

Swantje Gährs, Evelin Wieckowski, Jonas von Braunmühl, Andreas Wolfmaier, Bernd Hirschl

Private Haushalte als neue Schlüsselakteure einer Transformation des Energiesystems

Arbeitspapier zur Simulation des Haushaltssektors im Energiesystem unter Berücksichtigung hoher dezentraler Energieeinspeisung

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung

Berlin, November 2015



i | ö | w

INSTITUT FÜR
ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Impressum

Herausgeber:

Institut für ökologische
Wirtschaftsforschung (IÖW)
Potsdamer Straße 105
D-10785 Berlin
Tel. +49 – 30 – 884 594-0
Fax +49 – 30 – 882 54 39
E-mail: mailbox@ioew.de
www.ioew.de

Autoren:

Dr. Swantje Gährs
Evelin Wieckowski
Jonas von Braunmühl
Andreas Wolfmaier
Prof. Dr. Bernd Hirschl

Zitiervorschlag:

Gährs S., Wieckowski E., von Braunmühl J., Wolfmaier A., Hirschl B. (2015): *Private Haushalte als neue Schlüsselakteure einer Transformation des Energiesystems. Arbeitspapier zur Simulation des Haushaltssektors im Energiesystem unter Berücksichtigung hoher dezentraler Energieeinspeisung.* http://www.prosumer-haushalte.de/data/prohaus/user_upload/Dateien/Arbeitspapier-AP3_Simulation-von-Prosumer-Haushalten.pdf

Das Arbeitspapier ist entstanden im Projekt Prosumer-Haushalte. Das Projekt ist Teil des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Schwerpunktprogramms Sozial-ökologische Forschung (SÖF; Förderkennzeichen 01UN1209). Für nähere Informationen zum Projekt: www.prosumer-haushalte.de.



Berlin, November 2015

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Besonderheiten des Simulationsmodells und der berücksichtigten Technologien.....	2
2.1	Synthetisches Stromlastprofil.....	2
2.1.1	Bottom-up Stromlastprofil	2
2.1.2	Lastverschiebung von Haushaltsgeräten – Haushaltsinternes Demand Side Management (Smart Home)	5
2.2	Ermittlung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs	5
2.2.1	Heizwärmeprofil und -bereitstellung	5
2.2.2	Warmwasserprofil und -bereitstellung	7
2.3	Implementierte Technologien und betrachtete Kombinationen	7
3	Simulationsergebnisse, Auswertung und Diskussion	11
3.1	Vergleich der Ergebnisse für verschiedene Technologieoptionen	11
3.2	Charakteristische Änderungen in der Lastkurve und Auswirkungen auf die Netze	13
3.2.1	Auswirkungen von verschiedenen Technologien auf die Lastkurve	14
3.2.2	Auswirkungen von haushaltsinternen Maßnahmen zur Lastverschiebung	16
3.3	Bedeutung von Änderungen in der Effizienz des Haushalts.....	18
3.4	Relevanz der Hauptstromverbrauchszeiten.....	19
4	Zusammenfassung	22
5	Literaturverzeichnis.....	23

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Stromverbrauch nach Haushaltsgröße	3
Abb. 2.2:	Stromverbrauch von Gerätegruppen nach Haushaltsgröße	3
Abb. 2.3:	Vergleich der Tageslastgänge eines Standardlastprofils, eines gemessenen Profils und des synthetischen Profils des IÖW	4
Abb. 2.4:	Heizkurve Niedrigenergiehaus, 4-Personen-Haushalt	6
Abb. 2.5:	Warmwasserprofil, 4-Personen-Haushalt mit Urlaubsunterbrechungen	7
Abb. 2.6:	Schematische Darstellung des Modells und der implementierten Technologien zur Erzeugung, Verbrauch und Speicherung von Strom und Wärme	8
Abb. 2.7:	Teillastwirkungsgrade PEMFC, SOFC und erdgasbefeuertes Nano-BHKW	9
Abb. 3.1:	Strombilanz für einen 4-Personen-Haushalt bei unterschiedlichen Technologien	11
Abb. 3.2:	Eigenverbrauch und Autarkiegrad im 4-Personen-Haushalt für verschiedene Technologiekombinationen	12
Abb. 3.3:	Strombilanz für einen 4-Personen-Haushalt bei unterschiedlichen Technologien mit Demand-Side-Management	13
Abb. 3.4:	Auswirkungen auf die Lastkurve bei verschiedenen Ausrichtungen der PV-Anlage und Einsatz von Batteriespeichern	14
Abb. 3.5:	Auswirkungen auf die Lastkurve durch Einsatz von KWK, PV und deren Kombination	15
Abb. 3.6:	Auswirkungen auf die Lastkurve durch verschiedene Power-To-Heat-Optionen.	16
Abb. 3.7:	Durchschnittliche Stromeispeisung und -bezug mit und ohne Demand Side Management (DSM)	16
Abb. 3.8:	Eigenverbrauch und Autarkiegrad im 4-Personen-Haushalt für verschiedene Technologiekombinationen mit Demand-Side-Management	17
Abb. 3.9:	Durchschnittlicher Tageslastgang bei unterschiedlichen Stromeffizienzklassen im 4-Personen-Haushalt	18
Abb. 3.10:	Eigenverbrauchsanteile bei unterschiedlichen Stromeffizienzklassen im 4-Personen-Haushalt für verschiedene Technologieoptionen	19
Abb. 3.11:	Autarkiegrade bei unterschiedlichen Stromeffizienzklassen im 4-Personen-Haushalt für verschiedene Technologieoptionen	19
Abb. 3.12:	Eigenverbrauch und Autarkiegrad der Prosumer-Technologie PV, 4-Personen-Haushalt, Neubau-Standard	20

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.2:	Jahreseinteilung und Stromverbrauch nach BDEW	4
Tab. 2.3:	Durchschnittliche Wohnfläche privater Haushalte in Einfamilienhäusern	6
Tab. 2.4:	Übersicht: Kombinationsmöglichkeiten der Technologien	10
Tab. 3.1:	Korrelation zwischen Stromverbrauch, Eigenverbrauch und Autarkie der Technologieoption PV	20

Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
DSM	Demand Side Management
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EFH	Einfamilienhaus
HH	Haushalte
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	KWK-Gesetz
MFH	Mehrfamilienhaus
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle)
PV	Photovoltaik
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (Festoxid-Brennstoffzelle)
STh	Solarthermie

1 Einleitung

Der begonnene Wandel im Energiesystem hat zu einer Zunahme von dezentralen Energieversorgungstechnologien geführt und dabei haben Haushalte eine bedeutende Rolle eingenommen. Haushalte haben die Möglichkeit, selbst zu Erzeugern zu werden und damit eine veränderte Sicht und Wirkung im Energiesystem haben. Zusätzlich wird diese Rolle als Produzent und Konsument von Energie zunehmend verschwommen, da der Verbraucher ein Teil dieser Energie bereits selber verbraucht. Er wird zum „Prosumenten“ (Produzenten-Konsumenten). Bisher ist dieser neue Akteur noch unzureichend beleuchtet. Im Rahmen dieser Arbeit wollen wir den Prosumer-Haushalt als neuen Akteur im Energiesystem näher analysieren und seine Besonderheiten und Auswirkungen auf das Energiesystem darstellen.

Die Rolle der Haushalte als Prosumenten kann zu Verhaltensänderungen hinsichtlich des Energieverbrauchs führen. Einerseits können die Verbraucher in den Haushalten ihre Geräteausstattung ändern, z.B. hin zu energiesparenden Geräten oder mit dem Bestreben, die Eigenverbrauchsquote des selbst erzeugten Stroms zu erhöhen bspw. durch Wärmepumpen-Heizungsanlagen oder Elektroautos, andererseits können sich auch bei gleich bleibender Geräteausstattung durch ein verändertes Nutzerverhalten Implikationen für die Lastkurve ergeben, mit Auswirkungen auf die restliche Energiewirtschaft. Diese können aus der Perspektive des gesamten Energieversorgungssystems sowohl positiver als auch negativer Natur sein, bspw. durch Glättung oder Verursachung von Lastspitzen in den Netzen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die möglichen Handlungsoptionen auf Haushaltsebene hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Gesamtsystem näher zu untersuchen. Erst wenn diese Zusammenhänge ausreichend untersucht und verstanden sind, können die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen so ausgestaltet werden, dass die Haushalte als „Problemlöser“ einen positiven Beitrag zur Transformation des Energiesystems leisten.

Die Änderungen zwischen Haushalten und Prosumer-Haushalten wurden daher simuliert. Dazu wurde für die Gesamtheit der Haushalte eine Differenzierung nach verschiedenen Merkmalen vorgenommen (z: B. Personen im Haushalt oder Art des Hauses) und insbesondere die Haushalte, die Betreiber einer Energieumwandlungsanlage sind, genauer analysiert, und das jeweilige charakteristische Verbrauchs- und Erzeugungsverhalten für einzelne Haushaltstypen abgebildet. Durch eine Hochrechnung auf die Gesamtheit der Haushalte können damit die Auswirkungen auf die restliche Energiewirtschaft ermittelt werden. Dies betrifft die Änderungen in der Lastkurve wie auch die Endenergienachfrage insgesamt. Durch die Simulation des Verbrauchs einerseits und der Erzeugung andererseits lässt sich auch eine Aussage über die Belastung der Netze ableiten.

Der Fokus der Simulation ist dabei auf den Strombereich gerichtet, wobei die Stromerzeugung aus wärmegeführten Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung anhand des zu Grunde liegenden Wärmebedarfs berechnet wird. Darüber hinaus werden auch Möglichkeiten zur elektrochemischen Energiespeicherung in Haushalten mit berücksichtigt.

2 Besonderheiten des Simulationsmodells und der berücksichtigten Technologien

Im Rahmen des Projekts wurde das am IÖW bereits bestehende Modell EProM um alle für das Projekt relevanten Technologien und Variablen erweitert. Eine kurze Darstellung des Modells findet sich auch unter www.ioew.de/klima-und-energie/ioew-prosumer-modell/. Im Folgenden wird das Modell und insbesondere werden die verwendeten Technologien und Parameter genauer vorgestellt. Ziel der Simulation war es, einen durchschnittlichen Prosumer-Haushalt möglichst detailliert darzustellen.

Für die Simulation wurden einige Umgebungsparameter festgelegt, da der Haushalt für die temperatur- und wetterabhängigen Simulationen an einem Standort gebunden sein muss. Da die Simulation mit einer Schrittweite von einer Minute stattfindet, mussten auch die Wetterdaten in dieser Auflösung gegeben sein. Deshalb wurde der Haushalt im Süden von Berlin verortet und die Daten des Meteorologischen Observatoriums in Lindenberg verwendet. Dies stellt im Rahmen des Baseline Surface Radiation Network (BSRN) für wissenschaftliche Zwecke unter Einhaltung einer „Data Release Guideline“ im Minutentakt aufgelöste Messwerte zu direkter, diffuser und globaler Strahlung, weiterer Strahlungsdaten, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck zur Verfügung. Zudem wurde als Gebäude ein Einfamilienhaus (EFH) gewählt, da hier kein Mieter-Vermieter-Dilemma auftritt und der Einbau einer Energieerzeugungsanlage leichter vorgenommen werden kann.

2.1 Synthetisches Stromlastprofil

Das Modell arbeitet nicht mit einem gemessenen Profil für den gesamten Haushalt, da in diesem Fall Auswertungen bspw. zu Auswirkungen von Lastverschiebungen einzelner Haushaltsgeräte nicht möglich sind. Deswegen wurde für die Simulation der Lastkurven des Haushalts das Stromlastprofil Bottom-up aufgebaut und mit zwei Lastverschiebungsvarianten ausgestattet.

2.1.1 Bottom-up Stromlastprofil

Da Haushalte in der Regel sehr unterschiedlich mit Geräten ausgestattet sind und deren Nutzung von vielen Faktoren abhängt, gibt es nicht nur den einen typischen Lastgang. Bei der Auswahl der Geräte für das Prosumer-Simulationsmodell EProM wurde darauf geachtet, einen in der Praxis möglichen und dennoch durchschnittlichen Haushalt zu simulieren. Die Auswahl der Verbrauchsgeräte beruht daher auf Daten vom statistischen Bundesamt, die die Ausstattung privater Haushalte evaluieren (Statistisches Bundesamt 2012). Das Stromlastprofil wird als Summe des Verbrauchs aller im Haushalt befindlichen Geräte erstellt. Dafür werden zeitlich hochaufgelöste Lastprofile von 29 typischen Haushaltsgeräten simuliert, wobei saisonale Nutzungsunterschiede und unterschiedliche Ausstattungen bei variierender Haushaltsgröße ebenso berücksichtigt werden, wie die dynamischen Lastverläufe bestimmter Verbraucher, die während der Nutzung keinen konstanten Stromverbrauch aufweisen, z. B. eine Waschmaschine oder die Tiefkühltruhe. Der Verbrauch dieser Geräte beruht auf der Liste der 100 größten Stromverbraucher in Privathaushalten, welche vom Öko-Institut im Forschungsprojekt PROSA-Umweltzeichen / Top 100 erstellt wurde (Gröger et al. 2013). In

Einzelfällen wurden die Verbrauchsdaten für Standby- und Betriebszeiten auch aus Messungen der TU-Darmstadt genutzt (TU Darmstadt 2012).

In der Simulation wird von durchschnittlichen Haushaltsgeräten ausgegangen, die bereits einige Jahre im Betrieb sind, da ein bereits bestehender Haushalt simuliert werden soll. Manuell kann jedoch auch eine Ausstattung mit Energiespargeräten vorgenommen werden. Dabei werden die im Stromspiegel 2015 (BMUB 2014) dargestellten Stromeffizienzklassen als Grundlage genommen, ebenso wie für den Gesamtverbrauch bei verschiedenen Haushaltsgrößen. Größere Haushalte verbrauchen deutlich mehr Strom als kleinere, allerdings wächst der Verbrauch nicht proportional mit der Haushaltsgröße, da Synergieeffekte erzielt werden, siehe Abb. 2.1.

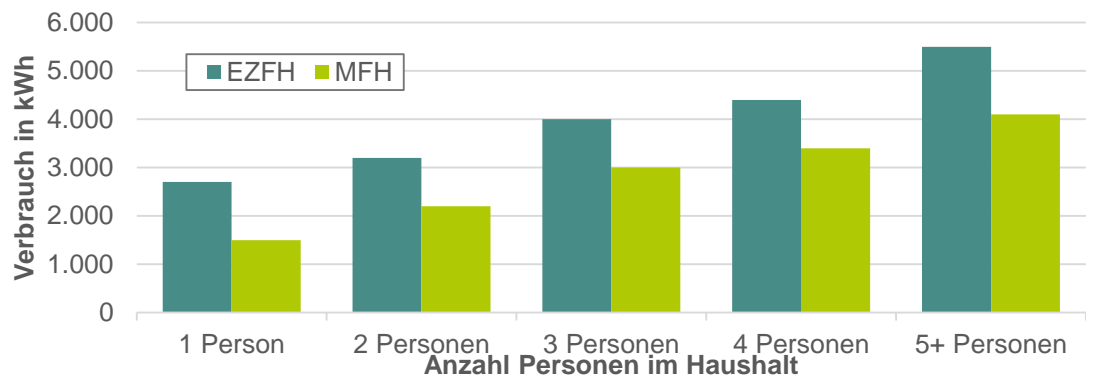


Abb. 2.1: Stromverbrauch nach Haushaltsgröße

Vergleich der Stromverbräuche von Ein- und Zweifamilienhäusern mit dem Mittelwert aller Haushaltstypen. Quelle: BMUB 2014

Mit Hilfe der Prozentsätze aus Abb. 2.2 sowie den absoluten Energieverbräuchen der Geräte wurde der absolute Strombedarf der einzelnen Verbrauchergruppen bestimmt. Diese absoluten Werte bilden die Grundlage für die Kalibrierung des Haushaltmodelles. Die einzelnen Verbrauchergruppen konnten somit realitätsnäher angepasst werden.

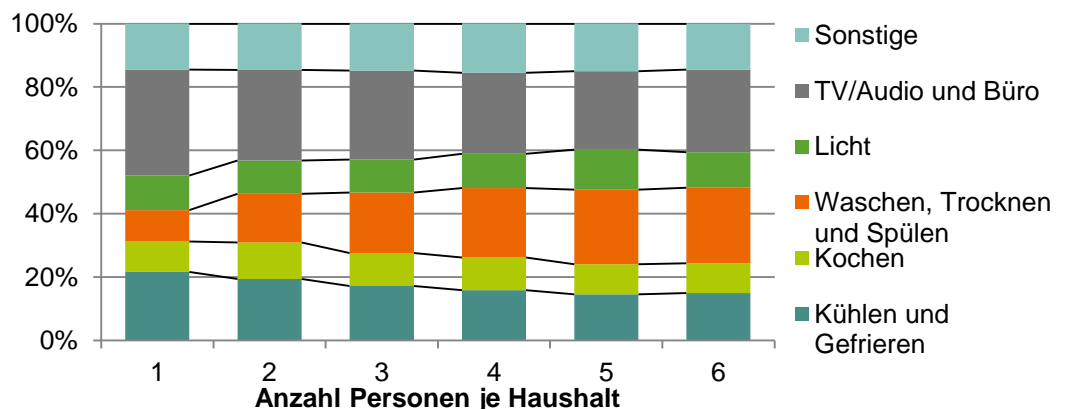


Abb. 2.2: Stromverbrauch von Gerätegruppen nach Haushaltsgröße

Quelle: EnergieAgentur NRW 2011

Im Modell wurde bei der Anpassung von insgesamt 12 Urlaubstagen ausgegangen, in denen niemand zu Hause war, in dieser Zeit ist der Stromverbrauch deutlich niedriger. Dies entspricht einem durchschnittlichen Wert der Reisedauer aller Urlaubsreisen der Deutschen in 2011 (statista 2015).

Des Weiteren soll das Haushaltsmodell für eine realistische Simulation der einzelnen Verbraucher im Haushalt auch Unterschiede zwischen Jahreszeiten berücksichtigen. In Anlehnung an die von Energieversorgern gemachte Einteilung des Jahres in Sommer, Winter und eine Übergangszeit soll hier ebenso verfahren werden. Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW, ehemals VDEW) teilt das Jahr in die in Tab. 2.1 aufgelisteten Zeiträume auf.

Tab. 2.1: Jahreseinteilung und Stromverbrauch nach BDEW

Quelle: VDEW Standardlastprofil H0

Jahreszeit	Daten	Dauer [Tage]	Prozentualer Anteil am Jahresverbrauch [%]
Winter	01.11. bis 20.03.	141	43,75 %
Sommer	15.05. bis 14.09.	123	28,77 %
Übergangszeit	21.03. bis 14.05. und 15.09. bis 31.10.	102	27,48 %

Es ist realistisch, dass der meiste Strom im Winter benötigt wird, wie aus der Tabelle hervorgeht. Dies ist nicht nur im Jahreszeitenmodell die längste Jahreszeit, sondern auch die Zeit, in der viel Licht und Wärme benötigt werden und Freizeitaktivitäten häufig im Inneren stattfinden. Im Ergebnis weist das Stromlastprofil des Modells am IÖW einen deutlichen Unterschied zum Standardlastprofil auf (vgl. Abb. 2.3).

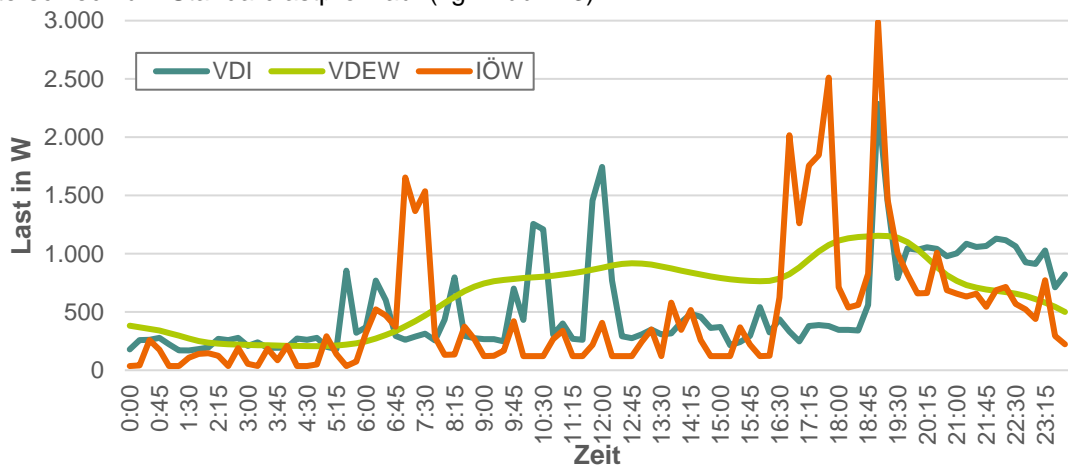


Abb. 2.3: Vergleich der Tageslastgänge eines Standardlastprofils, eines gemessenen Profils und des synthetischen Profils des IÖW

Quelle: Eigene Darstellung nach (VDI 4655 2008) und VDEW Standardlastprofil H0

Hierbei wird deutlich, dass die für die Betrachtung eines einzelnen Haushalts die wichtigen Lastspitzen abgebildet werden und das Standardlastprofil eher geglättete Werte zeigt. Damit ist eine Verwendung von Standardlastprofilen bei Berechnung in einzelnen Haushalten nicht geeignet. Im Vergleich mit gemessenen Stromlastprofilen des VDI (Abb. 2.3) zeigt sich, dass das synthetische Lastprofil des IÖW für den Eigenverbrauch eher konservative Annahmen trifft, d.h. dass sich die Lastspitzen eher am Morgen und Abend befinden.

2.1.2 Lastverschiebung von Haushaltsgeräten – Haushaltsinternes Demand Side Management (Smart Home)

Da das Nutzerverhalten ebenfalls einen großen Einfluss auf das Lastprofil hat, wurden neben dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Lastverhalten noch zwei weitere Lastszenarien erstellt, die im Folgenden genauer erklärt werden. Die Szenarien sind vor allem darauf ausgelegt, dass der Haushalt den Eigenverbrauch des selbsterzeugten PV-Stromes maximieren kann (haushaltsinternes Demand Side Management). Bei jeder dieser Varianten verändert sich der Jahresstromverbrauch nicht, da nur eine zeitliche Verschiebung der Last vorgenommen wird.

Im Modus **Status Quo** werden Geräte zu den Zeiten betrieben, zu denen jemand zu Hause ist und die Wahrscheinlichkeit für die Nutzung des Verbrauches groß ist. Im Gegensatz dazu werden bei der **systematischen Optimierung** energieintensive Verbraucher beispielsweise Waschmaschine, Wäschetrockner oder Geschirrspülmaschine auch während Abwesenheitszeiten mittels Zeitschaltuhr oder verändertem Nutzerverhalten während der Mittags- und frühen Nachmittagsstunden betrieben, da dann eine Photovoltaikanlage potenziell ihre größte Leistung erbringt. Die Lastverschiebung erfolgt unabhängig von der tatsächlichen Stromerzeugungslage, d.h. Tätigkeiten werden pauschal innerhalb eines Tages verschoben. In der Praxis ist dies relativ einfach realisierbar, da es bei den meisten Elektrogeräten bereits möglich ist, die Startzeit auf einen späteren Zeitpunkt festzulegen. Die **smarte Variante** (Optimierung nach Stromerzeugungslage) stellt eine Erweiterung der systematischen Optimierung dar. Sie berücksichtigt zusätzlich die prognostizierte Erzeugungslage der nächsten Tage auf Grundlage von Erzeugungs- bzw. Solarstrahlungsprognosen. Energieintensive Verbraucher werden gegebenenfalls innerhalb des Tages zu Zeiten, an denen deutlich höhere PV-Erträge zu erwarten sind, verschoben. Im Modell wird die Optimierung des Stromlastprofils ex post vorgenommen, d.h. mit einem Wetterbericht, der dann auch tatsächlich eingetreten ist, daher handelt es sich hierbei um ein best-practice-Szenario. In der Praxis kann dieses Verhalten näherungsweise manuell durch das Verfolgen des Wetterberichts oder automatisiert durch entsprechende technische Lösungen erfolgen. Allerdings fallen bei Nutzung technischer Steuerungsgeräte zusätzliche Kosten an, sodass in der Regel sogenannte „low-tech“ Varianten den Vorzug erhalten.

2.2 Ermittlung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs

2.2.1 Heizwärmeprofil und -bereitstellung

Im Modell werden parametrisierte Standardlastprofile für die Raumwärme verwendet, die an der TU München für die Gasindustrie entwickelt wurden (Hellwig 2003). Durch die Gebäudesubstanz, deren Wärmekapazität und die Heizwasserzirkulation handelt es sich bei der Raumwärme um ein sehr träges System. Folglich ist eine hohe Auflösung im Gegensatz zum Stromlastprofil für unsere Berechnungen nicht relevant. Synthetische Lastprofile bieten zudem die Möglichkeit, das Lastprofil über die enthaltenen Parameter anzupassen. Das synthetische Modell nach Hellwig wird um eine praxisübliche Heizgrenze ergänzt. Die Verbräuche an Tagen mit einer mittleren Außentemperatur von über 15 °C werden dabei auf die Heizperiode verteilt.

Die Heizlast für verschiedene Haushaltsgrößen ändert sich im Modell in Abhängigkeit von der entsprechend zu beheizenden Fläche des Einfamilienhauses. Die Abhängigkeit der Heizlast von weiteren Variablen wird bei der Variation der Haushaltsgröße vernachlässigt. Dabei wird angenommen, dass die gesamte Wohnfläche beheizt wird. In Tab. 2.2 sind die zu beheizenden Flächen der einzelnen Haushaltstypen dargestellt.

Tab. 2.2: Durchschnittliche Wohnfläche privater Haushalte in Einfamilienhäusern

Quelle: Statistisches Bundesamt 2013, Einfamilienhäuser, S. 19

Personen im Haushalt	1	2	3	4	5
Durchschnittliche Wohnfläche in m ² /Person	104,9	62,7	45,3	35,8	32,0
Durchschnittliche Wohnfläche des Haushalts in m ²	104,9	125,3	135,9	143,0	159,9

Darüber hinaus spielt der Gebäudetyp eine wichtige Rolle bei der Ermittlung der Heizlast. Im Modell kann der Gebäudetyp variiert werden, indem der spezifische Heizbedarf angepasst wird, z.B. 50 kWh/m²a für den aktuellen Neubau-Standard (Niedrigenergiehaus). In Abb. 2.4 ist die für die Simulation zugrunde gelegte Heizkurve für einen 4-Personen-Haushalt im Niedrigenergiehaus dargestellt.

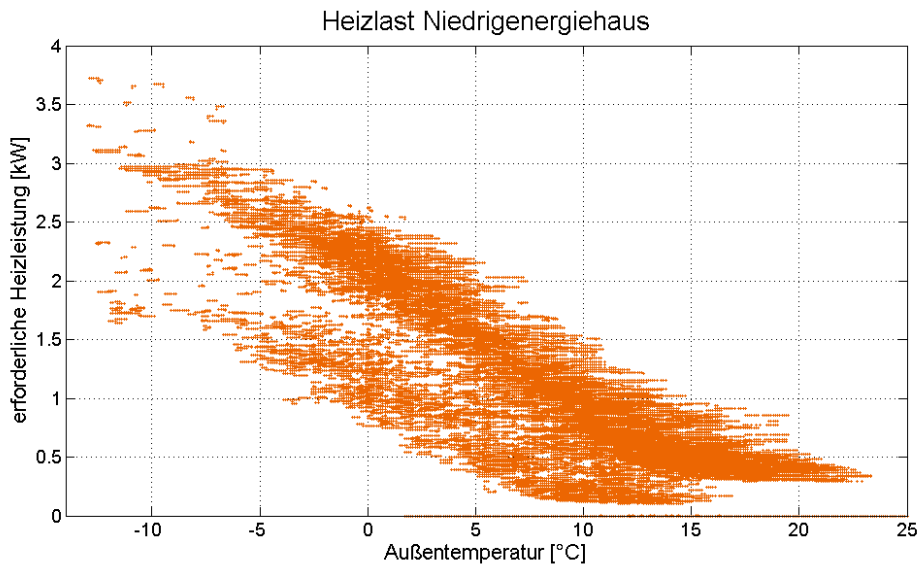


Abb. 2.4: Heizkurve Niedrigenergiehaus, 4-Personen-Haushalt

Quelle: Eigene Darstellung abgeleitet aus (Hellwig 2003)

Für die Simulation werden die Vor- und Rücklauftemperaturen in Anlehnung an (DIN V 4701-10:2003-08) bestimmt. In die Berechnung fließen Außentemperatur, Art der Heizkörper und Standortdaten ein. Für die Simulation werden statt Mittelwerten zeitlich variable Werte berechnet. Zudem wird das Modell um einen Überdimensionierungsfaktor ergänzt, der die Überdimensionierung der Heizflächen im Gebäudebestand berücksichtigt. Für den Überdimensionierungsfaktor wird ein Faktor von 1,2 vorgeschlagen (IWU 2002). Bereitgestellt wird die Heizungswärme im Modell über einen Heizkreis, der die Wahl zwischen Radi-

atoren und Fußbodenheizungen ermöglicht, bzw. bei dem die Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizkreises verändert werden können. In den Heizkreis ist darüber hinaus ein Pufferspeicher integriert.

2.2.2 Warmwasserprofil und -bereitstellung

Für die verschiedenen Haushaltstypen (1 bis 5 Personen) wurden mit dem Programm DHWcalc¹ die erforderlichen Warmwasserprofile für ein Jahr erstellt. Abb. 2.5 zeigt den jährlichen Warmwasserbedarf eines 4-Personen-Haushalts. Der Warmwasserbedarf wird über eine Frischwasserstation und/oder einen Durchlauferhitzer bereitgestellt. Das Warmwasser der Frischwasserstation wird dabei durch einen Wärmeüberträger innerhalb des Heizungspufferspeichers bereitgestellt. Wenn die Temperatur im Pufferspeicher zur Warmwasserbereitung nicht ausreicht, beispielsweise beim Betrieb einer Wärmepumpe mit 35 °C Vorlauftemperatur, dann kann über den Pufferspeicher das Trinkwasser vorgewärmt und im Anschluss mit dem Durchlauferhitzer auf das gewünschte Warmwasser-Temperaturniveau angehoben werden (im Modell vereinfachend konstant 40 °C).

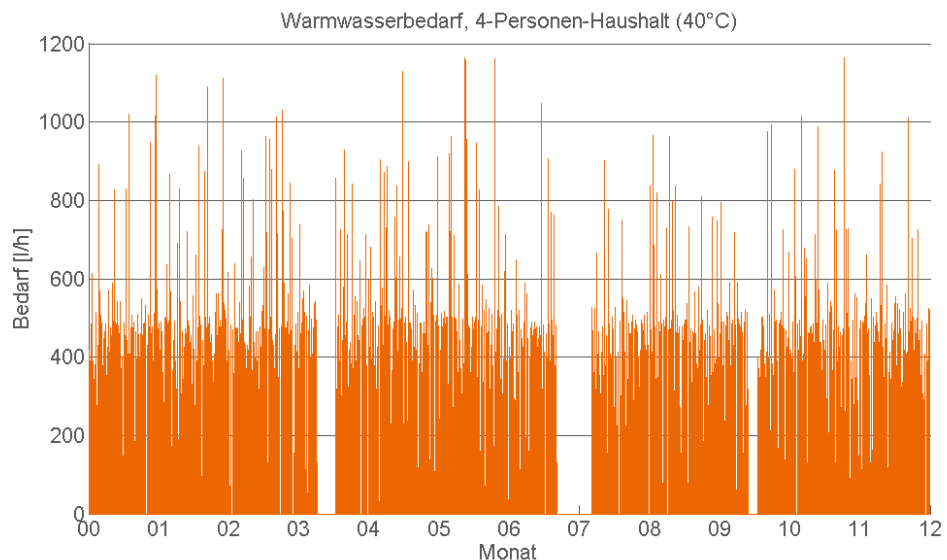


Abb. 2.5: Warmwasserprofil, 4-Personen-Haushalt mit Urlaubsunterbrechungen

Quelle: Erstellt mit DHWcalc

2.3 Implementierte Technologien und betrachtete Kombinationen

Die zentrale Eigenschaft eines Prosumer-Haushalts im Rahmen des Projekts ist der Verbrauch von eigenerzeugtem Strom, daher liegt der Fokus des Prosumer-Simulationsmodells auf der Implementierung von Technologien zur Stromerzeugung. Ein Kernelement der Technologieoptionen ist deshalb die Photovoltaik, für die sich eine Reihe von Technologien zur Kombination anbieten, die ebenfalls implementiert sind, um entweder den Eigenver-

¹ DHWcalc ist eine Entwicklung der Universität Kassel und steht als kostenloser Download zur Verfügung unter: <http://solar.umwelt-uni-kassel.de/downloads..openDIFolder.040295449088c2a7f7ca.de.html>

brauch des selbst erzeugten Stroms (z.B. Power-To-Heat) oder den Autarkiegrad (z.B. Batteriespeicher) zu erhöhen. In Abb. 2.6 ist eine Übersicht über alle implementierten Technologien dargestellt.

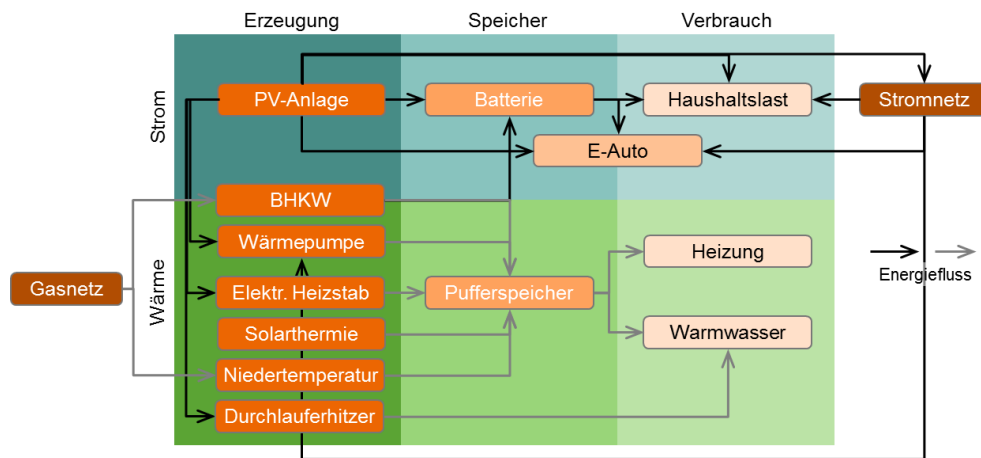


Abb. 2.6: Schematische Darstellung des Modells und der implementierten Technologien zur Erzeugung, Verbrauch und Speicherung von Strom und Wärme

Zur Simulation der **Photovoltaik** werden Herstellerdaten des Kollektors SM-255PC8 von S-Energy (S-Energy 2012) verwendet. Die Module haben eine Peakleistung von 255 Wp. Zur Simulation größerer Anlagen wird das gewählte Modul skaliert, was nach Quaschnig bei gleichen Bedingungen für alle Module ohne Beschränkungen möglich ist (Quaschnig 2013). Der Wechselrichter der Photovoltaik-Anlage wird separat modelliert, er dient der Umwandlung von Gleich- in Wechselstrom. Die Umrichtung ist mit Verlusten verbunden, die von der Eingangsleistung abhängen. Für die Simulation wird der Wechselrichter SMC 8000TL (SMA Solar Technology AG) gewählt. Dieser erbringt bei geringer Eingangsleistung hohe Wirkungsgrade und bei steigender Leistung sinkende Wirkungsgrade. Diese Wahl begünstigt einen höheren Eigenverbrauch des selbsterzeugten Stroms. Vereinfachend werden bei der Skalierung der Leistung des Wechselrichters die Parameter beibehalten.

Des Weiteren ist zur Stromproduktion eine **KWK-Anlage** implementiert worden. Die klassische Betriebsstrategie, die eine KWK-Anlage verfolgt, ist die wärmegeführte Betriebsweise. Die Anlage wird zunächst nach einer Mindestjahresarbeitsstundenzahl ausgelegt, um einen wirtschaftlichen Betrieb gewährleisten zu können.² Hierzu wird die Jahresdauerlinie der Heizkurve des betrachteten Gebäudes herangezogen. Zur Darstellung der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung werden drei verschiedene Anlagentypen betrachtet. Um den Status Quo des gegenwärtig hauptsächlich in privaten Haushalten zur Anwendung kommenden BHKW-Typs abzubilden, wird ein erdgasbefeuertes wärmegeführtes BHKW modelliert.

Die elektrischen Wirkungsgrade fallen dabei, z.B. im Vergleich zu Brennstoffzellensystemen, relativ niedrig aus. Diese Technologie ist zwar gegenwärtig noch nicht wirtschaftlich, wird aber kontinuierlich weiterentwickelt, sodass als weitere KWK-Installationsmöglichkeit im privaten Haushalt auch die Brennstoffzellentechnologie als Simulationsoption mit aufgenommen wurde. Hierbei kann eine stromgeführte Festoxidbrennstoffzelle (SOFC) und eine

² Zur Systemoptimierung sind hierzu auch Parameterstudien durchgeführt worden, die eine optimale Dimensionierung der KWK-Anlage aufzeigen, um damit verschiedene Ziele zu erreichen, wie beispielsweise den Autarkiegrad zu maximieren.

wärmegeführte Polymerelektrolytbrennstoffzelle (PEMFC) gewählt werden. Die Festoxidbrennstoffzelle erzielt dabei die höchsten elektrischen Wirkungsgrade und eignet sich daher am besten für die stromgeführte Betriebsweise. In Abb. 2.7 sind die Teillastwirkungsgrade der beiden simulierten Brennstoffzellensysteme, sowie das erdgasbefeuerte BHKW dargestellt.

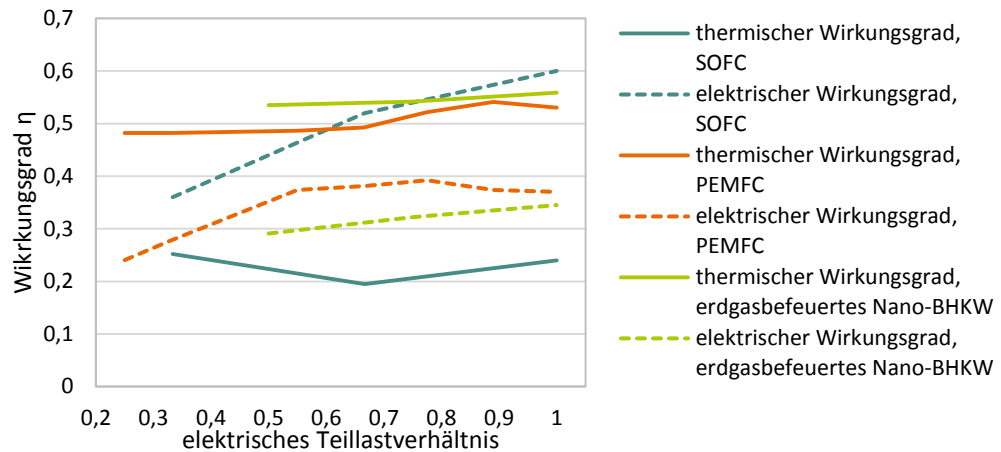


Abb. 2.7: Teillastwirkungsgrade PEMFC, SOFC und erdgasbefeuetes Nano-BHKW

Quelle: Viessmann Vitovalor 300-P, Bluegen-BHKW mit Gennex Brennstoffzellenmodul bzw. Viessmann Vitobloc 200 mit der Annahme, dass die Skalierungseffekte beim Teillastverhältnis auch bei kleineren Nennleistungen ähnlich sind

Die KWK-Anlage dient der Grundlastdeckung und daher muss ein zusätzlicher Wärmeerzeuger für Wärmelastspitzen vorhanden sein. Diese Funktion übernimmt im Modell ein erdgasbefeuerter **Niedertemperaturkessel**. Dieser wird auch standardmäßig verwendet, wenn keine Wärmeerzeuger implementiert sind, die eine Kopplung zum Stromkreis haben. Hier wurde als Grundlage für die Daten der erdgasbefeuerte Vitocrossal 300 von Viessmann genutzt.

Darüber hinaus können PV und KWK im Prosumer-Modell nicht nur untereinander, sondern mit weiteren Technologien kombiniert werden. Dazu zählen neben einer Batterie zur Speicherung des erzeugten Stroms auch Möglichkeiten zur Nutzung des selbsterzeugten Stroms bei der Wärmeerzeugung durch Wärmepumpen oder einem elektrischen Heizstab. Für die Simulation des aufladbaren **Batteriespeichers** wurden die Herstellerdaten des Batteriespeichersystems VITOVOLT 200 Viessmann genutzt. Die Größe des Speichers wurde an das jeweilige Haushaltssystem angepasst und eine einfache Betriebsstrategie der Sofortladung zur Maximierung des Eigenverbrauchs gewählt. Als Wärmequelle der **Wärmepumpe** wird Umgebungsluft gewählt, da dieser Typ Wärmepumpe seit 2011 der am häufigsten verwendete ist. Nach Daten des Bundesverbandes Wärmepumpe werden seit 2011 zu über 50 % Luft-Wasser Wärmepumpen verkauft (BWP 2013). Die Modellierung wurde an die Herstellerdaten der Waterstage High Power WYSK 112 angelehnt. Für den **elektrischen Heizstab** wurde ein einfaches Modell mit einer konstanten Last verwendet, der sich direkt am Pufferspeicher installieren lässt. Die Leistung ist dabei abhängig von der Größe der PV-Anlage.

Bei der Modellierung wird der Energiebedarf für die Bereitstellung von Raumwärme bzw. Warmwasser getrennt voneinander betrachtet. Je nach eingesetzter Technologie können Raumwärme und Warmwasser also auch von getrennten Anlagen oder kombiniert von einer

Anlage bereitgestellt werden. Nach Untersuchungen des Instituts Wohnen und Umwelt (Diefenbach et al. 2010) wird Warmwasser in 76,9% des Wohngebäudebestands in Kombination mit Raumwärme von der Heizungsanlage und in 23,1% des Wohngebäudebestands von separaten Anlagen bereitgestellt. Bei separaten Anlagen kommen vor allem elektrische Durchlauferhitzer zum Einsatz.

Tab. 2.3 gibt einen Überblick über alle Kombinationsmöglichkeiten, die in der Ergebnisauswertung in Kapitel 3 betrachtet werden.

Tab. 2.3: Übersicht: Kombinationsmöglichkeiten der Technologien

Technologie-Kombination	Beschreibung
NO	Referenzszenario (Basis, kein Prosumer): „Consumer-Haushalt“: Strombezug aus dem Netz, Niedertemperaturkessel zur Warmwasser- und Heizenergiebereitstellung, Pufferspeicher, Frischwasserstation, keine weitere Erzeugungsanlage
PV	Niedertemperaturkessel, Pufferspeicher, Frischwasserstation, Photovoltaik-Anlage mit 4 kWp Südausrichtung (PV-S) und Ost-West-Ausrichtung (PV-OW)
PV + BAT	Niedertemperaturkessel, Pufferspeicher, Frischwasserstation, Photovoltaik-Anlage (4 kWp) und Batteriespeicher (4 kWh)
PV + WP	Inverter-Luft-Wasser-Wärmepumpe (WATERSTAGE High Power WSYK 112) mit variabler Nennleistung je nach Haushaltsgröße und Dämmwerten des Einfamilienhauses, Pufferspeicher, Frischwasserstation, elektrischer Durchlauferhitzer für Warmwasserspitzenlast, Photovoltaik-Anlage
PV + EHZ	Niedertemperaturkessel, Pufferspeicher, Frischwasserstation, Photovoltaik-Anlage und Elektroheizstab zur Heizunterstützung durch Umwandlung von PV-Überschussstrom
KWK	Basis + KWK (Grundlast) + Niedertemperaturkessel (Spitzenlast) Erdgas-befeuertes Nano-BHKW, optimierte Nennleistung je nach Haushaltsgröße und Dämmwerten, Optimierung hinsichtlich der stromseitigen Bedarfsdeckung
KWK + PV	Basis + PV-Anlage und BHKW [Arbeiten entweder unabhängig voneinander (wärmegeführte KWK-Anlage) oder Stromerzeugung kann teilweise an den Bedarf bzw. an das solare Angebot angepasst werden (stromgeführte KWK)]
KWK + BAT	KWK-Strom kann zwischengespeichert werden, Batteriekapazität: 4 kWh

3 Simulationsergebnisse, Auswertung und Diskussion

In diesem Kapitel werden die zentralen Ergebnisse der Simulation dargestellt. Dabei werden zunächst die Gesamtergebnisse der Technologiekombinationen verglichen und die Bedeutung von Stromeffizienz im Haushalt im Zusammenhang mit dem Eigenverbrauch und die charakteristischen Lastkurven sowie Implikationen auf das Stromnetz dargestellt.

3.1 Vergleich der Ergebnisse für verschiedene Technologieoptionen

In Abb. 3.1 ist die Strombilanz eines 4-Personen-Einfamilienhauses für verschiedene Technologiekombinationen dargestellt (Legende siehe Tab. 2.3). Der Strombedarf liegt bei einem reinen Consumer-Haushalt bei 4.446 kWh. Die Höhe des nötigen Strombezugs aus dem Netz kann nun mit verschiedenen Technologiekombinationen verändert werden, da ein Prosumer-Haushalt je nach Technologie unterschiedliche Eigenverbrauchsquoten des selbst erzeugten Stroms erzielen kann.

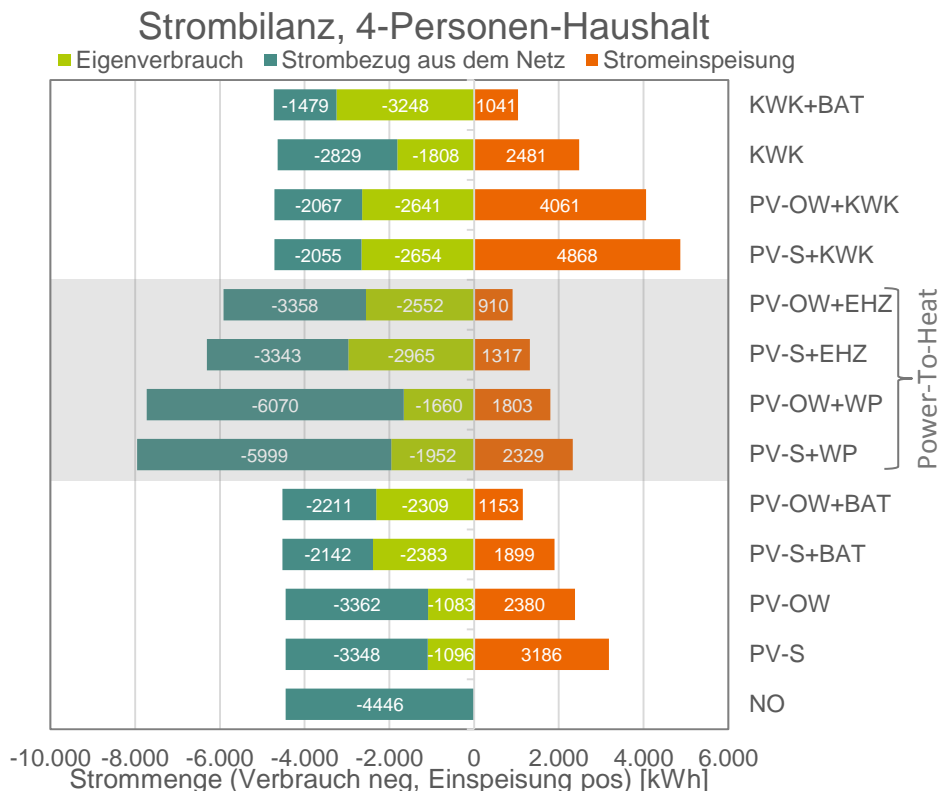


Abb. 3.1: Strombilanz für einen 4-Personen-Haushalt bei unterschiedlichen Technologien

Neubau (spezifischer Wärmeverbrauch: 60 kWh/(m²*a)), ohne Demand Side Management

Mit einer PV-Anlage (4 kWp) in Südausrichtung und einem Batteriespeicher (4 kWh Ladekapazität) kann der nötige Stromzukauf auf die Hälfte reduziert werden. Mit einem Erdgas-befeuerten Nano-BHKW kann die benötigte Strombezugsmenge sogar auf ein Drittel reduziert

werden. Insgesamt ist die Größe der Erzeugungs- und Speicheranlagen natürlich ausschlaggebend für die Höhe von Eigenverbrauch, Netzbezug und Stromeinspeisung. Für die Darstellung ausgewählter Ergebnisse wurden daher die Anlagen passend zum Haushalt dimensioniert, um so einen möglichst wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen. Die Ergebnisse werden im Folgenden nur für den 4-Personen-Haushalt und einen Neubau dargestellt. Für andere Haushaltsgrößen oder Gebäudetypen lassen sich aber mit der entsprechend angepassten Dimensionierung der Anlagen ähnliche Ergebnisse ermitteln.

Die Power-to-Heat-Technologieoptionen ermöglichen eine Reduktion der Stromeinspeisung und erhöhen den Eigenverbrauch. Dabei müssen zwei wesentliche Unterschiede zwischen der Kombination von PV mit entweder einem elektrischen Heizstab oder einer Wärmepumpe beachtet werden:

1. Der elektrische Heizstab ist nur ein zusätzlicher Wärmeerzeuger neben dem Niedertemperaturkessel, daher fällt mehr Primärenergie für Heizzwecke an als in Abb. 3.1 dargestellt ist, weil es sich hier nur um die Darstellung des Stromverbrauchs handelt. Dadurch ist der gesamte Stromverbrauch in dem Power-To-Heat-Szenario mit Wärmepumpe höher, weil die Wärmepumpe ohne weiteren Wärmeerzeuger auskommt (monovalenter Betrieb).
2. Der Eigenverbrauch ist im Falle eines Elektroheizstabs höher als bei der Wärmepumpe, da der Heizstab nur bei Spitzen die Last der PV nutzt und nicht als durchgängiger Wärmeerzeuger wie die Wärmepumpe arbeitet.

Die Eigenverbrauchsanteile und Autarkiegrade der verschiedenen Technologieoptionen sind in Abb. 3.2 dargestellt. Der maximal erreichbare Autarkiegrad ist mit einer Kombination aus KWK und Batteriespeicher realisierbar und liegt leicht über 75%.

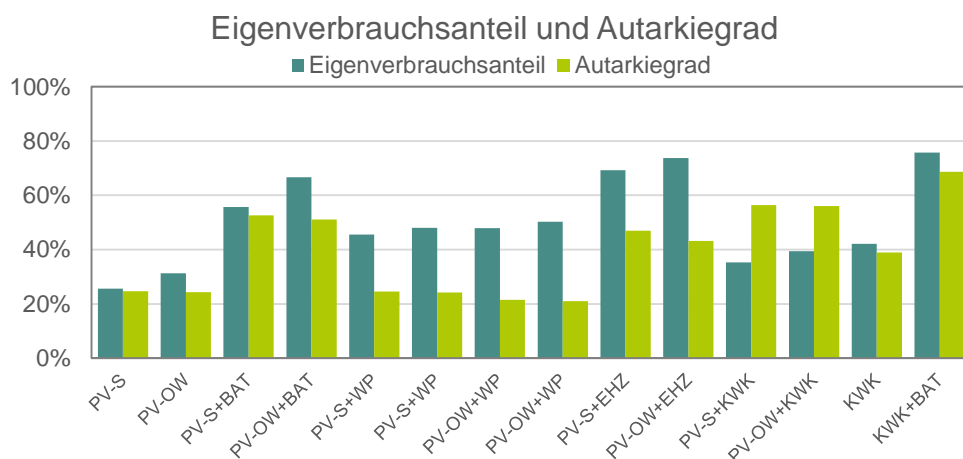


Abb. 3.2: Eigenverbrauch und Autarkiegrad im 4-Personen-Haushalt für verschiedene Technologiekombinationen

Neubau (spezifischer Wärmeverbrauch: $60 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$), ohne Demand Side Management

Bei Erhöhung der Dimensionierung der Batterie lassen sich diese Eigenverbrauchsanteile und Autarkiegrade natürlich noch erhöhen. Dann ist die Batterie im Winter jedoch zum Großteil ungenutzt und kann im Sommer durch den Haushalt nicht geleert werden. Eine weitere Möglichkeit, die Passung zwischen Erzeugung und Verbrauch zu erhöhen, ist das

(haushaltsinterne) Demand-Side-Management. Die Ergebnisse bei gleichzeitiger Implementierung eines solchen finden sich in Abb. 3.3.

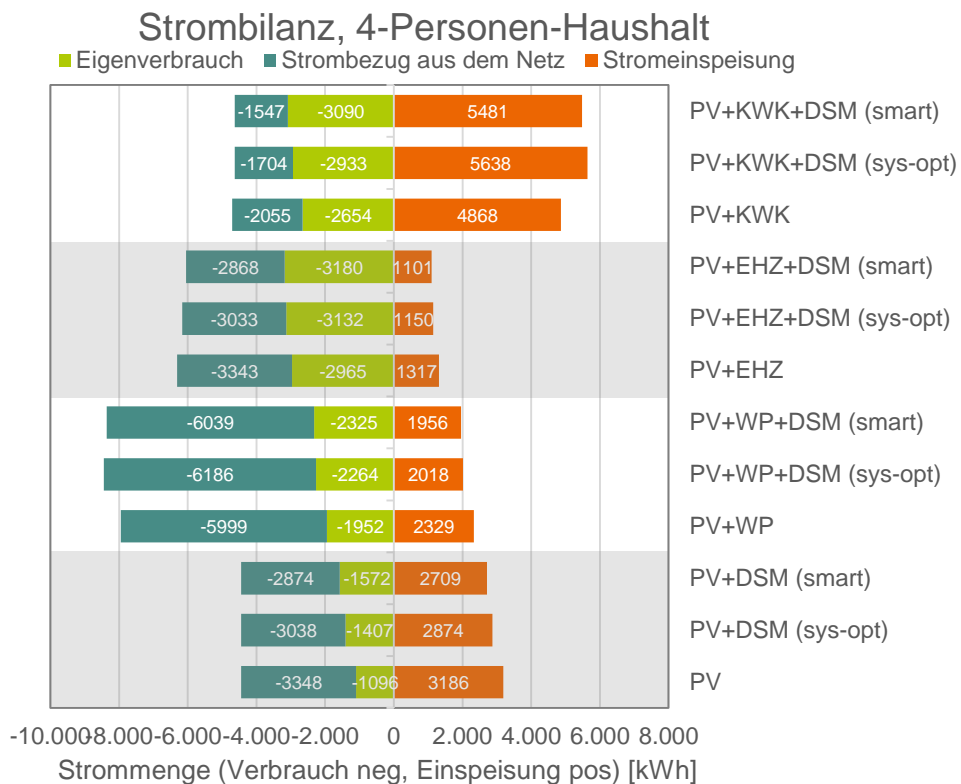


Abb. 3.3: Strombilanz für einen 4-Personen-Haushalt bei unterschiedlichen Technologien mit Demand-Side-Management

Neubau (spezifischer Wärmeverbrauch: 60 kWh/(m²*a))

Dabei werden zwei verschiedene Lastverschiebungsvarianten betrachtet, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben. Betrachtet man die Ergebnisse, so zeigt sich, dass der Eigenverbrauch sich in allen Fällen erhöht, jedoch in unterschiedlichem Maß: Bei PV um 43% (476 kWh absolut), bei PV und Wärmepumpe um 19% (373 kWh absolut) bei PV und Heizstab nur um 7% (215 kWh absolut) und bei PV und KWK um 16% (436 kWh absolut). Bei der Stromeinspeisung zeigt sich in den Fällen ohne KWK ein umgekehrtes Bild: Je besser die Lastverschiebung, desto weniger Strom wird ins Verteilnetz eingespeist. Im Falle des BHKW jedoch ermöglicht eine bessere Passung von Erzeugung und Verbrauch, dass das BHKW gleichmäßiger betrieben werden kann und dadurch insgesamt mehr Strom erzeugt.

3.2 Charakteristische Änderungen in der Lastkurve und Auswirkungen auf die Netze

Im folgenden Kapitel sollen Auswirkungen der Prosumer und deren charakteristischen Eigenschaften analysiert werden. Dabei sollen darauf aufbauend auch erste Implikationen für das Verteilnetz ermittelt werden. Die Auswirkungen werden zum einen aufgrund verschiedener Technologien und zum anderen aufgrund von Lastverschiebungen diskutiert.

3.2.1 Auswirkungen von verschiedenen Technologien auf die Lastkurve

In diesem Abschnitt sollen zunächst die Besonderheiten der verschiedenen Technologien dargestellt werden. Dazu ist in den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 3.4 - Abb. 3.6) der Durchschnitt des Strombezugs und der -einspeisung über alle 365 Tage für drei verschiedene Technologiekombinationen dargestellt. Damit sind die Schwankungen im Tagesgang (vgl. Abb. 2.3) nicht mehr sichtbar, doch es lassen sich die durchschnittlichen Besonderheiten der Technologien gut erkennen. In allen Abbildungen ist zum Vergleich das Stromlastprofil des klassischen Consumer-Haushalts (in Türkis) mit zwei lokalen Minima – am Morgen bzw. am Abend – und der Prosumer-Haushalt (in Hellgrün) mit einer PV-Anlage (4 kWp) dargestellt. Deutlich wird hier, dass der Prosumer-Haushalt mit PV-Anlage die Netze mehr belastet als ein reiner Consumer-Haushalt, da der Gradient zwischen der hohen Einspeisung am Nachmittag und dem Verbrauch am Abend deutlich höher ist als bei einem reinen Strombezug.

In Abb. 3.4 ist nun zum einen zusätzlich eine PV-Anlage in Ost-West-Ausrichtung und zum anderen eine PV-Anlage mit Batteriespeicher abgebildet. Dabei lässt sich zum einen erkennen, dass die PV-Anlage mit Ost-West-Ausrichtung die Netze zur Mittagszeit weniger stark belastet. Zum anderen ist durch die frühere Erzeugung am Morgen und die längere Erzeugung am Abend auch zu erkennen, dass es in diesen Zeiten eine Entlastung beim Strombezug gibt und die Spitzen hier ebenfalls leicht geringer sind. Es stellt sich bei dieser Ausrichtung somit ein doppelter Entlastungseffekt ein.

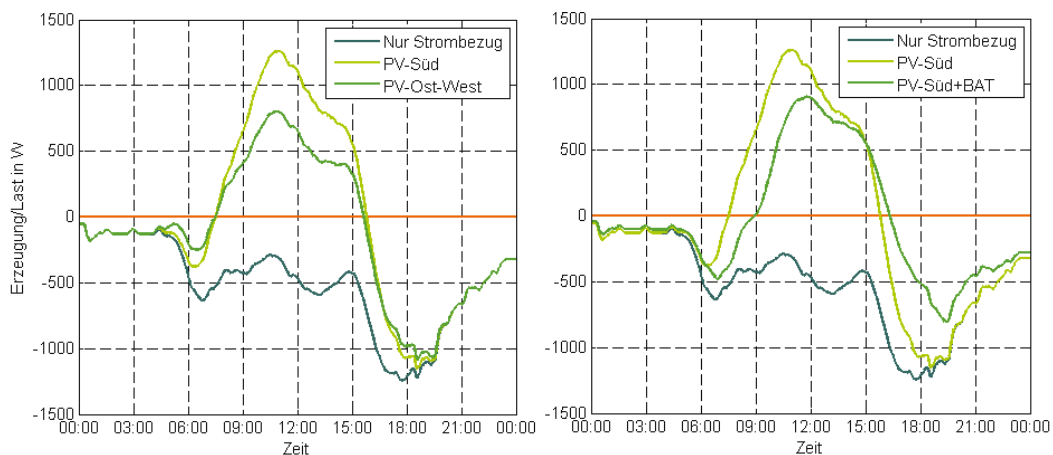


Abb. 3.4: Auswirkungen auf die Lastkurve bei verschiedenen Ausrichtungen der PV-Anlage und Einsatz von Batteriespeichern

Im linken Bild sind verschiedene Ausrichtung (Süd und Ost-West) zu sehen, im rechten Bild ist die PV-Anlage einmal mit und einmal ohne Batteriespeicher zu sehen.

Beim Einsatz eines Batteriespeichers hingegen kann man eine zeitliche Verzögerung der Netzeinspeisung bedingt durch den Speicher erkennen. Dabei wird im Durchschnitt auch die Lastspitze ähnlich stark wie bei einer Anlage mit Ost-West-Ausrichtung. Der Effekt der Reduktion des Netzbezugs am Morgen und Abend tritt jedoch beim Speicher noch viel stärker in Erscheinung.

Die Einspeisungs-/Bezugskurve eines Prosumer-Haushalts, der eine KWK-Anlage betreibt, ist in Abb. 3.5 dargestellt, einerseits bei alleinigem Betrieb einer KWK-Anlage, andererseits in Kombination mit einer PV-Anlage. Durch die Erzeugung mit einer KWK-Anlage kann der Prosumer-Haushalt seine Leistungsaufnahme zu allen Tageszeiten durchschnittlich um 50% der elektrischen Nennleistung der KWK-Anlage verringern. Dass durchschnittlich nur die Hälfte der elektrischen Nennleistung der KWK-Anlage übers Jahr genutzt werden kann, liegt größtenteils daran, dass die KWK Anlage auch nur zu 50 % über das gesamte Jahr ausgelastet ist (Benutzungsstunden ca. 4.200 h/a). In Abb. 3.5 ist der grundsätzliche Dauerbetrieb der KWK-Anlage deutlich zu erkennen, da die Kurve des reinen Strombezugs fast vollständig nach oben verschoben ist.

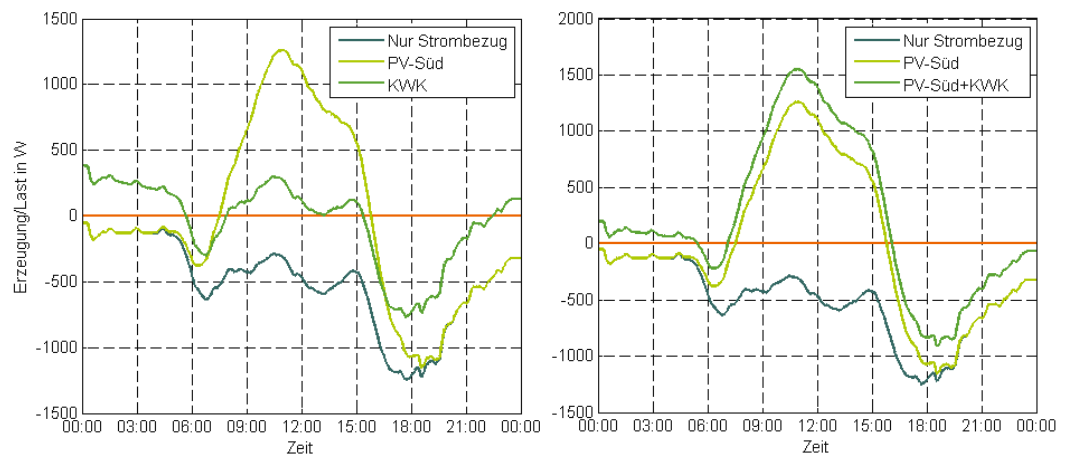


Abb. 3.5: Auswirkungen auf die Lastkurve durch Einsatz von KWK, PV und deren Kombination

Im linken Bild sind die Auswirkungen von KWK und PV einzeln zu sehen, im rechten Bild ist die PV-Anlage mit der KWK-Anlage zusammen implementiert.

Als weitere Optionen lassen sich noch die im Modell untersuchten Möglichkeiten der Nutzung von Power-To-Heat analysieren. Die Ergebnisse für den Einsatz eines Heizstabs sowie einer Wärmepumpe sind in Abb. 3.6 dargestellt. Anhand der Grafiken lässt sich erkennen, dass Power-To-Heat-Optionen sehr unterschiedliche Auswirkungen haben können. Der elektrische Heizstab ist eine Möglichkeit, möglichst viel vom PV-Strom zur Wärmebereitstellung zu nutzen, ist dabei jedoch nicht sehr effizient. Von allen dargestellten Kombinationen mit der PV-Anlage bietet er aber die beste Reduktion der Lastspitzen um ca. 70%. Gleichzeitig bleibt im Fall vom elektrischen Heizstab die Spitze im Netzbezug unberührt.

Die Nutzung einer Wärmepumpe hingegen führt zu einer gleichmäßigen Verschiebung der Lastkurve nach unten, da die Wärmepumpe als Wärmegrundlast nahezu durchgängig läuft. Dabei verringert sich die Lastspitze zwar ebenfalls um ca. 50%, der Netzbezug wird jedoch auch erhöht, so dass der Gradient zwischen Einspeisung und Bezug nahezu identisch bleibt und damit möglicherweise auch keine große Netzentlastung auftritt.

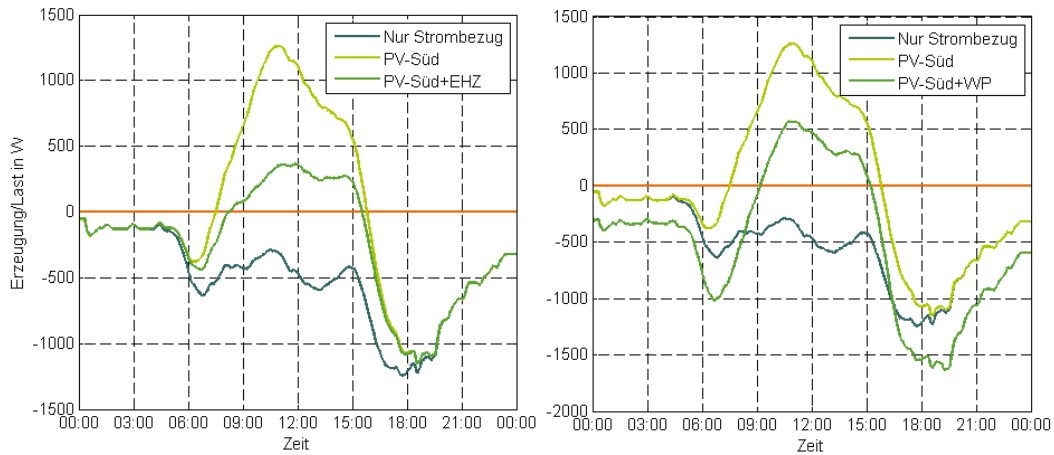


Abb. 3.6: Auswirkungen auf die Lastkurve durch verschiedene Power-To-Heat-Optionen

Im linken Bild ist die Kopplung der PV mit einem elektrischen Heizstab zu sehen, im rechten Bild ist die Kopplung mit einer Wärmepumpe zu sehen.

3.2.2 Auswirkungen von haushaltsinternen Maßnahmen zur Lastverschiebung

In Abb. 3.7 ist der Durchschnitt des Strombezugs und der -einspeisung wieder über alle Tage eines Jahres für drei verschiedene Lastmanagementstrategien dargestellt. Hier zeigt sich, wie sich Demand Side Management (DSM) auf die Einspeisung von PV-Strom ins öffentliche Stromnetz auswirken kann.

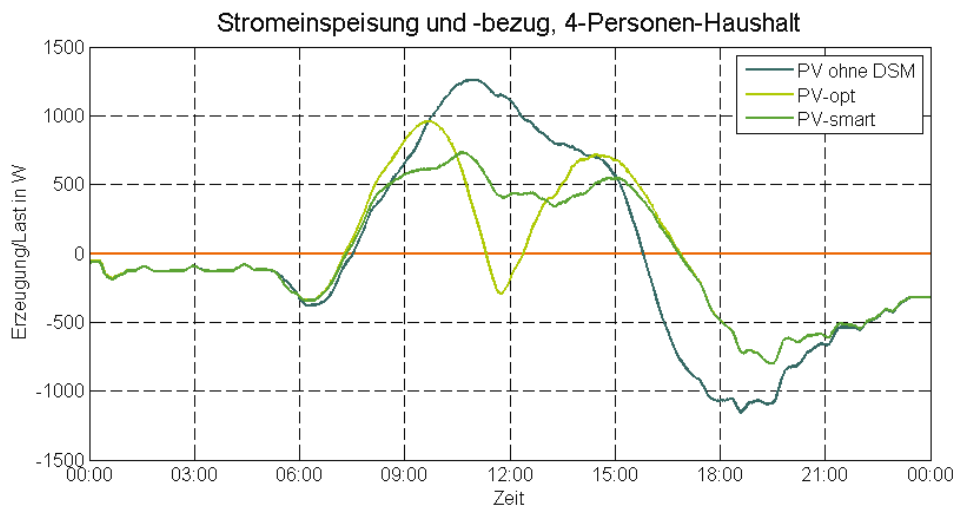


Abb. 3.7: Durchschnittliche Stromeinspeisung und -bezug mit und ohne Demand Side Management (DSM)

Ohne DSM beginnt im Durchschnitt gegen 9:00 Uhr die Einspeisung des PV-Stroms, der im Haus nicht zur Eigenbedarfsdeckung benötigt wird. Die Stromeinspeisung erhöht sich bis zum Mittagspeak und am Nachmittag muss wieder Strom bezogen werden.

Beim „optimierten Lastprofil“ werden lediglich die energieintensiven Haushaltsgeräte (Waschmaschine, Wäschetrockner oder Geschirrspülmaschine) auch während der Abwesenheitszeiten mittels Zeitschaltuhr in die Mittags- oder frühen Nachmittagsstunden verlegt (siehe Kapitel 2.1.2). Der durchschnittliche Verlauf der Stromeinspeisung zeigt deutlich, dass sich diese Methode positiv auf den Eigenverbrauch des PV-Stromes auswirkt. Dennoch muss hier hervorgehoben werden, dass die willkürlich von den Prosumer-Haushalten festgelegten Startzeiten der stromintensiven Verbraucher zu zusätzlichen Risiken beim Netzbetrieb führen können. Hier wäre es für den Netzbetreiber einfacher, den Verlauf des Wetters zu prognostizieren als das Verhalten der Prosumer, und so kann es bei einer größeren Anzahl von Prosumern zu plötzlichen unabsichtlichen kollektiven Lastspitzen kommen, die vom Netzbetreiber ausgeglichen werden müssen. Wie sich dieses Verhalten mittel- und langfristig auf den Strompreis auswirken würde, müsste anhand von Netzentgeltänderungen näher untersucht werden.

Das smarte Lastprofil stellt den DSM-Idealzustand dar, in dem das zukünftige Wetter zu jeder Zeit bekannt ist. Es ist deutlich zu erkennen, dass innerhalb der zeitlichen Bilanzkreise der Netzbetreiber ein Peak-Shaving möglich ist. Bei einer größeren Anzahl von Prosumerten mit DSM im Netzgebiet kann demnach der Erzeugungsspeak um ca. ein Drittel und die abendliche Lastspitze sogar um die Hälfte gesenkt werden.

Aufgeteilt auf verschiedene Technologien hat der Einsatz von DSM-Maßnahmen einen unterschiedlich hohen Einfluss, wie in Abb. 3.8 in Form von Eigenverbrauchsanteilen und Autarkiegraden dargestellt. Während bei der PV der Unterschied beim Eigenverbrauch bei ca. 10%-Punkten liegt, ist dieser bei der Kombination von PV und KWK nahezu stabil.

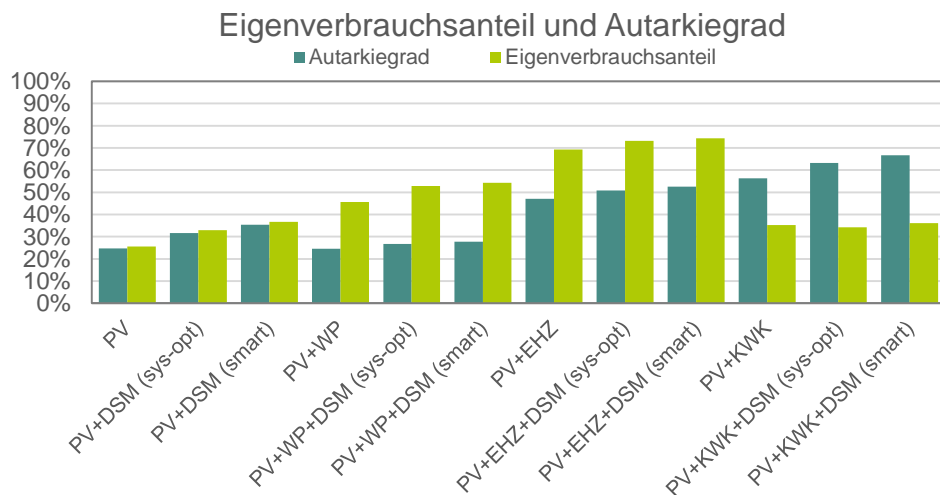


Abb. 3.8: Eigenverbrauch und Autarkiegrad im 4-Personen-Haushalt für verschiedene Technologiekombinationen mit Demand-Side-Management
Neubau (spezifischer Wärmeverbrauch: 60 kWh/(m²*a))

3.3 Bedeutung von Änderungen in der Effizienz des Haushalts

Um zu überprüfen, welche Auswirkungen ein veränderter Stromverbrauch des Haushalts hatte, wurden hierfür exemplarische Ergebnisse berechnet. Grundlage war dabei der Stromspiegel (BMUB 2014), welcher Haushalte in verschiedene Stromeffizienzklassen einteilt (A-G). Der Gesamtverbrauch wurde im Haushalt durch effiziente Geräte oder zusätzliche/fehlende Geräte so erhöht/erniedrigt, dass eine Passung zum Stromspiegel gegeben ist. Dadurch werden im Haushalt insbesondere auch die Spitzenlasten erhöht/reduziert, wie in Abb. 3.9 zu sehen ist.

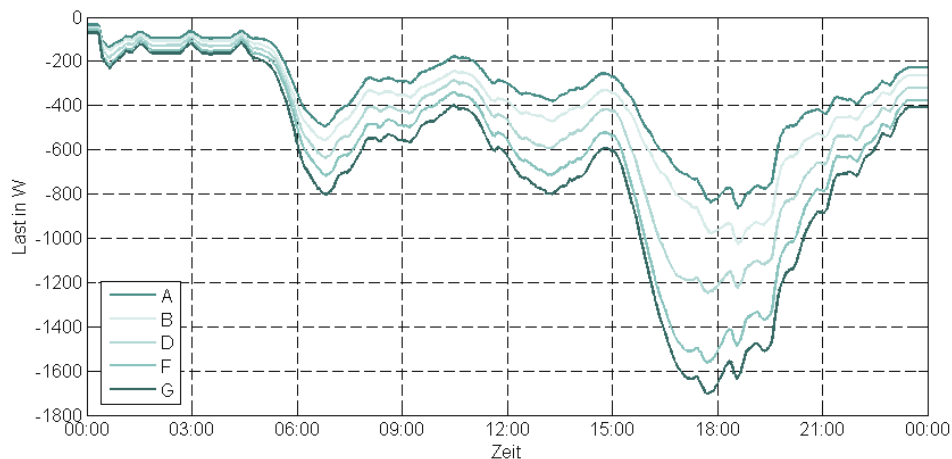


Abb. 3.9: Durchschnittlicher Tageslastgang bei unterschiedlichen Stromeffizienzklassen im 4-Personen-Haushalt

Quelle: Jahresstromverbrauch entsprechend dem Stromspiegel (BMUB 2014)

In den meisten Fällen wird die Entscheidung für die Dimensionierung der Technologien ohne die genaue Analyse des Haushalts gefällt. Daher haben wir bei unveränderter Dimensionierung die Ergebnisse im Eigenverbrauch und Autarkie bei den Stromeffizienzklassen A, D und G analysiert, dabei ist die Klasse D auch die bisherige Klasse. Dies gibt insbesondere auch Aufschluss darüber, welche Auswirkungen es hat, wenn nach Einbau der Technologien eine Erhöhung oder Reduktion des Stromverbrauchs stattfindet, bspw. durch veränderte Lebensbedingungen. Dies kann insbesondere auch großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Anlagen haben.

In der Abb. 3.10 sind nun die Eigenverbrauchsanteile für verschiedene Technologien und die Stromeffizienzklassen abgebildet. Es zeigt sich, dass bei steigendem Stromverbrauch natürlich auch der prozentuale Eigenverbrauch zunimmt, jedoch mit unterschiedlichem Einfluss. Da bei einer PV-Anlage in Kombination mit einem Heizstab der Eigenverbrauch bspw. schon relativ hoch ist, hat der Jahresstromverbrauch nicht mehr einen so großen Einfluss. Anders sieht es im Fall der KWK aus, bei der durch die durchgängige Stromproduktion der Einfluss zwischen Stromeffizienzklasse A und G bei 20%-Punkten liegt.

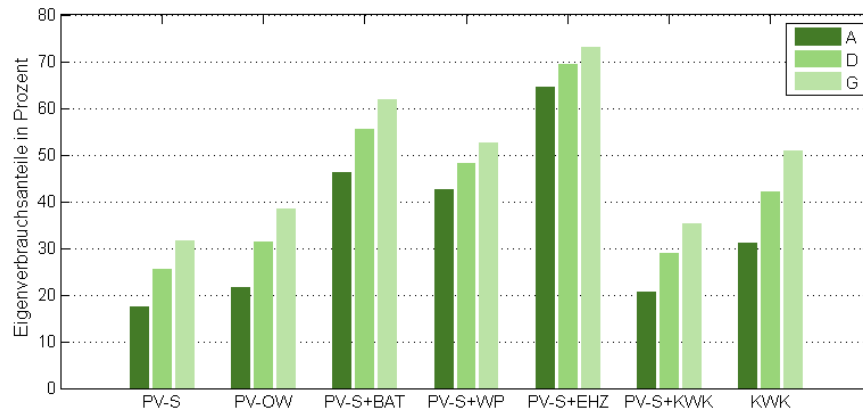


Abb. 3.10: Eigenverbrauchsanteile bei unterschiedlichen Stromeffizienzklassen im 4-Personen-Haushalt für verschiedene Technologieoptionen

Noch deutlicher werden die Unterschiede zwischen den Technologien jedoch in den Autarkiegraden (vgl. Abb. 3.11). Während bei der PV-Anlage auch in Kombination mit Wärmepumpe und KWK nur im einstelligen Prozentpunktbereich ist, ist der Einfluss bei der PV-Anlage mit Batterie am deutlichsten. Hier verringert sich der Autarkiegrad von ca. 65% in Klasse A auf unter 45% in Klasse G. Grund dafür ist, dass durch die Batterie die zeitliche Komponente etwas aufgelöst wird und somit die ganze Höhe des Stromverbrauchs zum Tragen kommt. Bei einer PV-Anlage ohne Batterie hingegen haben die erhöhten oder niedrigeren Stromspitzen am Morgen und Abend keinen direkten Einfluss.

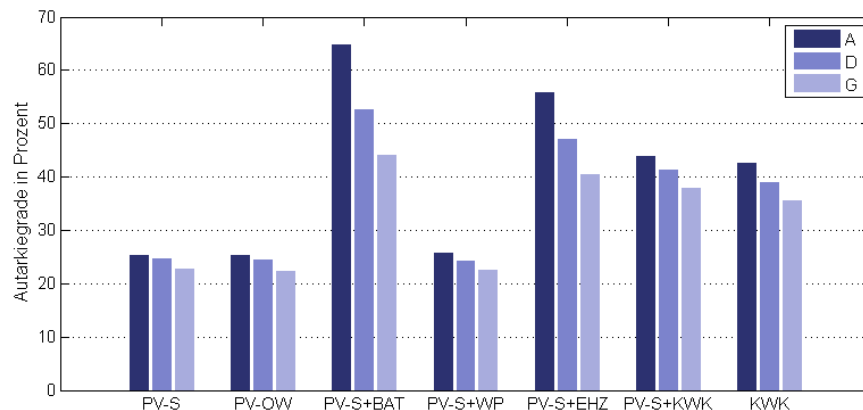


Abb. 3.11: Autarkiegrade bei unterschiedlichen Stromeffizienzklassen im 4-Personen-Haushalt für verschiedene Technologieoptionen

3.4 Relevanz der Hauptstromverbrauchszeiten

Einen wesentlichen Einfluss auf den Verlauf des Stromlastprofils eines Haushalts haben die Anwesenheitszeiten der Personen. In Abb. 3.12 ist dargestellt, wie sich eine Änderung der Abwesenheitszeiten der Haushaltsmitglieder auf den Eigenverbrauchsanteil und den Autarkiegrad eines PV-Prosumer-Haushalts auswirkt.³ Die Abszisse ist in vier Abschnitte unter-

³ Nennleistung PV: 4 kWp

teilt, die sich durch den Zeitpunkt unterscheiden ab dem wochentags niemand mehr zuhause ist. Innerhalb eines Abschnittes verlängert sich die Abwesenheitszeit aller Haushaltsmitglieder von 3,5 auf 9,5 Stunden.

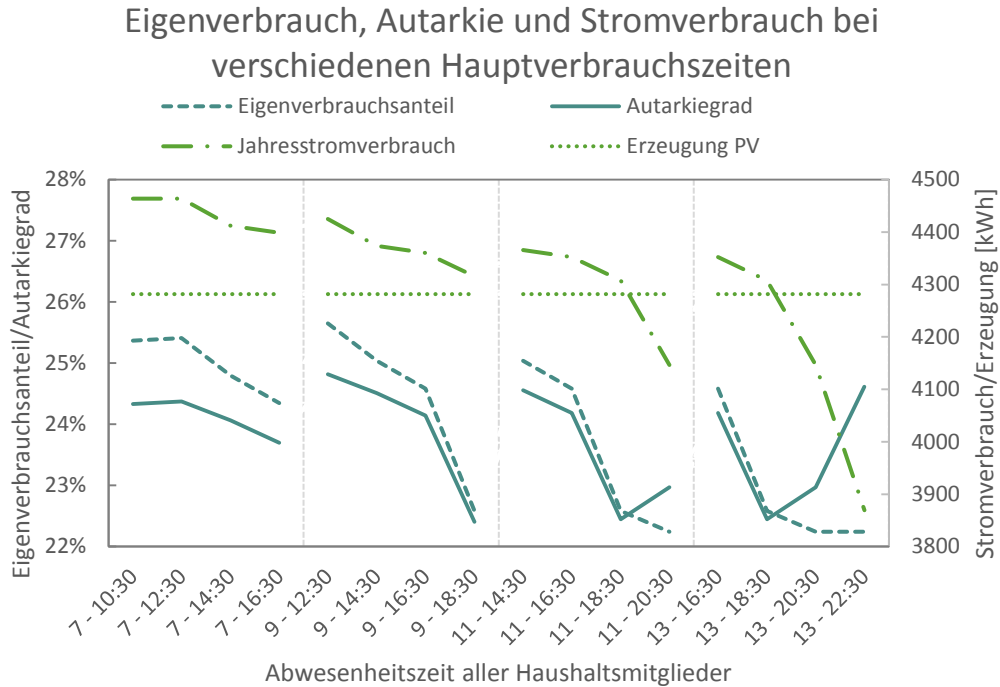


Abb. 3.12: Eigenverbrauch und Autarkiegrad der Prosumer-Technologie PV, 4-Personen-Haushalt, Neubau-Standard

Je weiter die Abwesenheitszeit in den Abend verschoben wird, desto stärker ändern sich auch die Kennzahlen, die in Abb. 3.12 zu sehen sind. Zunächst lohnt sich ein Blick auf den gesamten Stromverbrauch des Haushalts. Dass niemand Strom verbraucht, wenn das Haus leer ist, ist leicht zu erkennen (bspw. durch kürzere oder keine Nutzungszeiten bei Beleuchtung, Unterhaltungsmedien oder Kochen), daher sinkt der Stromverbrauch mit zunehmender Abwesenheitsdauer. Allerdings sinkt der Stromverbrauch auch dann, wenn eher am Abend niemand da ist als am Vormittag. Die dargestellten Kennzahlen korrelieren daher auch unterschiedlich stark mit dem Stromverbrauch (siehe Tab. 3.1).

Tab. 3.1: Korrelation zwischen Stromverbrauch, Eigenverbrauch und Autarkie der Technologieoption PV

PV-Prosumer, Korrelation zwischen:	
Stromverbrauch und Eigenverbrauchsanteil	Stromverbrauch und Autarkiegrad
0,76	0,1

Beim PV-Prosumer ist die Stromerzeugung unabhängig von den Anwesenheitszeiten der Haushaltsmitglieder. Der Eigenverbrauchsanteil nimmt zu, wenn sich die Abwesenheitszeit in den Abend verschiebt und je länger sie dauert – zeigt also ein ähnliches Verhalten wie

der gesamte Haushaltsstromverbrauch, daher ergibt sich ein vergleichsweise hoher Korrelationsfaktor zwischen diesen beiden Kennzahlen. Beim Autarkiegrad zeigt sich ein anderes Verhalten. Tab. 3.1 zeigt, dass der Autarkiegrad nicht mit dem Stromverbrauch korreliert. Das liegt daran, dass der Stromverbrauch im dritten und vierten Abschnitt mit zunehmender Abwesenheitsdauer viel stärker abnimmt als in den ersten beiden Abschnitten, daher steigt auch der Autarkiegrad unter diesen Umständen wieder an.

An dem Schnittpunkt der PV-Stromerzeugung und dem Stromverbrauch ist zu erkennen, bei welchen Abwesenheitszeiten der Eigenverbrauchsanteil sinkt und der Autarkiegrad trotzdem steigt. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich lange Abwesenheitszeiten während die Sonne nicht scheint erwartungsgemäß positiv auf den Autarkiegrad auswirken.

4 Zusammenfassung

Es zeigt sich bei der Simulation der Prosumer-Haushalte deutlich: Prosumer ist nicht gleich Prosumer. Die Technologie und ihre Dimensionierung sowie die Haushaltsgröße mit Verbrauchsverhalten und Stromeffizienzklasse haben einen wesentlichen Einfluss auf Eigenverbrauch, Autarkie und Netzbezug, aber auch auf den charakteristischen Lastverlauf des Haushalts und welchen Beitrag er zur Netzentlastung leisten kann.

Im Projekt wurden verschiedene Möglichkeiten für Prosumer-Haushalte untersucht. Die beiden Varianten zur Stromerzeugung (PV und KWK) lassen sich mit Batterie, Power-To-Heat Optionen (Heizstab oder Wärmepumpe) oder Demand-Side-Management ausstatten. Jede dieser Möglichkeiten hat aus Sicht des Haushalts Vor- und Nachteile. So kann mit den Power-To-Heat Optionen bspw. ein hoher Eigenverbrauch erzielt werden, gleichzeitig steigt jedoch auch der gesamte Strombedarf. Die Batterie bietet hierzu, abhängig von der Größe, die besten Möglichkeiten, ist jedoch derzeit noch nicht wirtschaftlich darstellbar und stark von der Strompreisentwicklung abhängig. Durch ihren durchgängigen Betrieb hingegen kann mit einer KWK-Anlage der Netzbezug deutlich reduziert werden. Die vollständigen Ergebnisse hierzu sind in Kapitel 3.1 zu finden.

Die charakteristischen Lastverläufe der Technologien (vgl. Kapitel 3.2) verdeutlicht die Unterschiede nochmal. Das zeigt zum einen, dass es weder aus Netzbetreiber noch aus Haushaltssicht DEN Prosumer gibt, zum anderen wird deutlich, dass jede Technologie gute Möglichkeiten zum Einsatz hat. Das Potenzial der Netzentlastung ist damit stark abhängig von den übrigen Netzteilnehmern. Mit einem guten Technologiemix innerhalb eines Netzes kann hier jedoch Abhilfe geschaffen werden, ebenso wie mit der Skalierung einiger Technologien bspw. auf Quartiersebene.

Insgesamt wird jedoch die Gestaltung der ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen den Impuls geben, welche Technologien in welcher Kombination die höchste Akzeptanz erfahren. Es zeigt sich aber insbesondere, dass der Haushalt durch sein Verbrauchsverhalten immer einen positiven Beitrag zu seinem Eigenverbrauch und zur Netzentlastung leisten kann.

5 Literaturverzeichnis

- BMUB [Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit] (2014): *Stromspiegel für Deutschland 2014*. http://www.die-stromsparinitiative.de/fileadmin/bilder/Stromspiegel/Brosch%C3%BCre/Stromspiegel2014web_final.pdf (Zugegriffen 26. November 2014).
- BWP (2013): Absatzzahlen 2013: Wärmepumpen-Markt trotz hohen Strompreisen. <http://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/article/absatzzahlen-2013-waermepumpen-markt-trotzt-hohen-strompreisen.html> (Zugegriffen 22. Juni 2015).
- Diefenbach, N., H. Cischinsky, M. Rodenfels und K.-D. Clausnitzer (2010): Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Endbericht_Datenbasis.pdf.
- DIN V 4701-10:2003-08 (2003): Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung. Beuth Verlag. <http://www.beuth.de/de/vornorm/din-v-4701-10/644443135>.
- EnergieAgentur NRW, N. R. W. (2011): Erhebung „Wo im Haushalt bleibt der Strom?“ *Anteile, Verbrauchswerte und Kosten von 12*.
- Gröger, Jens, Dietlinde Quack, Rainer Grießhammer und Marah Gattermann (2013): *TOP 100-Umweltzeichen für klimarelevante Produkte*. Freiburg. <http://www.ecodialog.de/oeko-doc/1739/2013-433-de.pdf> (Zugegriffen 12. Juni 2015).
- Hellwig, Mark (2003): Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile. Technische Universität München. <http://mediatum.ub.tum.de/?id=601557> (Zugegriffen 18. Juni 2015).
- IWU [Institut Wohnen und Umwelt GmbH] (2002): Energetische Kenngrößen für Heizungsanlagen im Bestand. http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/IWU_Anlagenkennwerte_Bestand.pdf (Zugegriffen 27. August 2013).
- Quaschnig, V. (2013): *Regenerative Energiesysteme Technologie - Berechnung - Simulation*. 7. Auflage. München: Hanser Verlag.
- S-Energy (2012): Datasheet SM-255PC8. [http://www.s-energy.co.kr/fcdata/product/SM-255PC8\(0\).pdf](http://www.s-energy.co.kr/fcdata/product/SM-255PC8(0).pdf) (Zugegriffen 7. Juli 2014).
- SMA Solar Technology AG Technische Daten SUNNY MINI CENTRAL 6000TL / 7000TL / 8000TL. http://www.dielichtschmiede.de/produkte/wechselrichter/sma_technologie_ag/smc_6000tl_smc_7000tl_smc_8000tl/datenblatt.
- statista (2015): Urlaubsreisen: Durchschnittliche Reisedauer Deutschland bis 2011 | Statistik. *Statista*. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/246124/umfrage/durschnittliche-reisedauer-deutscher-urlauber/> (Zugegriffen 12. Juni 2015).
- Statistisches Bundesamt (2012): *Laufende Wirtschaftsrechnungen Ausstattung privater Haushalte mit ausgewählten Gebrauchsgütern*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/EinkommenKonsumLebensbedingungen/LfdWirtschaftsrechnungen/AusstattungprivaterHaushalte2150200117004.pdf?__blob=publicationFile.
- Statistisches Bundesamt (2013): Publikation - Einkommen, Konsum, Lebensbedingungen - Wohnverhältnisse privater Haushalte - Statistisches Bundesamt (Destatis). https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/EinkommenKonsumLebensbedingungen/EinkommenVerbrauch/EVS_HausGrundbesitzWohnverhaeltnisHaushalte.html (Zugegriffen 18. Juni 2015).
- TU Darmstadt (2012): Messdaten von Lastprofilen von Haushaltsgeräten. <https://www.tracebase.org/> (Zugegriffen 11. Februar 2014).
- VDI 4655 (2008): Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen. VDI-Richtlinie. VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung.

GESCHÄFTSSTELLE BERLIN

MAIN OFFICE

Potsdamer Straße 105

10785 Berlin

Telefon: + 49 – 30 – 884 594-0

Fax: + 49 – 30 – 882 54 39

BÜRO HEIDELBERG

HEIDELBERG OFFICE

Bergstraße 7

69120 Heidelberg

Telefon: + 49 – 6221 – 649 16-0

Fax: + 49 – 6221 – 270 60

mailbox@ioew.de

www.ioew.de