

ENTWICKLUNG VON AUTARKIE- UND EIGENVERBRAUSCHQUOTEN FÜR INNOVATIVE HAUSHALTE MIT PV-SPEICHERSYSTEMEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON HOCHAUFGELÖSTEN ZEITREIHEN

Hauke Loges, Marcus Bunk, Bernd Engel

TU Braunschweig, Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen - elenia, Schleinitzstr. 23, 38106 Braunschweig, Deutschland, Tel: +49 531 391 9728, Fax: +49 531 391 8106, hauke.loges@tu-braunschweig.de, <https://www.tu-braunschweig.de/elenia>

Kurzfassung: In dieser Forschungsarbeit werden generierte Zeitreihen genutzt, um Aussagen für Netzbetreiber (Autarkiequote) sowie für Betreiber von PV-Speichersystemen (Eigenverbrauchsquote) zu treffen. Für den Anlagenbetreiber sind diese Quoten in erster Linie entscheidend für die Wirtschaftlichkeit seiner Anlage. Der Netzbetreiber kann mit diesen Quoten unter anderem folgende Ziele verfolgen:

- Abfangen der PV-Spitze zur Mittagszeit
- Lastvergleichmäßigung
- Netzausbau vermeiden
- Einbindung der Erneuerbaren Energien in das Netz
- Kosten (der Energiewende) verringern

Unter der Autarkiequote versteht man das Verhältnis von selbst erzeugtem Strom zum gesamten Jahreshaushaltsverbrauch. Diese Quote gibt Auskunft darüber, welcher Anteil des Jahreshaushaltsverbrauchs mit dem eigenen PV-Strom gedeckt werden kann. Die Eigenverbrauchsquote definiert hingegen das Verhältnis aus selbst verbrauchtem PV-Strom zum gesamt erzeugten PV-Strom, gibt also Auskunft darüber, wie viel vom erzeugten PV-Strom im eigenen Haushalt selbst verbraucht wird.

Keywords: Autarkiequote, Eigenverbrauchsquote, Speicher, Profile

1 Entwicklung von zeitabhängigen Last- und Erzeugungsannahmen

Um ein konventionelles Haushaltsprofil abbilden zu können, müssen viele unterschiedliche Haushaltsverbraucher simuliert werden. Zu den wesentlichen Haushaltsverbrauchern zählen: Kühl- und Gefrierschrank, Durchlauferhitzer, Herd/Backofen, TV/Audio, Licht, Computer/Büro, Waschmaschine, Trocknen sowie Spülmaschine. Abhängig von der Größe des Haushalts sowie der technischen Ausstattung kann mit Hilfe der am elenia entwickelten modularen Simulation ein solches konventionelles Haushaltsprofil in 1-minütiger Auflösung generiert werden. Optional kann dieses Profil mit Zeitreihen der Komponenten Wärmepumpen, Elektrofahrzeug und Photovoltaik ergänzt werden. Hierfür wurden ebenfalls entsprechende Tools entwickelt.

1.1 Konventionelle Verbraucher im Haushalt

Als Basis für die Simulation der Zeitreihen für konventionelle Verbraucher im Haushalt dient eine Datenerhebung der Energieagentur NRW, die die Anteile, Verbrauchswerte und Kosten von unterschiedlichen Verbrauchsbereichen in 1-6 Personenhaushalten erfasst [1]. Ergänzt wird diese Datenerhebung um die Projektergebnisse der Erhebung des RWI zum privaten Energieverbrauch der Haushalte [2].

Die Energieagentur NRW kommt in der Erhebung zu dem Schluss, dass sechs Bereiche für ca. 2/3 des Stromverbrauchs verantwortlich sind. Die größten Stromverbraucher sind demnach das Büro, TV/Audio, Warmwasser, Kühlen, Licht und Kochen. Die verbleibenden Bereiche sind dagegen relativ unbedeutend.

Weiterhin kann für unterschiedliche Haushaltsgrößen eine Unterscheidung in der Ausstattung von Elektrogeräten vorgenommen werden. Besitzen 1-Personenhaushalte im Schnitt 1,1 Kühlschränke, so steigt diese Anzahl bereits auf 2 Geräte bei Haushalten mit mehr als 4 Mitgliedern. Eine ähnliche Beobachtung kann für Spülmaschinen gemacht werden. Besitzt nur etwas mehr als jeder zweite 1-Personenhaushalt einen Geschirrspüler, so liegt die Zahl bei Haushalten mit mehr als 4-Personen bereits bei einem Gerät pro Haushalt. Bei Wäschetrockner kann qualitativ die gleiche Aussage getroffen werden. Eine andere Beobachtung kann für die Ausstattung mit Unterhaltungselektronik gemacht werden. Bereits 1-Personenhaushalte verfügen im Schnitt über 1,3 Fernseher und 1,4 Computer. Diese Zahl steigert sich bei 4-Personenhaushalten bereits auf 2,2 Fernsehgeräte bzw. 2,86 Computer. Die nachfolgende Tabelle gibt einen detaillierten Überblick über den Ausstattungsgrad mit Elektrogeräten.

Ausstattung mit Elektrogeräten (pro 100 Haushalte)

	1	2	3	4	>4
Kühl- und Gefrierkombinationen	110	141	135	147	192
Gefrierschrank/ -truhe	30	67	70	75	87
Mikrowelle	71	76	88	82	88
Spülmaschine	58	83	88	96	98
Waschmaschine	88	95	100	98	100
Wäschetrockner	27	48	61	79	79
Fernseher	129	170	197	210	223
Computer	141	166	208	255	286
DVD	132	126	168	168	174

Tabelle 1: Ausstattung mit Elektrogeräten [2]

Kombiniert man die bisher vorgestellten Ergebnisse, so gelangt man zu der Darstellung des spezifischen Verbrauchs nach der folgenden Tabelle:

Rang	Bereich	1	2	3	4	5	6
1	Warmwasser	705	1.069	1.427	1.757	2.094	2.459
2	Computer/Büro	271	256	263	250	247	283
3	TV/Audio	232	247	288	289	300	376
4	Kühlen	311	278	319	309	245	273
5	Licht	267	290	354	455	554	622
6	Kochen	184	342	403	479	523	568
7	Diverses	201	226	328	399	651	629

8	Trocknen	66	150	275	395	503	577
9	Waschen	116	146	206	268	319	402
10	Spülen	106	165	251	312	361	416
11	Gefrieren	177	198	259	302	321	376
Summe		2.635	3.366	4.372	5.216	6.117	6.980

Tabelle 2: Spezifischer Energieverbrauch pro Gerät (mit elektrischer Warmwasserbereitung) [1] [2]

1.2 Zeitreihen für Photovoltaikanlagen

Für die Berechnung und Entwicklung von Zeitreihen für Photovoltaikanlagen wird eine fest installierte Photovoltaikanlage mit definiertem Aufstellwinkel γ_A und Azimut-Winkel α_A vorausgesetzt. Zur Berechnung der einfallenden Strahlung auf eine solche Photovoltaikanlage ist vor allem die Kenntnis über den genauen Sonnenstand wichtig. Dieser hängt wiederum von der Tageszahl n (1. Januar = 1), der exakten Uhrzeit und der geografischen Position nach Längen- und Breitengrad, λ_B und φ ab. Ist der Sonnenstand durch die zwei Winkel Sonnenhöhe (Elevation) γ_s und Sonnenazimut α_s bekannt, so können für jeden Tag des Jahres sogenannte Sonnenbahndiagramme entworfen werden. Anhand der Sonnenbahndiagramme und den direkten und diffusen Strahlungswerten für die Horizontale kann nun über trigonometrische Beziehungen die Einstrahlung auf beliebig orientierte und geneigte Flächen berechnet werden [3].

Die beschriebenen theoretischen Annahmen finden Eingang in das Simulationstool. Mit dem Tool können nun beliebige Anlagentypen simuliert werden. Neben dem Breiten- und Längengrad können die Ausrichtung (Azimut) sowie Neigung der Anlage berücksichtigt werden. Darüber hinaus kann die Anlagengröße und der Wirkungsgrad über die Eingabemaske vorgegeben werden. Weiterhin berücksichtigt das Tool eine einfache Temperaturabhängigkeit der Module. Bei starker Erwärmung der Module (bis 70°C) treten Wirkungsgradverluste von ca. 0,45 % pro Kelvin im Vergleich zu den Standardtestbedingungen auf [4]. Als Datenbasis finden erfasste Messwerte der elenia-Wetterstation Eingang (Strahlungsdaten und Temperatur). In Abbildung 1 ist jeweils ein simuliertes Tagesprofil für eine PV-Anlage und für ein Haushaltsprofil abgebildet, das durch die oben beschriebenen Profil-Generatoren erzeugt werden kann.

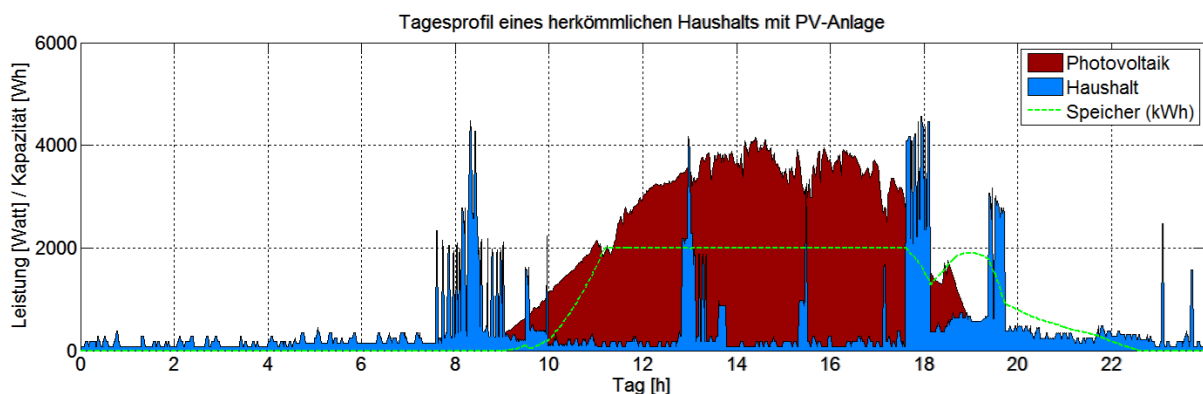


Abbildung 1: Simuliertes Tagesprofil eines herkömmlichen Haushalts mit einer PV-Anlage

1.3 Zeitreihen für Wärmepumpenanlagen

Das Simulationstool zur Generierung von Lastprofilen für Wärmepumpenanlagen benötigt als Vorgabe ein Jahres-Temperaturprofil und einen dazugehörigen Tagesmittelwert. Für die Simulation wird auf Temperaturdaten des Standortes Braunschweig-Völkenrode des Jahres 2011 zurückgegriffen, die von Netzbetreiber E.ON Avacon AG für unterbrechbare Verbrauchseinrichtungen veröffentlicht werden [5].

Neben der Vorgabe eines Temperaturprofils kann im Anschluss über eine Eingabemaske die Fläche des Wohnhauses angegeben werden. Die Wohnfläche kann dabei beliebige Werte im Intervall von [50 m² - 350 m²] annehmen. Das Tool wertet die Eingabe aus und ordnet eine Referenzanlage zu. Nach Zuordnung einer Referenzanlage wird im nächsten Schritt eine exponentielle Verbrauchskurve für die entsprechende Anlage erzeugt. Mit steigender Temperatur fällt der Verbrauch der Wärmepumpe exponentiell ab.

Nach erfolgreicher Simulation eines Jahresprofils wird die ursprünglich gewählte Schrittweite von 5 Minuten-Werten in die für weitere Untersuchungen geplante Schrittweite von 1-Minuten-Werten konvertiert. Abschließend erfolgt ein Sicherung des Jahresprofils in Dateiformat von Microsoft Excel©.

Der Simulationsalgorithmus wählt Schrittweiten bei der Modulierung von 5 Minuten, die auf die Taktfrequenz der Wärmepumpe zurückzuführen ist. Häufige Verdichterstarts führen zu einer verkürzten Lebensdauer der Anlage. Aus diesem Grunde wird ein Verdichterstart nur zugelassen, wenn die Einschaltdauer mindestens 5-Minuten beträgt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen synthetische Lastprofile für eine Temperatur von 25°C (Sommertag) bzw. -15°C (Wintertag).

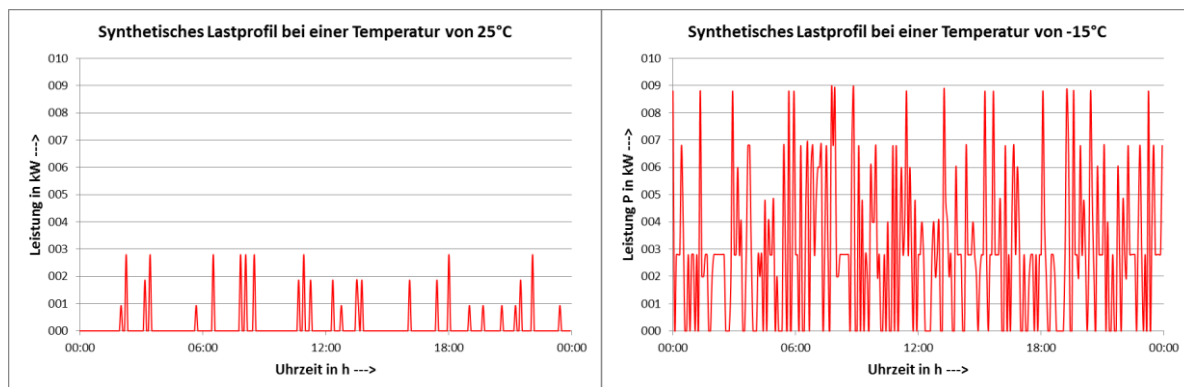


Abbildung 2: Synthetische Lastprofile einer Wärmepumpe bei unterschiedlichen Temperaturen

2 Autarkie- und Eigenverbrauchsquoten unter Einbezug eines PV-Speichersystems

Unter der Autarkiequote (AQ) versteht man das Verhältnis von selbst erzeugtem Strom zum gesamten Jahreshaushaltsverbrauch. Diese Quote gibt Auskunft, welcher Anteil des Jahreshaushaltsverbrauchs mit dem eigenen PV-Strom gedeckt werden kann (= Unabhängigkeit vom Strombezugstarif). Die Eigenverbrauchsquote (AQ) definiert hingegen das Verhältnis aus selbst verbrauchtem PV-Strom zum gesamt erzeugten PV-Strom, gibt also Auskunft, wie viel vom erzeugten PV-Strom im eigenen Haushalt selbst verbraucht wird (=Unabhängigkeit vom Stromeinspeisetarif).

Der Anlagenbetreiber kann mit diesen Quoten maßgeblich die Wirtschaftlichkeit seiner Anlage beeinflussen. Aus dem Netz bezogener Strom ist in Deutschland mittlerweile deutlich teurer als die garantierte Einspeisevergütung nach EEG. Der Anlagenbetreiber ist somit zumeist bestrebt einen möglichst hohen Teil des PV-Strom selbst zu verbrauchen, womit er seine AQ und EQ deutlich erhöht. Eine Möglichkeit dies ohne aktive Verhaltensänderung umzusetzen ergibt sich mit der Installation eines PV-Speichers. Bei einer netzdienlichen Betriebsweise (z.B. gemäß KfW [6]) des Speichers ergeben sich auch für den Netzbetreiber durchaus Vorteile, denn Ziel eines netzdienlichen Betriebs ist es unter anderem Einspeisespitzen zu reduzieren und somit Netzausbau zu vermeiden.

Für die Bestimmung der Autarkiequoten wurde ein Tool entwickelt. Die Umsetzung erfolge in MATLAB/SIMULINK. Die in Kapitel 1 beschriebenen Zeitreihen finden Eingang in diesem Tool, dieses nutzt die 1-minütigen Profile des Haushalts- und des PV-Generators um eine Jahresautarkie- sowie die Jahreseigenverbrauchsquote zu ermitteln. Optional kann das Haushaltsprofil mit dem Profil eines Elektrofahrzeugs ergänzt werden. Das Tool kombiniert PV-Profile mit einer installierten Leistung von 1 kWp bis 10 kWp unter Berücksichtigung von Speichern mit einer Kapazität zwischen 0 kWh und 10 kWh.

Die folgenden Ergebnisse dieser Forschungsarbeit stellen gemittelte Werte dar, die auf 20 unterschiedliche Haushaltsprofile basieren. Die dargestellten Ergebnisse wurden unter folgenden Randbedingungen ermittelt:

- Jahreshaushaltsverbrauch: ca. 4.500 kWh
- PV-Erzeugung pro kWp: ca. 850 kWh
- Jahresverbrauch eKfz: ca. 2.700 kWh (Fahrleistung ca. 15.000 km/a)

2.1 Autarkie- und Eigenverbrauchsquoten bei herkömmlichen Haushalten

In diesem Unterkapitel werden zunächst die AQ und die EQ für herkömmliche Haushalte dargestellt. In der Abbildung 3 wird zunächst ein Beispiel dargestellt wie die AQ ermittelt wird.

Tagesprofil eines herkömmlichen Haushalts

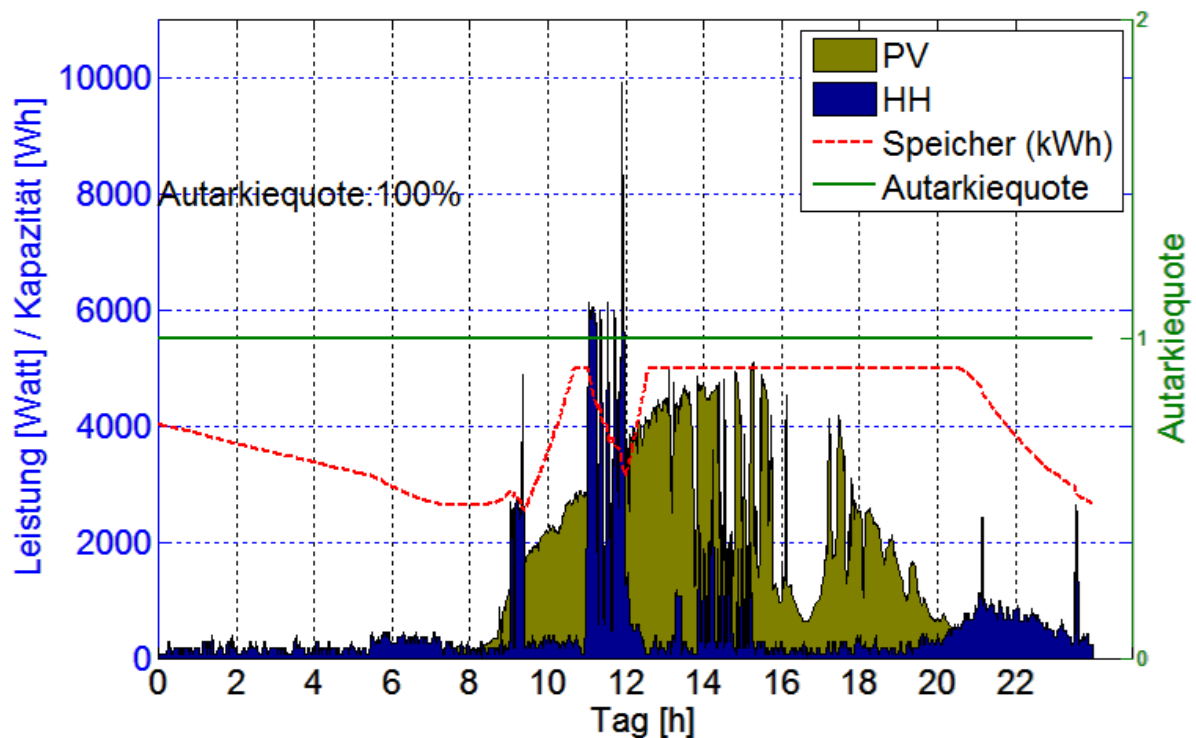


Abbildung 3: Last und Erzeugung eines herkömmlichen Haushalts

In blau aufgetragen ist das Haushaltsprofil (Bezugsachse: links [W]). Typisch für das Profil ist der kammartige Verlauf, eine erhöhte Grundlast am Abend sowie über den Tag verteilte Leistungspeaks durch diverse Haushaltsverbraucher. Beim grünen PV-Profil (Bezugsachse: links [W]) ist zunächst ein konstanter Anstieg der Leistung erkennbar bevor es zu starken Leistungseinbrüchen durch auftretende Bewölkung kommt. Die waagerechte grüne Linie (Bezugsachse: rechts) gibt Auskunft über die aktuelle AQ zu jeder Minute des Tages. Die AQ ergibt sich, wie eingangs beschrieben, aus dem Verhältnis von verbrauchtem PV-Strom zum Haushaltsverbrauch. Die AQ beträgt also immer genau dann 100 %, wenn die PV-Erzeugung \geq Haushaltslast ist. In der Grafik ist erkennbar, dass dieses nicht immer der Fall ist, z.B. nachts oder gegen 12.00 Uhr. Dennoch wird für den Tag eine AQ von 100% ausgegeben, da in diesem Beispiel eine Batterie mit einer Kapazität von 5 kWh berücksichtigt wurde. Der aktuelle Speicherfüllstand (Bezugsachse: links [Wh]) ist an der roten gestrichelten Linie erkennbar. Der Speicher entlädt sich sobald die Haushaltslast $>$ PV-Erzeugung ist. Mit der Kombination von PV- Erzeugung und Speicher kann in diesem Beispiel der gesamte Tagesbedarf gedeckt werden.

In der folgenden Abbildung ist das Ergebnis der oben beschriebenen Simulation dargestellt. Ein Elektroauto wurde in dieser Darstellung zunächst nicht berücksichtigt. Das Ergebnis gibt die Jahresautarkiequote wieder. Beispiel: 50% Autarkiequote bedeutet, dass 50 % des Jahreshaushaltsverbrauchs durch selbst erzeugten PV-Strom gedeckt werden kann.

Autarkiequote für herkömmliche Haushalte

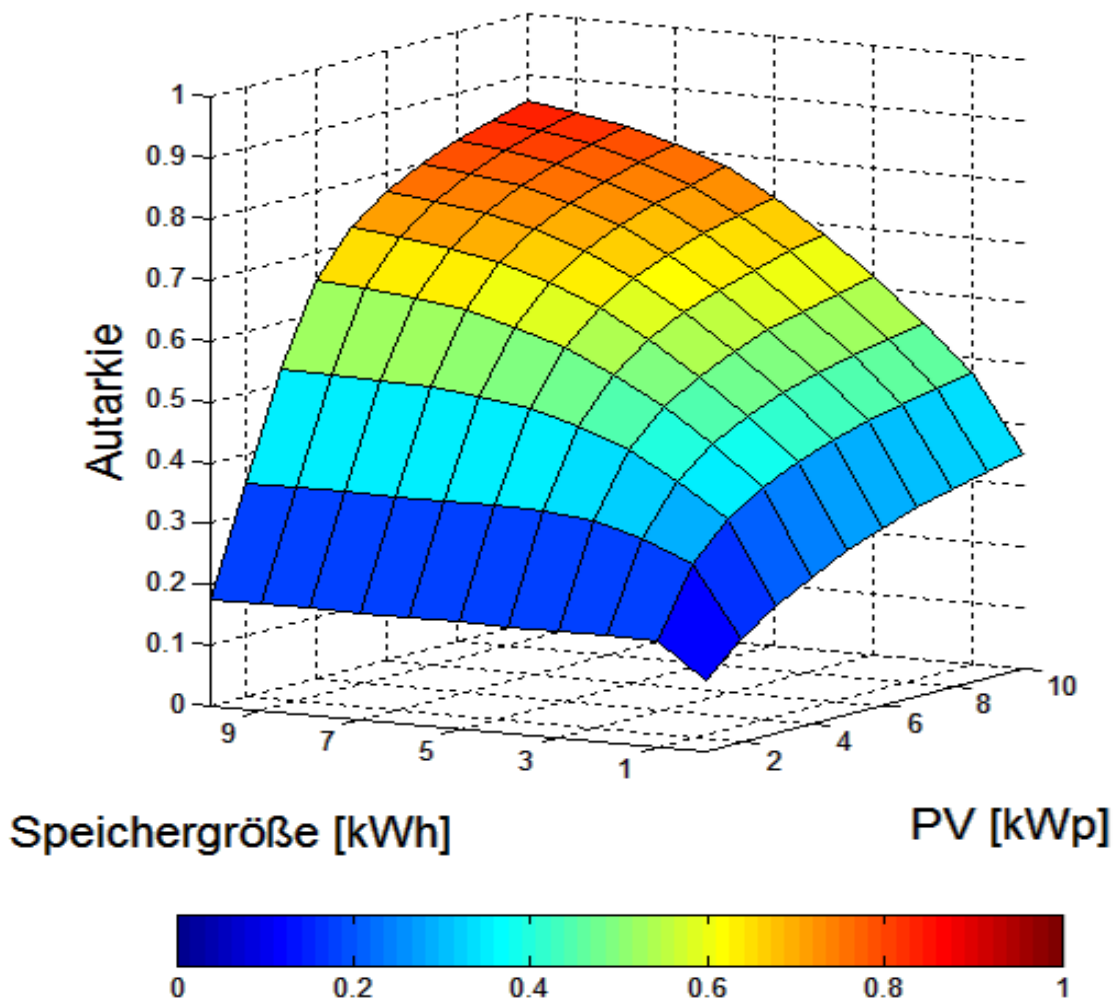


Abbildung 4: Autarkiequote für herkömmliche Haushalte

Die Abbildung zeigt die AQ in Kombination unterschiedlicher PV-Anlagen mit unterschiedlichen Speichergrößen. Ohne Speicher lassen sich AQ zwischen ca. 10% (1 kWp) und ca. 35% (10 kWp) erreichen. Grundsätzlich lässt sich erkennen, dass die AQ mit zunehmender PV-Anlagengröße und mit zunehmender Speicherkapazität steigt. Die maximale AQ lässt sich folglich mit einer Kombination von einer 10 kWp und einen Speicher mit der Kapazität von 10 kWh erreichen und beträgt ca. 85 %. Ein Verhältnis zwischen Anlagengröße und Speicherkapazität von 1:1 ist in der Praxis aus wirtschaftlichen Gründen derzeit eher nicht denkbar. Weiterführende wissenschaftliche Arbeiten werden sich zukünftig mit dieser Thematik näher befassen.

Die nachfolgende Abbildung stellt analog der vorherigen Darstellung die Jahreseigenverbrauchsquote dar. Beispiel: 50 % Eigenverbrauchsquote bedeutet, dass 50 % des erzeugten PV-Stroms im eigenen Haushalt verbraucht wird.

Eigenverbrauchsquote für herkömmliche Haushalte

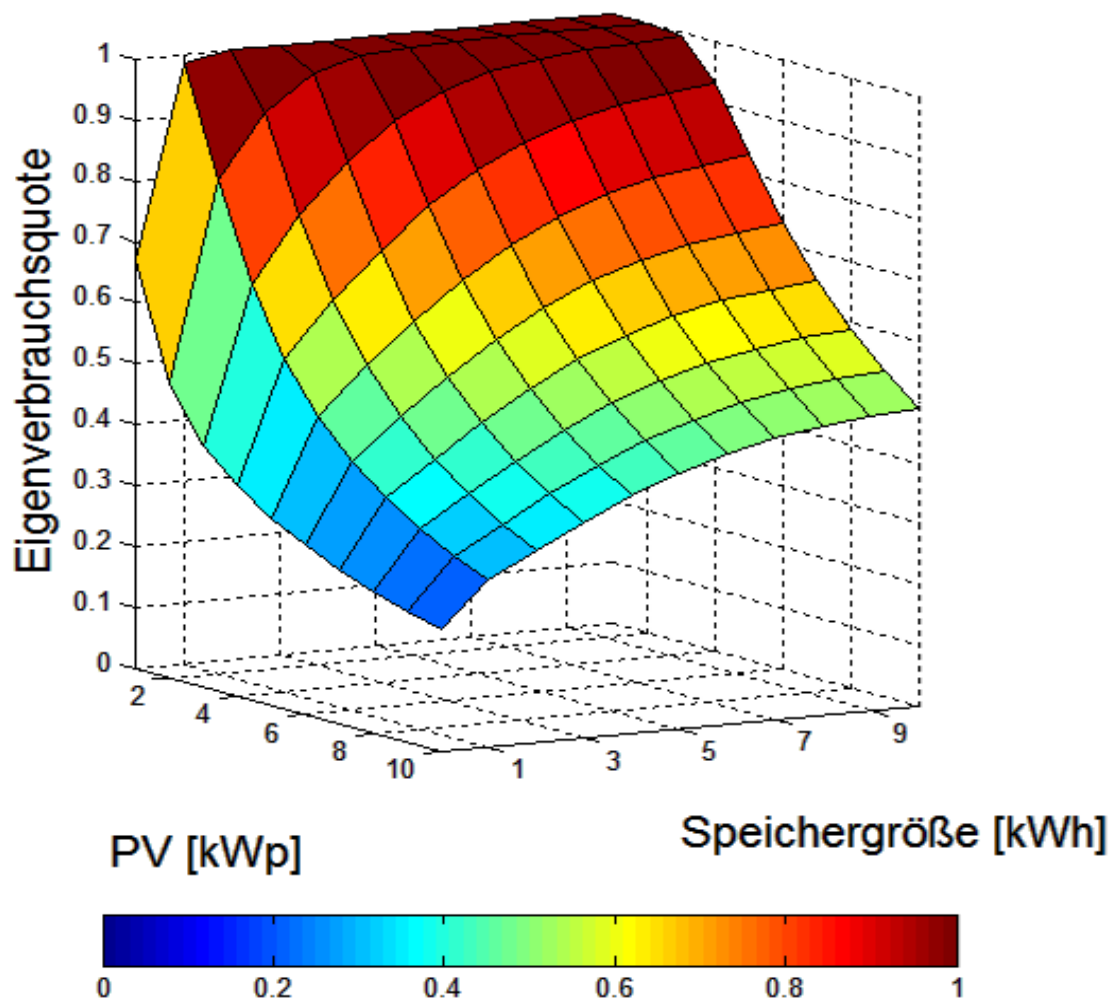


Abbildung 5: Eigenverbrauchsquote für herkömmliche Haushalte

Die Abbildung zeigt die Jahreseigenverbrauchsquote in Abhängigkeit der Speichergröße und der Anlagengröße. Analog zur AQ steigt die EQ mit steigender Speichergröße, sinkt aber mit steigender PV-Anlagengröße. Ohne Speicher können EQ zwischen ca. 20 % (10 kWp) und ca. 65 % (1 kWp) erreicht werden. Mit Speicher lässt sich diese EQ bereits bei relativ geringer Kapazität auf bis zu 100% erhöhen (z.B. 1 kWp, 2 kWh). Bei einem PV-Speichersystem mit einer 10 kWp Anlage und einer Batteriekapazität von 10 kWh (vgl. oben) ergibt sich hier eine EQ von 50 %.

2.2 Autarkie- und Eigenverbrauchsquoten bei Haushalten mit Elektrofahrzeugen

In diesem Abschnitt wird der zuvor beschriebene Haushalt mit einem Elektroauto ergänzt. Das Elektroauto wird ausschließlich mit einer Leistung von 3,68 kW am Hausanschluß geladen. Die beschriebene Erweiterung ist in der Abbildung 6 dargestellt.

Tagesprofil eines Haushalts mit Elektroauto

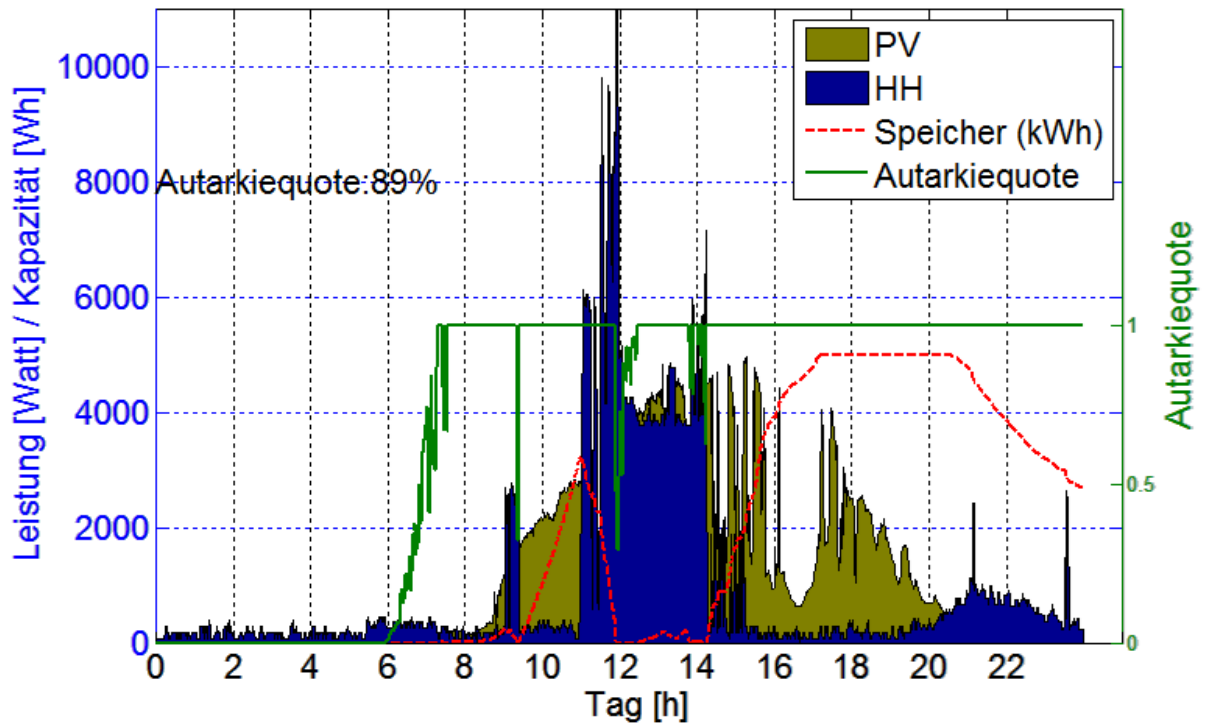


Abbildung 6: Last und Erzeugung eines Haushalts mit Elektroauto

Die oben bereits erläuterte Abbildung ist in diesem Beispiel mit dem Ladevorgang eines Elektrofahrzeugs (zwischen 11:00 und 14:00) ergänzt. Die AQ reduziert sich an diesem Tag um 11 % auf 89 %. Grund hierfür ist einerseits der leere Speicher am Tagesanfang, der hier bereits am Vortag für die Ladung des Elektroautos genutzt wurde und der zusätzliche Verbrauch, der durch das Elektroauto verursacht wird.

Die nachfolgende Grafik zeigt die Übersicht der AQ bei der unterschiedlichen Kombination von PV-Anlagen und Batteriespeicher für ein Haushaltsprofil mit Elektrofahrzeug.

Autarkiequote für Haushalte mit Elektrofahrzeug

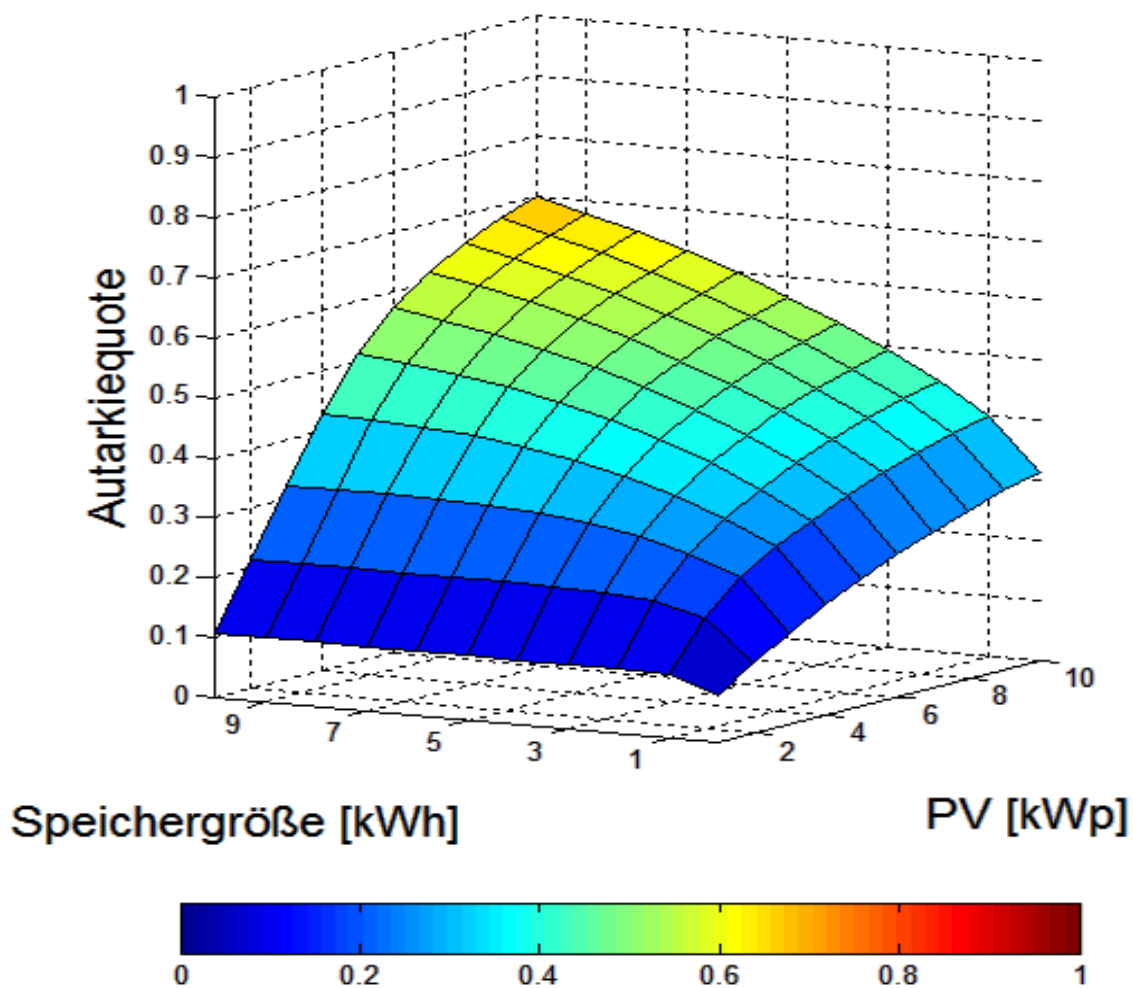


Abbildung 7: Autarkiequote für Haushalte mit Elektrofahrzeug

Bei der nun betrachteten Variante mit Elektrofahrzeug ergeben sich ohne Speicher AQ zwischen ca. 7 % (1 kWp) und bis zu ca. 30 % (10 kWp). Mit Einsatz eines Speichers lässt sich dieser Wert auf bis zu 70 % steigern. Im Vergleich zur obigen dargestellten Variante verringert sich die maximale AQ also um ca. 15 %.

Abschließend folgt die Grafik zur Eigenverbrauchsquote der Haushalte mit Elektrofahrzeug.

Eigenverbrauchsquote für Haushalte mit Elektrofahrzeug

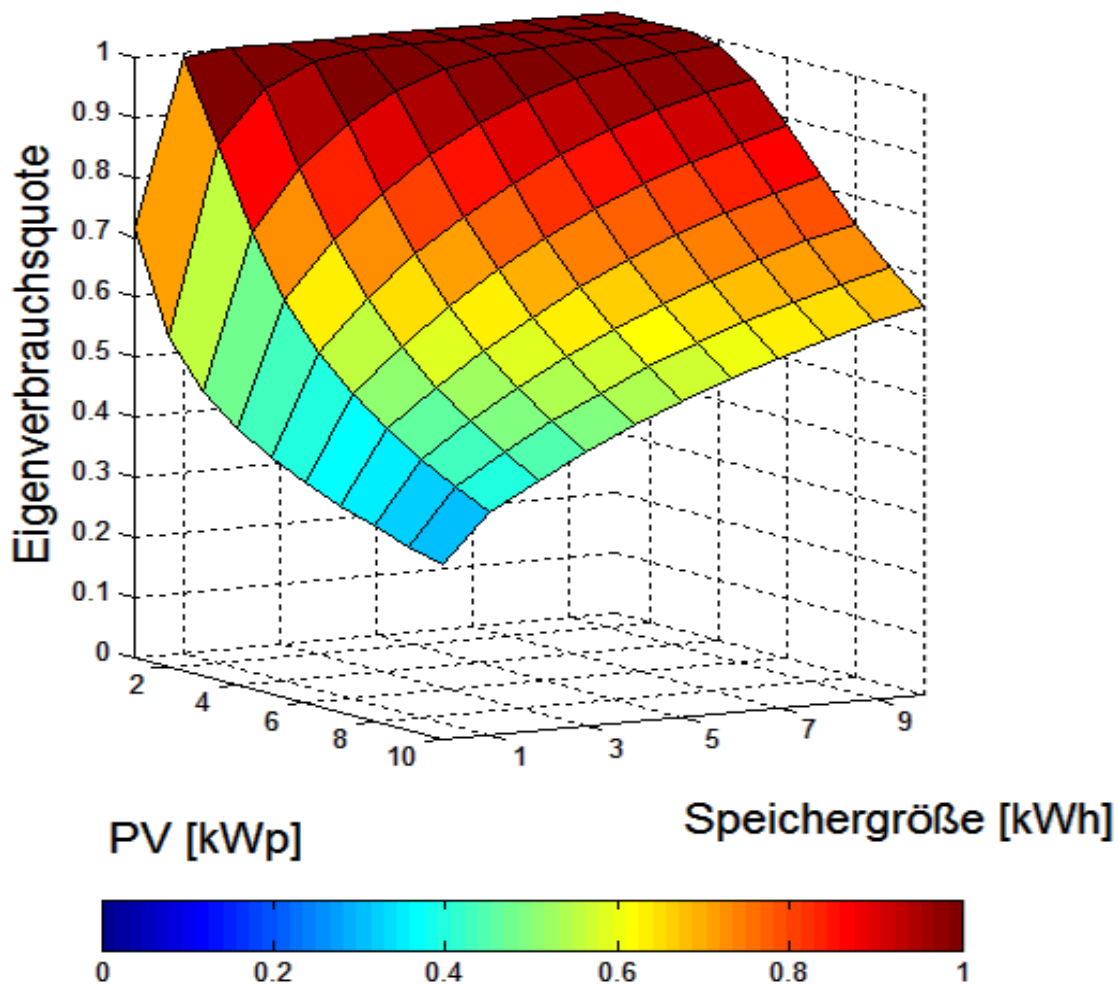


Abbildung 8: Eigenverbrauchsquote für Haushalte mit Elektrofahrzeug

Die maximale Eigenverbrauchsquote ohne Speicher liegt bei ca. 70 % und minimal bei ca. 30 %. Mit Speicher lässt sich die EQ ebenfalls auf bis zu 100 % erhöhen. Bei einer Anlage mit 10 kWp und Speicherkapazität von 10 kWh liegt die EQ bei ca. 65 % (+15 % im Vergleich zu herkömmlichen Haushalten).

3 Fazit und Ausblick

Durch Einsatz von PV-Speichersystemen lässt sich die Autarkie- und die Eigenverbrauchsquote signifikant steigern. Weiterhin führen die Nutzung und vor allem das Laden von Elektrofahrzeugen am Hausanschluss zu einer sinkender Autarkiequoten und einer steigenden Eigenverbrauchsquote.

Weitergehend soll der netzdienliche Speichereinsatz gemäß KfW-Marktanreizprogramm untersucht werden [6]. Insbesondere liegt das Augenmerk hier auf mögliche Änderungen der AQ bzw. der EQ, auf Verluste, die durch Abregelung der Anlage entstehen sowie die Minimierung dieser Verluste

Die vorgestellte Forschungsarbeit wird im Rahmen des „ehome Energieprojektes 2020“ (<http://www.ehomeprojekt.de/>) durch die Avacon AG gefördert. Für die freundliche Unterstützung möchten wir uns recht herzlich bedanken.

Literatur:

- [1] **Energieagentur NRW (2011):** Erhebung: „Wo im Haushalt bleibt der Strom?“
Online verfügbar unter: <http://www.energieagentur.nrw.de>
- [2] **RWI, forsa (2011):** Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2006-2008. Forschungsprojekt Nr. 54/09 des BMWi).
- [3] **Quaschnig (1998).** Regeneratives Energiesystem. München, Wien.
- [4] **TEC-Institut (2013).** Temperatur- und Leistungsverhalten von monokristallinen PV-Modulen mit komplett schwarzer Oberfläche.
Online verfügbar unter: <http://www.tec-institut.de/testberichte.html>
- [5] **E.ON Avacon (2011).** Online verfügbar unter: <http://www.eon-avacon.com/cms/Default.aspx?id=6021&ch=9&n=75d4803e9eef4f9799415ca4e7850984>
- [6] **Kreditanstalt für Wiederaufbau (2014).** Online verfügbar unter:
[https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-%E2%80%93-Speicher-\(275\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-%E2%80%93-Speicher-(275)/)