Passivhaus-Standard mit 182 € pro Jahr. Die Investitionskosten pro eingesparte Energie betragen bei dem Sonnenhaus-Konzept 0,08 €/kWh und bei der Fassaden-Dämmung vom Bestandsgebäude 0,79 €/kWh. D. h. das Sonnenhaus-Konzept ist ca. 10-fach kosteneffizienter pro kWh als die nachträgliche Dämmung des Bestandsgebäudes.

Investitions-Kosten		Kosten / kWh
Nur Wärmedämmung (WDVS)	62.000 €	0,79 €/kWh
komplette Technik für Sonnenhaus-Konzept inkl. Wärmenetz, Monitoring	38.493 €	0,08 €/kWh
Einsparung an Energie	pro Jahr	in 30 Jahren
Dämmung Passivhaus-Standard	2.601 kWh/a	78.024 kWh/a
Sonnenhaus-Konzept	15.179 kWh/a	455.373 kWh/a
Kosten für die eingesparte Energie	pro Jahr	in 30 Jahren
Wärmedämmung Passivhaus-Standard	182 €/a	5.462 €
Sonnenhaus-Konzept	1.063 €/a	31.876 €
Randbedingungen der o. a. Betrachtung		
Energiekosten	7,00 cent/kWh	
Betrachtungszeitraum	30 Jahre	
Standort Gräfelfing bei München (DWD-Daten)	4.388 HGT	
Ertrag der Solarthermieanlage	490 kWh/(m²a)	

Tabelle 1: Abschätzung Wirtschaftlichkeit und Energieeinsparung

Im November 2014 wurde dieses innovative Energiekonzept mit dem Energiepreis vom Landkreis München in der Kategorie Haushalt mit dem 1. Preis ausgezeichnet.

Trotz dieser Nutzflächen-Vergrößerung ist es gelungen, den Verbrauch an Gas und Strom aus dem Netz für Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom mit effizienter Solartechnik um mehr als 50 % zu reduzieren – obwohl das Bestandsgebäude von sehr hohen Bäumen auf dem Nachbargrundstück verschattet ist.

Die Nutzflächen-Erweiterung des Bestandwohngebäudes erfolgte hierbei über den Neubau eines Sonnenhauses, das als eigenständiges Gebäude aus der Baulinie gedreht und dadurch mehr nach Süden orientiert wurde (Bild 2).

Das Sonnenhaus Gräfelfing

Das Sonnenhaus ist ein solares Bau- und Heizkonzept, mit dem mindestens 50 Prozent des Energiebedarfs für Warmwasser und Heizung durch Solarenergie gedeckt werden kann. Ziel des Sonnenhaus-Konzeptes ist ein möglichst niedriger Primärenergiebedarf bei größtmöglichem Wohnkomfort. Auch bei modernen Niedrigenergie-Wohnhäusern macht die Wärmebereitstellung mit 70 bis 80% den größten Anteil am Energieverbrauch aus. Deshalb wird im Sonnenhaus der solaren Wärmeengewinnung Vorrang eingeräumt. Das Konzept eignet sich für den Neubau, den Bestand und für Sanierungen und bietet somit ein großes Potential für die Energieeinsparung im privaten und öffentlichen Bauwesen. In den letzten Jahren wurden in Deutschland mehr als 2000 neue Sonnenhäuser gebaut.

Im Mittelpunkt des Sonnenhauses steht eine große solarthermische Anlage zur Bereitstellung von Solarwärme auf einem möglichst steil geneigten Süddach (Neigungswinkel 45 bis 70°) in Verbindung mit einem entsprechend groß dimensionierten Solarwärmespeicher, der sinnvoll im Gebäude integriert ist. In dem schlanken, mehrere Kubikmeter großen Wassertank wird die solare Wärme über Tage und Wochen gespeichert. Außerdem wird die Sonne durch große Fensterflächen auf der Südseite des Gebäudes passiv genutzt. Voraussetzung für das Funktionieren dieses Sonnenhaus-Konzeptes ist eine intelligente Architektur, eine sehr gut gedämmte Gebäudehülle zusammen mit einem sehr guten Sonnenschutz, der gleichzeitig Tageslichtnutzung berücksichtigt. Wenn zudem ausreichend Dachfläche zur Verfügung steht ist eine Photovoltaik-Anlage zur Bereitstellung von Solar-Strom eine sinnvolle Ergänzung.



Bild 1: Südansicht Sonnenhaus,
rechts Bestandsgebäude

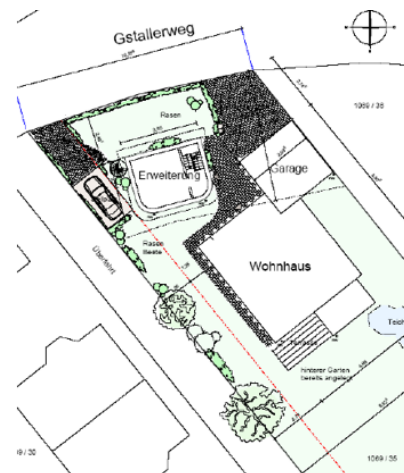


Bild 2: Anordnung Wohnhaus
(Bestandsgebäude) und Sonnenhaus

Für die Nachheizung in den Übergangszeiten und im Winter nutzen die Bewohner eines Sonnenhauses im Idealfall eine moderne schadstoffarme, regenerative Biomasse Stückholz-, Hackschnitzel- oder Pelletheizung oder auch ein Gasbrennwertgerät. Das Sonnenhaus mit Biomasse-Nachheizung gehört derzeit mit max. 15 kWh/(m²a) [10] zu dem Baustandard mit dem geringsten Primärenergiebedarf. Entscheidend in diesem Kontext ist es, eine ausreichend große Solarthermie-Fläche architektonisch so im Sonnenhaus-Neubau zu integrieren, damit beide Häuser über weite Teile des Jahres mit Warmwasser und Heizwärme versorgt werden können. Durch die versetzte Anordnung der beiden Häuser untereinander ist die Solarthermie-Anlage nur im Winter im untersten Kollektorfeld-Bereich (1 – 2 Kollektoren von 6) leicht verschattet (Bild 1 und 2).

Kernelement des Sonnenhaus-Neubaus

Das „Herzstück“ vom Sonnenhaus-Neubau ist der im Gebäude integrierte 7.250 Liter Schichtlanzen-Wasserspeicher als reiner Heizpuffer (für beide Gebäude). Dieser Heizpuffer-Speicher ist mit dem Bestandsbau über ein Nahwärmenetz verbunden. Architektonisch war es eine gewisse Herausforderung, den großen Speicher sowie auch die erforderlichen Solartechnik-Flächen (ca. 50 m²) in das auf die Grundfläche (Bodenplatte 39,5 m²) bezogene relativ kleine Sonnenhaus zu integrieren (Bild 3, 4 und 5).

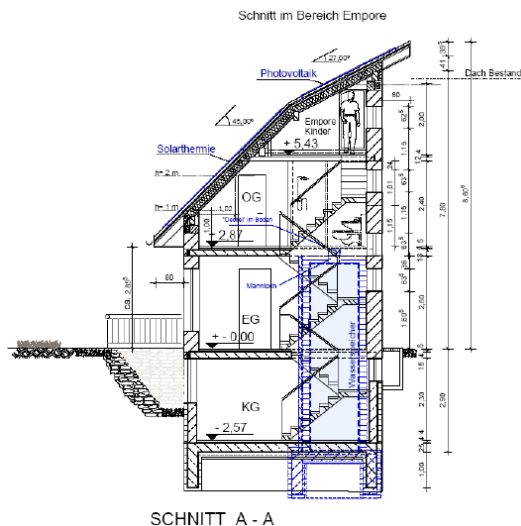


Bild 3: Schnitt durch das Sonnenhaus mit Schichtlanzen-Wärmespeicher



Bild 4: Einbringen des Schichtlanzen-Wärmespeichers in das Sonnenhaus

Das Sonnenhaus selbst verfügt nur über einen einzigen Wärmeerzeuger, die 33,6 m² große dachintegrierte Solarthermie-Anlage für Solarwärme. Auf einen Schornstein sowie einen fossilen Wärmeerzeuger konnte verzichtet werden. Durch die hydraulische Kopplung zwischen Bestandsgebäude und Sonnenhaus wird die Solarwärme der 6 solarthermischen Großflächenkollektoren in weitere zu beheizende Zonen (Wohnräume, Kellerräume) vom Bestandsbau umgeladen, wodurch der Nutzungsgrad der Solarthermie-Anlage im Sonnenhaus deutlich gesteigert wird. Eine spezielle auf beide Gebäude abgestimmte Regelung enthält eine Überschussfunktion, die den schlecht gedämmten, oft sehr kalten Keller im Sommer mit Wärme versorgt. Durch den Anschluss von Waschmaschine und Spülmaschine an die zentrale Warmwasserversorgung steigt der Nutzungsgrad der Solarthermie-Anlage zusätzlich. Somit wird Strom durch Solarwärme ersetzt.

Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt aus exergetischen Gründen zentral aus einem im Bestandsbau bereits vorhandenen 500 Liter Warmwasserspeicher. Wenn der große Heizpuffer-Speicher im Winter entladen ist kommt ein im Bestandsbau vorhandener Gasbrennwertkessel zum Einsatz. Die inzwischen 18 Jahre alte 7,5 m² Solarthermie-Anlage (Neigung 30°) auf dem Bestandsbau, die teilweise durch hohe Bäume stark verschattet ist, wurde ebenfalls in das Regelkonzept integriert.

Sinnvoll ergänzt wird das Sonnenhaus-Konzept zudem durch eine 16,7 m² Photovoltaik-Anlage für Solarstrom (Nennleistung 2,45 kWp). Der PV-Wechselrichter führt dem Sonnenhaus und dem Bestandsbau bei Bedarf Eigenstrom zu und speist Überschussstrom ins Netz ein.

Durchdachtes Lichtkonzept

Das bauphysikalische Gebäudekonzept wird charakterisiert durch einen tageslichtoptimierten, südorientierten Büroraum sowie durch eine 3-fach Verglasung mit hohem g - und τ_{vis} -Wert. Ein regelbarer außenliegender Sonnenschutz dient der Vermeidung von sommerlicher Überhitzung.

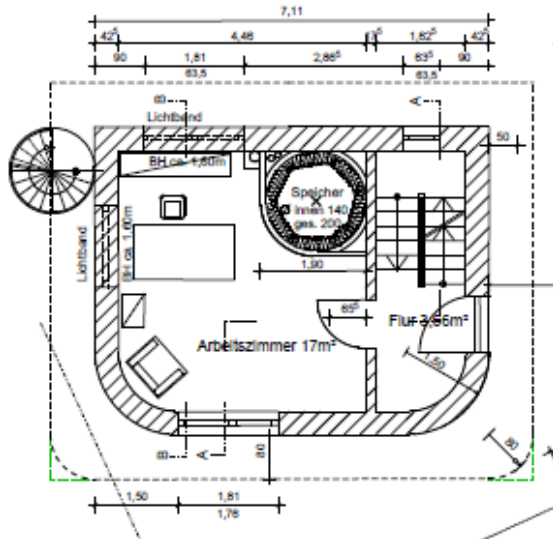


Bild 5: Grundriss vom Sonnenhaus (EG-Büro)

Bild 6: Südansicht Sonnenhaus Gräfelfing

Die Bauausführung ist besser als ein 3-Liter-Haus, gelüftet wird ausschließlich über Fenster. Erhöhte Raumtemperaturen infolge des großen und im Sommer bis zu 95°C heißen Wärmespeichers traten infolge eines sehr guten Sonnenschutzkonzeptes (Bild 6) und einer speziellen passiven Schachtlüftung nicht auf.

Messergebnisse

Im folgenden werden exemplarisch Messergebnisse [11] des ersten Betriebsjahres im Zeitraum vom 21.05.2013 bis 20.05.2014 (Gasabrechnung Stadtwerke München) dargestellt:

- Jahresertrag Solarthermie-Anlage (33,6 m²): 15.179,1 kWh/a
- Flächenspezifischer Ertrag der Solarthermie-Anlage: 490,3 kWh/(m²a)
- Bezug Apertur
- Der Gesamt-Wärmeverbrauch (Bestandsbau, Sonnenhaus) konnte im 1. Betriebsjahr des Sonnenhauses von 20.929 kWh/a auf 10.183 kWh/a reduziert werden. Das entspricht einer Endenergie-Einsparung von mehr als 50 %.
- Gemessene flächenspezifische Endenergie Wärme: 28,6 kWh/(m²a)
(Bezug Nutzfläche für beide Häuser)
- Jahresertrag Photovoltaik-Anlage (16,7 m²): 2.697,0 kWh/a
- Flächenspezifischer Ertrag der Photovoltaik-Anlage: 160,8 kWh/(m²a)
- Durch die Photovoltaik-Anlage konnte der Stromverbrauch von 4.430 kWh zu mehr als 50 % regenerativ erzeugt werden (2697 kWh/a). Davon sind 1267 kWh/a bzw. 47 % Eigenverbrauch und 1430 kWh (53 %) wurden ins Stromnetz eingespeist. Damit wird ein

Autarkiegrad von 28,6 % erreicht, der durch den Einsatz einer Batterie zukünftig noch erhöht werden kann.

Das innovative Sonnenhaus-System bestehend aus einem Bestands- und einem Neubau ist seit ca. 8 Jahren in Betrieb. Die Messwerte haben sich in den Folgejahren bestätigt und variieren je nach Klima leicht. Durch das kontinuierliche Monitoring wurden weitere Optimierungen möglich.



Bild 7: Nord-Ansicht Sonnenhaus Gräfelfing



Bild 8: Schwimmteich bzw. Naturpool

Seit Sommer 2015 wird der mögliche sommerliche solare Überschuss im Sonnenhaus-Wärmespeicher mit Hilfe eines Wärmeübertragers einem Schwimmteich zugeführt (Bild 8). Dadurch wird der Nutzungsgrad der Solarthermieanlage erhöht und gleichzeitig der Warmwasser-Komfort im Schwimmteich ausschließlich durch Energie von der Sonne gesteigert.

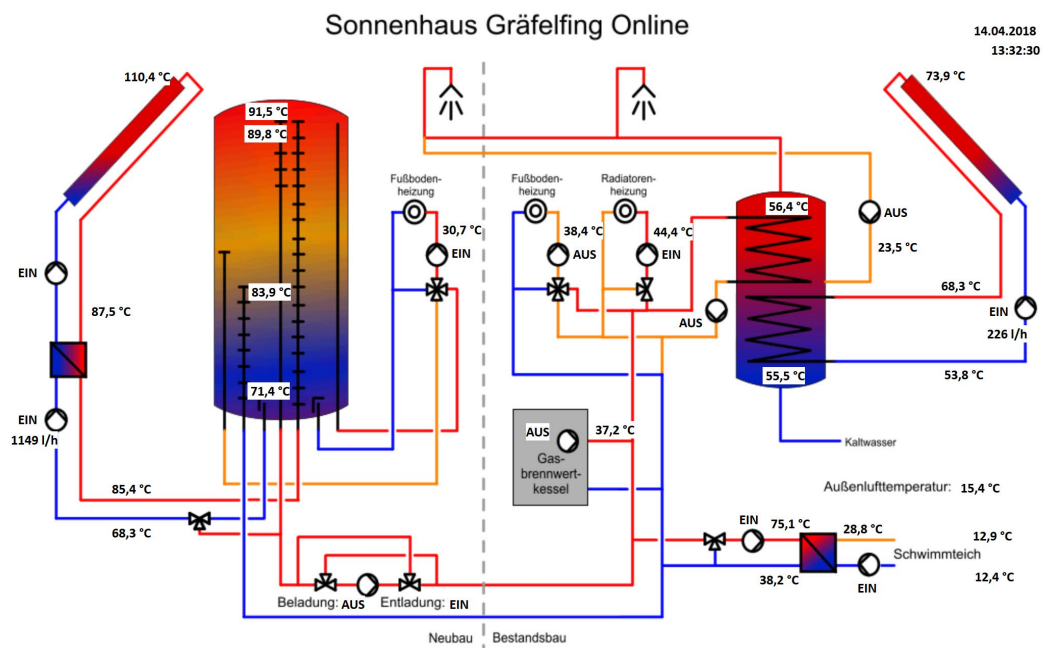


Bild 9: Anlagenschema und Messdatenvisualisierung der solarthermischen Wärmeversorgung (Momentaufnahme: Schwimmteich wird um die Mittagszeit beheizt)

Bild 9 zeigt das Anlagenschema sowie eine online Messdatenvisualisierung der solarthermischen Wärmeversorgung (links Sonnenhaus-Neubau, rechts Bestandsgebäude). In den Schwimmteich (40 m³, max. Wassertemperatur 25°C) wird ein Teil des sommerlichen solaren Wärme-Überschusses übertragen.

Fazit

Das erfolgreich umgesetzte Sonnenhaus-Konzept ist eine heute sofort umsetzbare innovative Möglichkeit, zusätzlichen Wohnraum zu schaffen, gleichzeitig den Primärenergieverbrauch trotz Nutzflächenerweiterung deutlich zu reduzieren ohne ein in der Nähe angeordnetes Bestandsgebäude selbst energetisch zu verbessern. Der Bestandsbau mit dem Sonnenhaus wurde mit Hilfe des Sonnenhaus-Neubaus primärenergetisch auf ein „3-Liter Haus“ (Primärenergie $q_p \leq 34 \text{ kWh/m}^2$ und Jahr für beide Gebäude) modernisiert, was gleichzeitig zu deutlich mehr Lebensqualität geführt hat. Solares Bauen und Sanieren ist damit ein bedeutender Baustein, um die Energiewende in Deutschland mit heute verfügbarer Technik erfolgreich umzusetzen.

Seit Sommer 2015 wird der mögliche sommerliche solarer Überschuss im Sonnenhausspeicher mit Hilfe eines Wärmeübertragers einem Schwimmteich zugeführt. Dadurch wird der Nutzungsgrad der Solarthermieranlage erhöht und gleichzeitig der Warmwasser-Komfort im Schwimmteich ausschließlich durch Energie von der Sonne gesteigert. Eine Sanierung und Nutzflächen-Erweiterung im Passivhaus-Standard wäre deutlich kostenintensiver und gleichzeitig wesentlich weniger energieeffizient gewesen (siehe auch Tabelle 1).

Die gesamte haustechnische Anlage wird gemonitort und online visualisiert unter <http://www.sonnenhaus-gräfelfing.de>. Eine webbasierte Visualisierung der Photovoltaikanlagen-Kenndaten sowie einiger Raumluft-/ Empfindungstemperaturen im Sonnenhaus Gräfelfing ist in Vorbereitung.

Literatur

- [1] „Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung“, Bundesregierung Deutschland, 2019.
- [2] „Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050“, Bundesregierung Deutschland
- [3] Prognos AG, Fraunhofer ISI, GWS, und iinas, „Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050“. März 10, 2020, [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/klimagutachten.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Zweiter Fortschrittsbericht zur Energiewende, Die Energie der Zukunft“. Juni 06, 2019, [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschrittsbericht-monitoring-energiewende-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=18.
- [5] Deutsche Energie Agentur, DENA, „dena - Gebäudereport Kompakt 2019, Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand“. Okt. 2019, [Online]. Verfügbar unter:

https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-GEBAEUDEREPORT_KOMPAKT_2019.pdf.

- [6] Deutsche Energie Agentur, DENA, „Der dena-Gebäudereport 2015- Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand“. Deutsche Energie-Agentur, 2015, [Online]. Verfügbar unter:
https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/bau/8162_dena-Gebaeudereport_2015_PDF.pdf.
- [7] Stadler, C., „Wir ernten die Sonne, dänische Wärmenetze & Know-How – beispielgebend für Europa“, Fa. Arkon Sunmark, Vortrag im Bürgerhaus Gräfelfing am 2.3.2020 in Gräfelfing bei München am 2.3.2020
- [8] Friedrich, B., Schink, B., Thauer, R.K. „Bioenergie: Möglichkeiten und Grenzen, Kurfassung und Empfehlungen“, Deutsche Akademie der Naturforscher, Leopoldina, Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle (Saale), 2012
- [9] Süddeutsche Zeitung, Ausgabe München-West vom 03.01.2014
- [10] Sonnenhaus Institut e. V., Broschüre „Das Sonnenhaus“
Download: <https://www.sonnenhaus-institut.de/wp-content/uploads/SH-Brosch%C3%BCre-2013.pdf>
- [11] Mengedoht, G. „Kombiniert: Solares Bauen und Sanieren, hoher solarer Deckungsgrad trotz Verschattung“, Zeitschrift Sonnenenergie, Ausgabe 3, September-November, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, Berlin, 2018
Alle Fotos und Abbildungen: © Gerhard Mengedoht

Der Autor

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Mengedoht
gerhard.mengedoht@thu.de

Professor an der Technischen Hochschule Ulm im Bereich Strömungslehre, Wärmeübertragung, Gebäudeklimatik, „Solares Bauen, HLK mit EnEV“, sowie für die Gebäude- und Anlagensimulation

Tätigkeitsbereiche: Solares Bauen, Energieeffizienz & Behaglichkeit im Gebäude, Gebäude-Monitoring sowie der Gebäude-, Anlagen-, Licht- und Strömungssimulation (CFD)

Erfahrungen mit verschiedenen Simulationsprogrammen für Energie- und Behaglichkeitskonzepte in Gebäuden mit dem Schwerpunkt Energiegesamtkonzept inkl. sommerliches Temperatur-Verhalten sowie bei Gutachten und Energiestudien

Vorstandsmitglied Rud. Otto Meyer-Umwelt-Stiftung, Hamburg; Bestelltes Mitglied des Fachbereichsausschusses Stadtentwicklung, Bau und Umwelt des Gemeinderates der Stadt Ulm; Gemeinderats-Mitglied in Gräfelfing bei München, Schwerpunkt Bauausschuss; Aufsichtsrat-Mitglied der Fernwärmenetz Gräfelfing GmbH (FWNG)