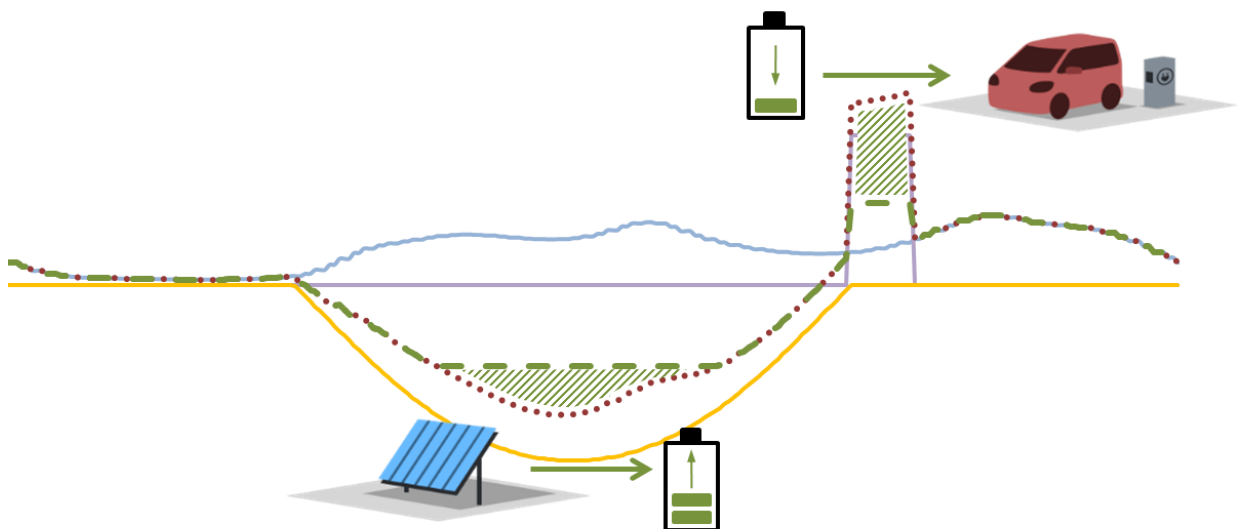




## KURZSTUDIE: KÖNNEN PV-SPEICHERSYSTEME DIE NETZINTEGRATION DER ELEKTROMOBILITÄT UNTERSTÜTZEN?



Autoren: Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel  
Dipl.-Ing. Jonas Wussow

Braunschweig, 01.02.2019

## Kurzfassung

Im Rahmen dieser Kurzstudie wurden anhand eines **repräsentativen, beispielhaften, vorstädtischen Niederspannungsnetzes** diverse Ansätze zur Erhöhung der Anzahl möglicher Ladepunkte untersucht.

Auf Basis der Untersuchungen ergaben sich folgende Erkenntnisse:

- Niederspannungsnetze haben bereits im heutigen Ausbaustadium die **Kapazität** für **eine größere Anzahl** an heimische **Lademöglichkeiten** (etwa 45 % aller Haushalte können 11 kW-Wallboxen haben).
- Private **Photovoltaikanlagen** können in Kombination mit **Solarstromspeichern** schon im Rahmen der aktuellen Rechtslage die Kapazitäten der Niederspannungsnetze um etwa **ein Drittel erweitern**.
- Damit leistet die **Photovoltaik** einen **wichtigen Beitrag zur Netzintegration der Elektromobilität** und hilft, den langfristig nötigen, teuren **Netzausbau** zu **vermindern**.
- Würde der Gesetzgeber die **Mehrfachnutzung** der **Heimspeicher** fördern und damit die Ladung aus dem Netz ermöglichen, könnte die **Netzkapazität** für heimische **Ladepunkte** mehr als **verdoppelt** werden. Damit würde eine **Volldurchdringung** mit Ladepunkten möglich.

## Inhaltsverzeichnis

<b>2</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Ausgangssituation.....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Integration Wallboxen.....</b>	<b>7</b>
4.1	Statische Betrachtung .....	7
4.2	Quasi-dynamische Betrachtung .....	8
<b>5</b>	<b>Nutzung von PV-Speichersystemen.....</b>	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>Ladung des Speichers aus dem Netz (Mehrfachnutzung).....</b>	<b>14</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>15</b>
<b>8</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>17</b>
<b>9</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>18</b>
<b>10</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis / Glossar.....</b>	<b>19</b>
<b>11</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>19</b>
<b>12</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>19</b>

## 2 Einleitung

Die Umweltvorgaben für die Autoindustrie werden global verschärft, um den Ausstoß von Treibhausgasen zu reduzieren. Die Hersteller reagieren darauf mit dem Ausbau von emissionsfreien Fahrzeugen, vor allem der Elektromobilität. Die meisten deutschen Automobilbauer planen bis 2025 einen Anteil der elektrischen Fahrzeuge an Neuzulassungen von 25 %. Daher kann von einer starken Zunahme an Elektrofahrzeugen in den kommenden Jahren ausgegangen werden [MAN16].

Parallel zu einem Hochlauf der Fahrzeugzahlen wird auch die Anzahl der Ladepunkte in den nächsten Jahren steigen. Viele dieser Ladepunkte (85%) befinden sich derzeit auf privaten Gebieten wie der heimischen Garage oder dem Parkplatz des Arbeitgebers. [NEE15]

Gleichzeitig entsteht in der Öffentlichkeit und bei einigen Netzbetreibern die Frage, ob die Niederspannungsnetze den neuen Herausforderungen durch die Elektromobilität gewachsen sind [BRA18]. Es wurde sogar schon von einer Blackout-Gefahr durch Elektroautos geschrieben [HAN18].

Diese Kurzstudie soll die Herausforderungen der Netzintegration von Elektrofahrzeugen in Niederspannungsnetzen beschreiben und stellt Ansätze zur besseren Netzintegration vor. Das Augenmerk liegt auf dem Einfluss von kleinen Photovoltaikanlagen in Kombination mit Stromspeichern, hier als PV-Speichersystem bezeichnet. Durch weitere Strategien wie intelligentes Lademanagement (Smart Charging) lässt sich die Kapazität des Niederspannungsnetzes zusätzlich effizienter ausnutzen.

### 3 Ausgangssituation

Die Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Durchdringung von Elektrofahrzeugen wurden anhand eines allgemeingültigen Vorstadtnetzes durchgeführt (siehe **Abbildung 1**). Bei den Untersuchungen wurde das Netz in zwei Bereich aufgeteilt:

- 1) **Kritischer Strang:** Dieser Bereich besteht aus einem Strang mit 32 Haushalten und einer Gesamtlänge von knapp 350 m. Aufgrund der Lastdichte und der Länge wird hier vom größten Einfluss auf das Spannungsverhalten ausgegangen. Die Haushalte werden bei den Simulationen einzeln berücksichtigt.
- 2) **Restnetz:** Das restliche Netz, bestehend aus 114 Haushalten in neun Strängen, wird zusammengefasst betrachtet. Das Restnetz hat zwar einen entsprechen Einfluss auf die Spannung. Da es jedoch nicht erforderlich ist, eine detaillierte Untersuchung dieser Stränge vorzunehmen, wird darauf hier verzichtet.

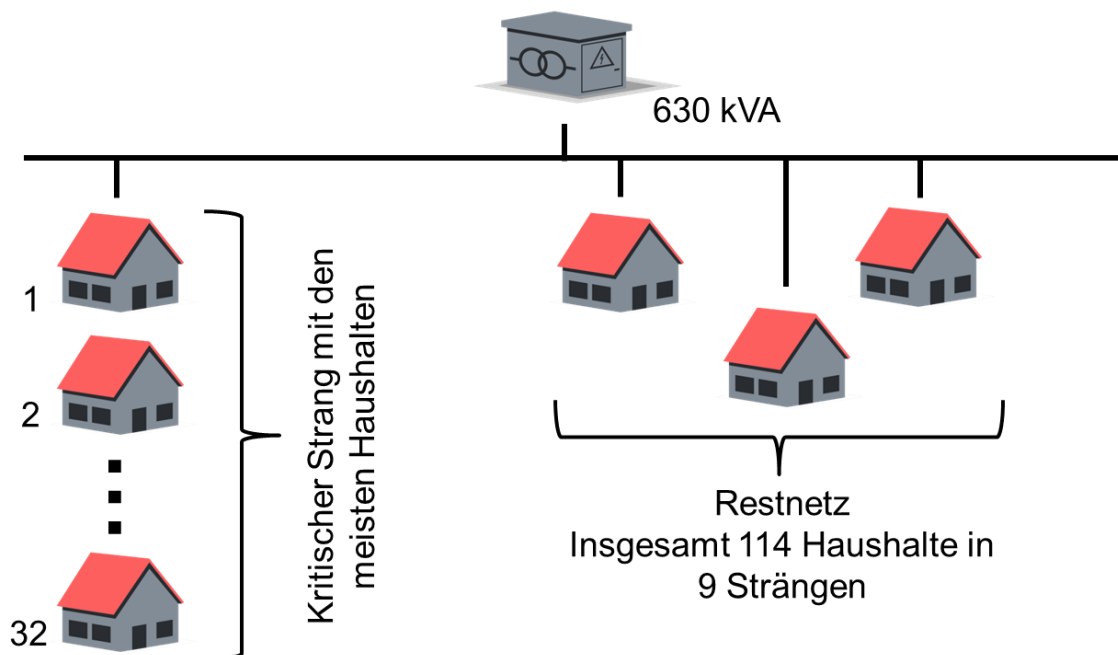


Abbildung 1: Untersuchtetes Netz [KER11]

Die Netzsimulationen erfolgten mit dem Simulationsprogramm DigSILENT PowerFactory, einer weltweit führenden, integrierten Netzberechnungssoftware. Gemäß den aktuellen Normen für das öffentliche Elektrizitätsversorgungsnetz sind Spannungsabweichungen von  $\pm 10\%$  erlaubt [DIN11]. Diese Abweichungen entstehen im Mittelspannungs-, Niederspannungsnetz sowie in den Umspannebenen (siehe **Abbildung 2**). Im Simulationsprogramm

hingegen ist die Spannung an der Ortsnetzstation fest eingestellt. Dadurch kann das Spannungsverhalten im Mittelspannungsnetz und dem vorgelagerten Umspannwert nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird entgegen der genannten Norm [DIN11]  $\pm 5\%$  als erlaubtes Spannungsband für die folgenden Untersuchungen festgelegt. Die Spannungsverläufe sind in **Abbildung 3** in Form einer sortierten Jahresganlinie dargestellt.

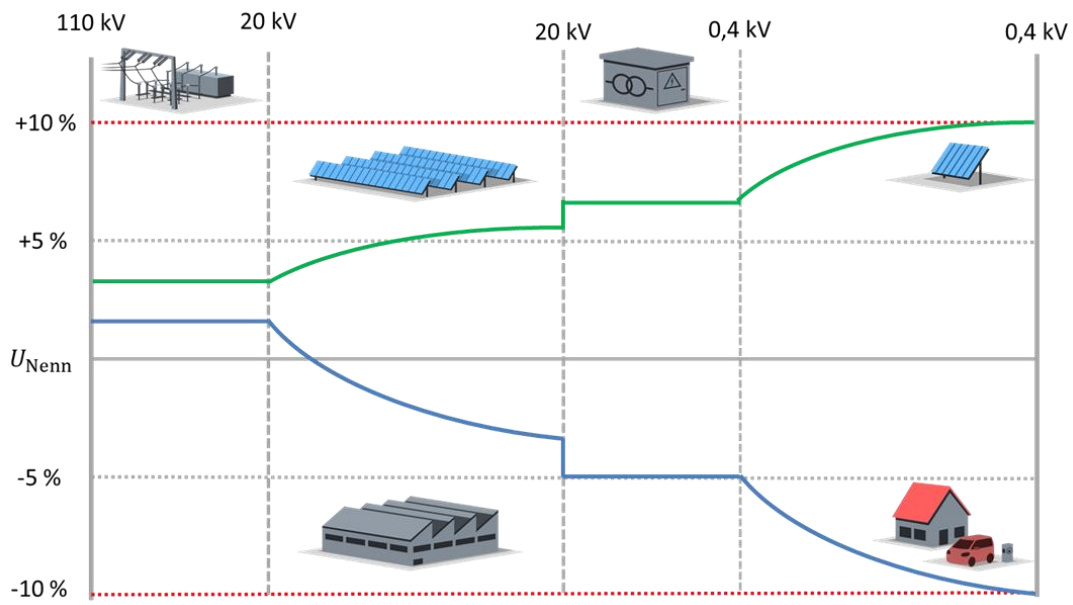


Abbildung 2: Spannungsverlauf im MS- und NS-Netz in Anlehnung an [HIN12]

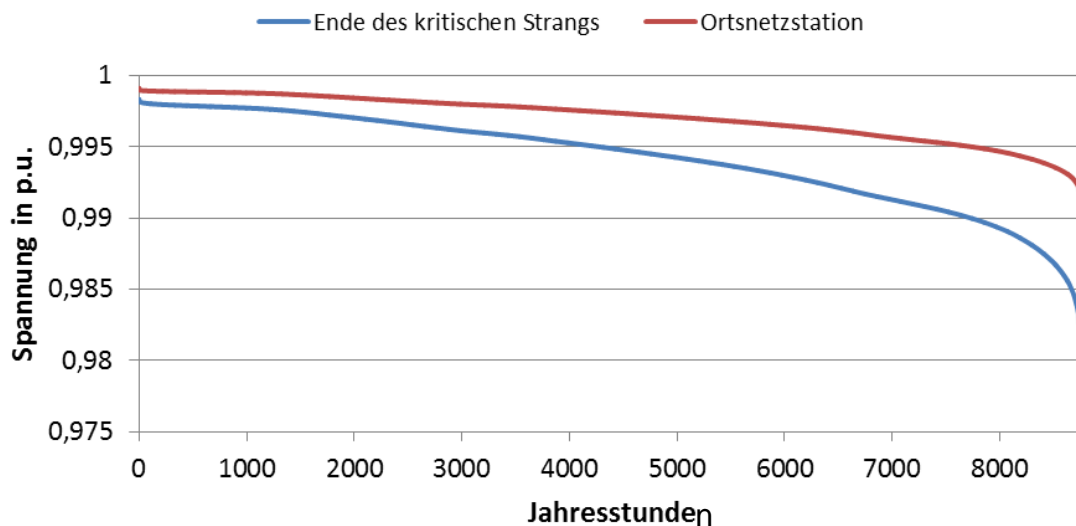


Abbildung 3: Spannungsverlauf im betrachteten Niederspannungsnetz

## 4 Integration Wallboxen

### 4.1 Statische Betrachtung

Im ersten Schritt wurden statische Simulationen durchgeführt. Hierbei wird für nur einen Zeitpunkt die Netzberechnung durchgeführt. Die Haushalte werden hierbei mit einer Leistung von 1,8 kW berücksichtigt [KAU95]. Die Ladepunkte für die Elektrofahrzeuge werden mit einer Ladeleistung von 11 kW berücksichtigt, weil diese Ladeleistung sich zukünftig als Standard für dreiphasiges Laden mit 16 A durchsetzen wird [FNN17]. Einphasige Laden mit 3,7 kW wird zukünftig aus Netzsymmetriegründen eher die Ausnahme darstellen. Das dreiphasige Laden mit 22 kW kann vereinfacht als doppelte Belastung betrachtet werden.

In der Betrachtung wird die Anzahl der Elektrofahrzeuge nach und nach erhöht, bis das Spannungsband verletzt ist (rot markierter Bereich). Die Verteilung der Fahrzeuge erfolgt im kritischen Strang gleichmäßig. Im Restnetz wird die gleiche Durchdringung an Elektrofahrzeugen entsprechend berücksichtigt. Die Elektroautos laden zur gleichen Zeit mit voller Leistung – oder anders gesagt: die Ladevorgänge haben eine Gleichzeitigkeit von 1. Die Spannungen im kritischen Strang bei unterschiedlichen Durchdringungsgraden der Elektrofahrzeuge ist in Fehler! erweisquelle konnte nicht gefunden werden. dargestellt.

Die Ergebnisse (**Abbildung 4**) zeigen, dass das erlaubte Spannungsband bereits bei einer Durchdringung von 25% und einer Gleichzeitigkeit von 1 verletzt ist (hellblaue Linie). Das bedeutet, dass im kritischen Strang gleichzeitig an sieben Ladepunkten mit 11 kW bei 32 Haushalten (22%) geladen werden kann.

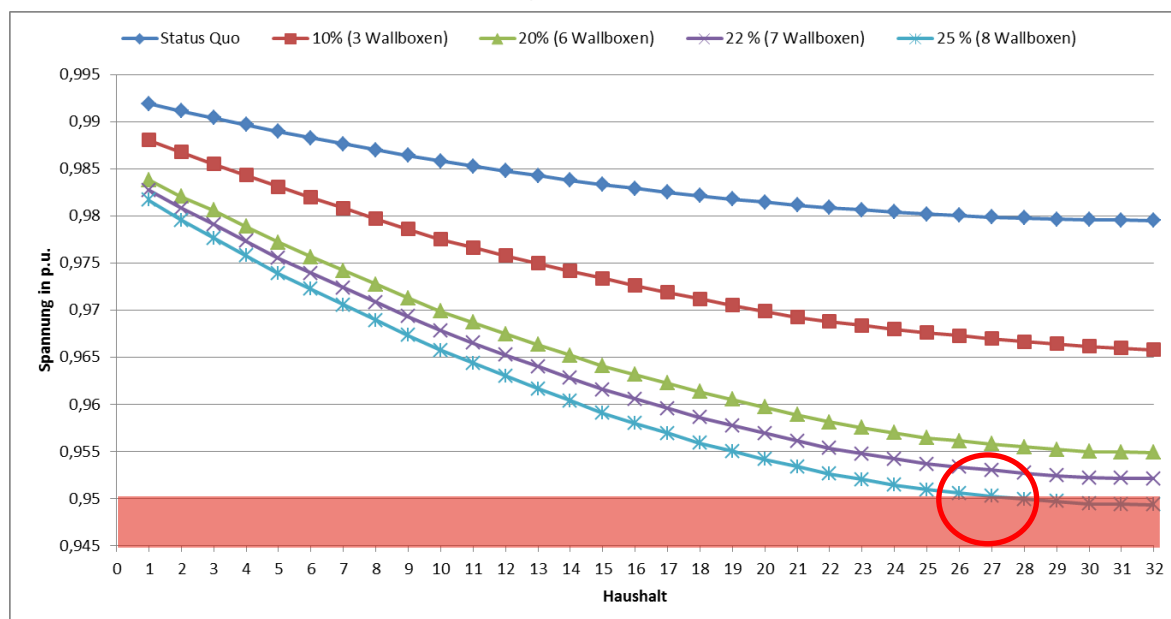


Abbildung 4: Spannungen im kritischen Strang bei statischer Betrachtung

Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass im realen Betrieb eine solche Gleichzeitigkeit nicht auftritt. Im folgenden Kapitel wird dies durch Profile berücksichtigt.

## 4.2 Quasi-dynamische Betrachtung

Wesentlich näher an der Realität und geübte Praxis beim Auslegen von Stromversorgungsnetzen ist eine quasi-dynamische Betrachtung der Lasten. In dieser Kurzstudie wird ein ganzes Jahr mit 525.600 Zeitpunkten mithilfe von institutsinternen Lastprofilen analysiert (**Abbildung 5**).

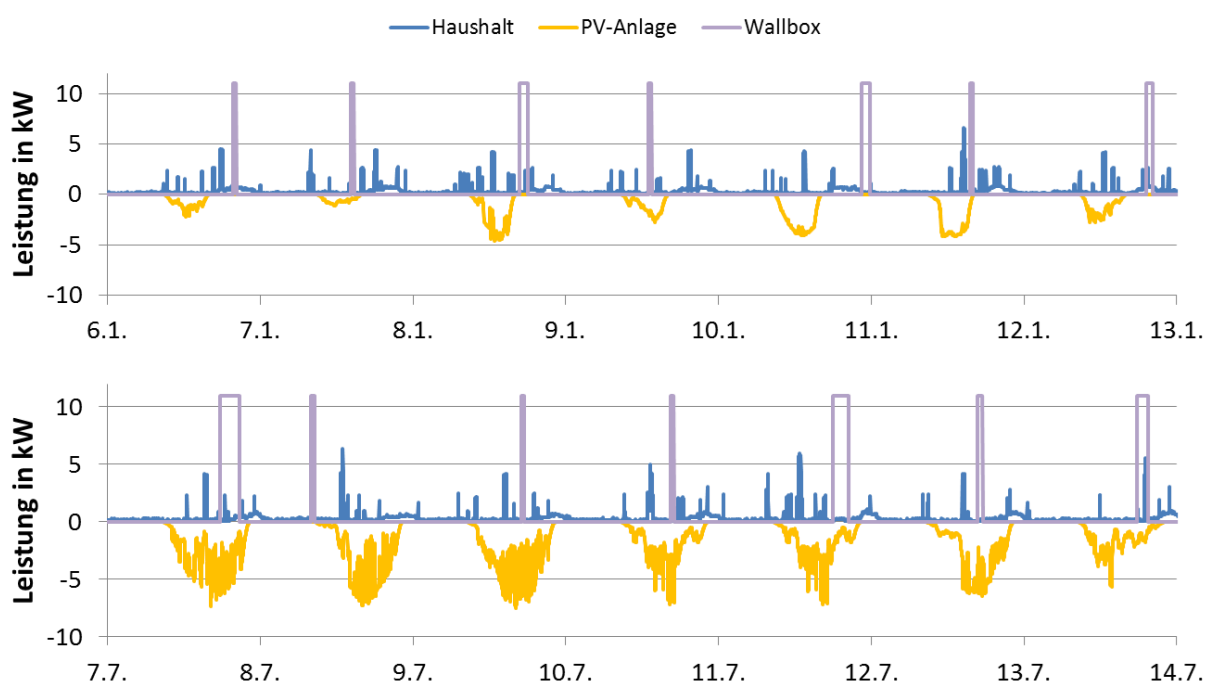


Abbildung 5: Überblick exemplarischer Profile für einen Haushalt (Winter- und Sommerwoche)

Mithilfe dieser Profile kann ein realitätsnahes Verhalten der einzelnen Komponenten im Netz über ein ganzes Jahr nachgestellt werden. Für das Restnetz wurden kumulierte Profile für die 114 Haushalte und für die Anzahl der Ladepunkte entsprechend der betrachteten Durchdringungsgrade berücksichtigt.

In der quasi-dynamischen Betrachtung sinkt die Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge von Fahrzeugen: Wegen unterschiedlicher Ankunftszeiten zu Hause und Restladung in der Fahrzeugbatterie ist die Wahrscheinlichkeit von gleichzeitigen Ladungen geringer. Wie in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. dargestellt, ist bei der Nutzung von Profilen eine Durchdringung von 45% im betrachteten Netz möglich. Das bedeutet, dass im kritischen Strang 14 Wallboxen mit 11 kW bei 32



Haushalten vorhanden sind. Erst bei einem weiteren Anstieg der Durchdringung wird das erlaubte Spannungsband verletzt (**Abbildung 6**).

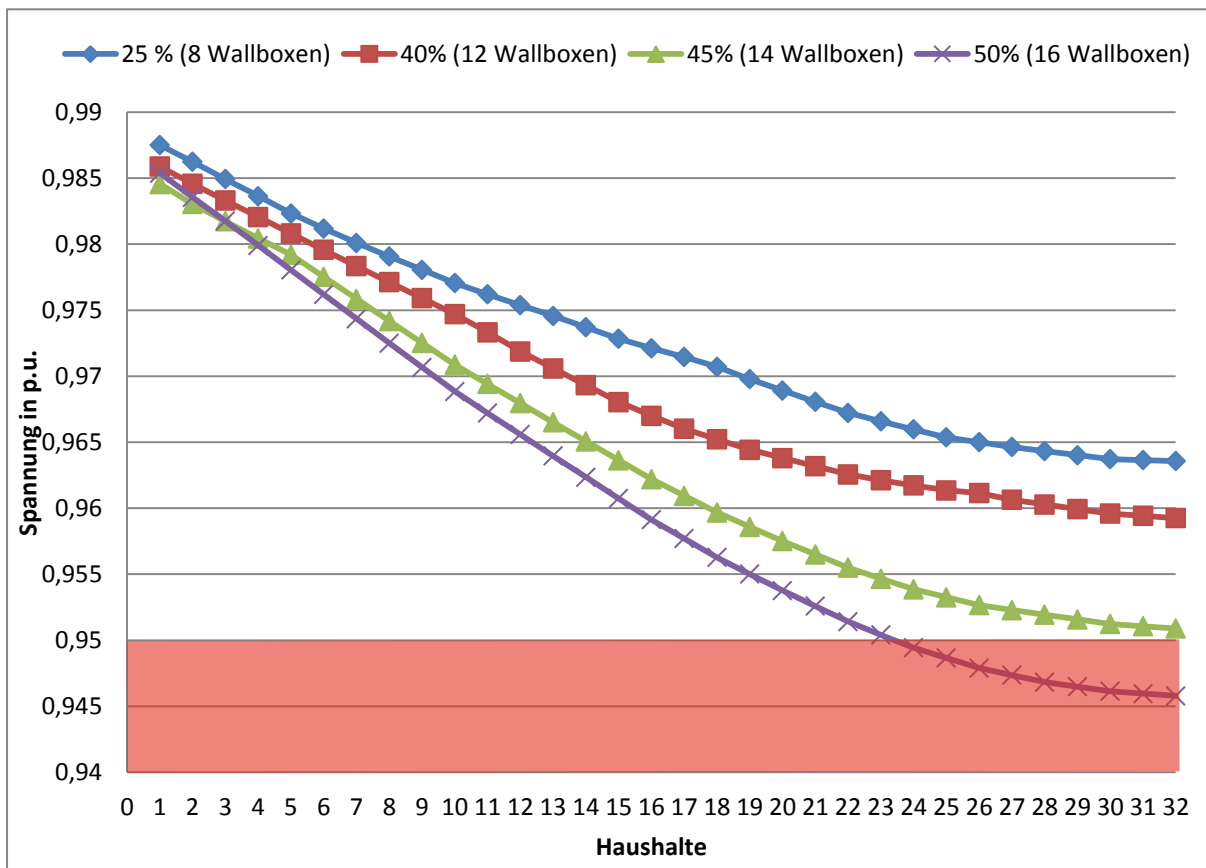


Abbildung 6: Spannungen im kritischen Strang bei quasi-dynamischer Betrachtung

Bei dieser ersten Betrachtung wurden im Niederspannungsnetz angeschlossene Photovoltaikanlagen nicht berücksichtigt. Deren Einfluss wird erst im folgenden Kapitel thematisiert.

## 5 Nutzung von PV-Speichersystemen

In Deutschland sind bereits heute mehr als 1 Millionen kleine Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von bis zu 10 Kilowatt installiert, wie sie typischerweise auf Ein- und Zweifamilienhäusern errichtet werden. Außerdem wurden mittlerweile gut 100.000 Solarstromspeicher in Deutschland angeschlossen. Diese Haushalte mit eigener Photovoltaikanlage sind zugleich Stromerzeuger und Verbraucher - oder Prosumer, aus dem englischen PROducer und conSUMER.

Das Beladen des Elektroautos mit dem eigenen sauberen Solarstrom ist wirtschaftlich sinnvoll, zumal neue Photovoltaikanlagen Solarstrom schon ab 10 Cent/kWh produzieren und die Elektrizität damit erheblich günstiger ist als Netzstrombezug von Dritten.

Für den Teil der Elektrofahrzeuge, die tagsüber geladen werden können, könnte die Photovoltaikanlage zum direkten Laden eingesetzt werden. Da aber davon ausgegangen werden muss, dass eine zeitliche Entkopplung von Solarstromerzeugung und Beladen üblich ist, etwa weil das E-Auto für die Fahrten zur Arbeit genutzt wird, ist der Einsatz eines Stromspeichers ein auf der Hand liegender Ansatz: Damit kann tagsüber der eigene Solarstrom eingespeichert und in den Abendstunden beim Beladen an das Fahrzeug abgegeben werden. Der Grundgedanke ist anhand eines Beispieltages in **Abbildung 7** dargestellt. Mithilfe einer solchen Strategie ist auch die Spitzenkappung und somit eine Entlastung des Netzes möglich.

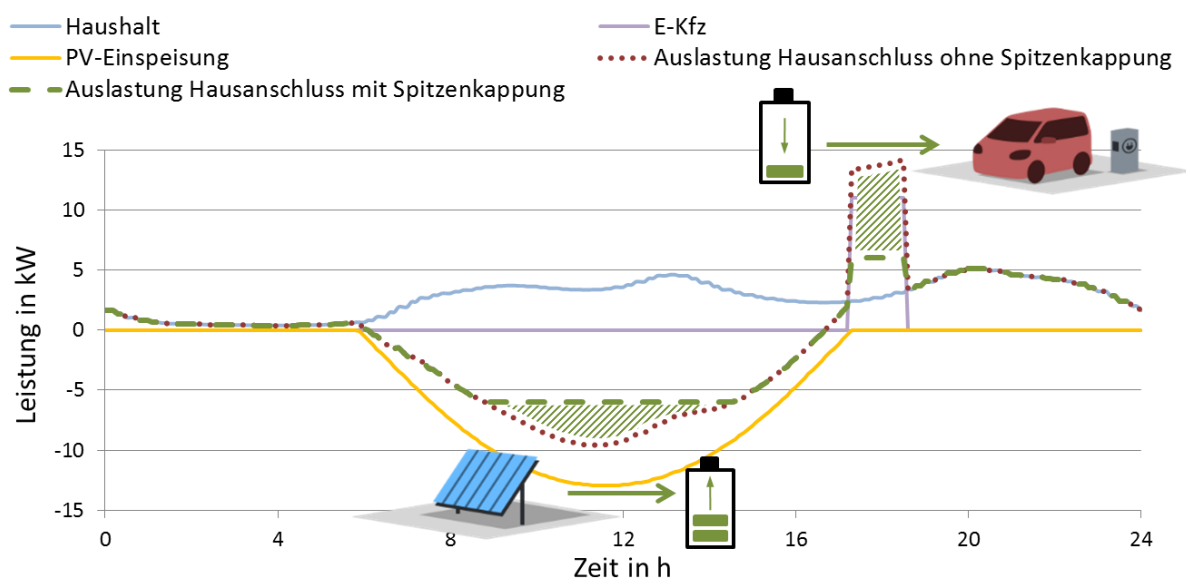


Abbildung 7: Grundgedanke beim PV-Speichersystem in Verbindung mit Elektrofahrzeug

In dieser Kurzstudie wird angenommen, dass die PV-Anlagen gleichmäßig verteilt sind innerhalb des Strangs. Die Nennleistung der PV-Anlagen beträgt bei der einen

Hälfte der Haushalte im kritischen Strang 8,5 kWp und bei der anderen Hälfte 6 kWp. Zur Reduktion der Abregelungsverluste bei PV-Anlagen wird für die Speicherauslegung ein Verhältnis von 1 kWh/kWp empfohlen [QUA15]. Die Speicherkapazität wird aus diesem Grund mit 7,5 kWh vereinfacht angenommen. Für den Speicherbetrieb wird eine leistungsabhängige Charakteristik verwendet. Dafür wird die Leistung am Netzanschlusspunkt des jeweiligen Haushalts mit dem System betrachtet. Die maximale Batteriewechselrichterleistung wird im Laufe der Untersuchungen auf 5 kW festgelegt. Die Charakteristik verfügt über ein Totband von  $\pm 2$  kW und ab einem Bezug oder einer Einspeisung von 6 kW arbeitet der Wechselrichter mit voller Leistung.

Bei den Simulationen wurden die Speicher als entsprechende Modelle im Simulationsprogramm PowerFactory berücksichtigt. Diesen Modellen war eine leistungsabhängige Charakteristik hinterlegt. Ab einer bestimmten Einspeiseleistung wurde Energie eingespeichert und primär für das Laden des Elektrofahrzeuges am Abend genutzt.

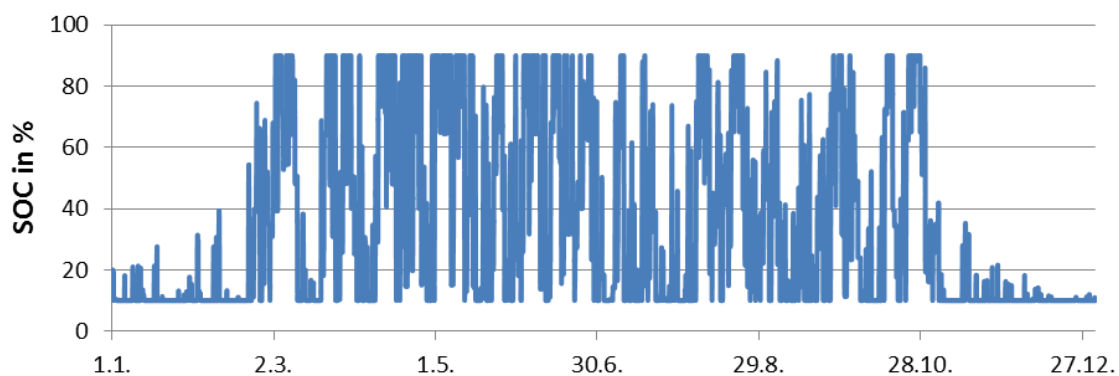


Abbildung 8: SOC-Verlauf eines Speichers über ein Jahr

Da die Photovoltaikanlage in den Sommermonaten wesentlich mehr Kilowattstunden pro Tag erzeugt und damit zuverlässiger den Solarstromspeicher beladen kann (**Abbildung 8**), wird der Speicher in der Simulation dahingehend erweitert, dass der dazugehörige Wechselrichter mit einer Q(U)-Kennlinie Blindleistung bereitstellen kann. Dadurch wirkt der Batteriewechselrichter beim Laden im Winter spannungsstabilisierend auf das Stromnetz, selbst wenn der Speicher leer ist. Der Einfluss auf die Spannung der unterschiedlichen Ansätze ist in **Abbildung 9** dargestellt. Es ist erkenntlich, dass nur der Ansatz eines PV-Speichersystems mit Blindleistungsbereitstellung die minimale Spannung und somit das Potenzial für weitere Elektrofahrzeuge in dem betrachteten Netz erhöht.

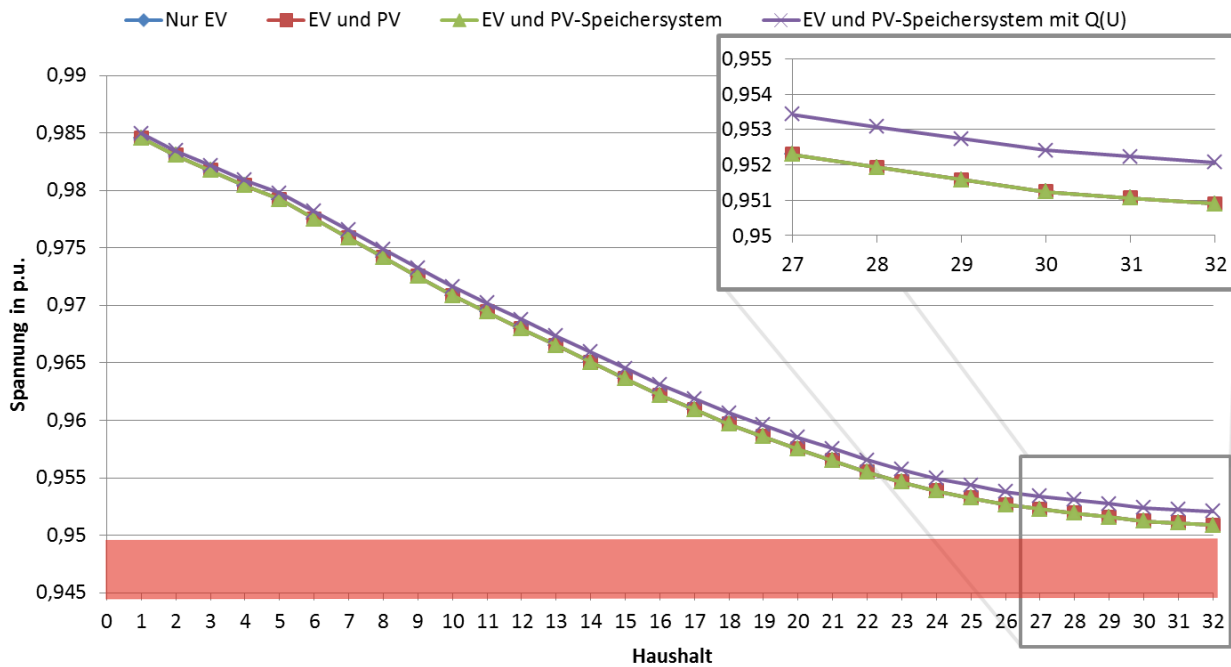


Abbildung 9: Spannungen im kritischen Strang bei unterschiedlichen Ansätzen

In **Abbildung 10** ist das Spannungsverhalten für eine weitere Erhöhung der Durchdringung von Haushalten mit PV-Speichersystemen und Elektrofahrzeugen dargestellt. In Verbindung mit PV-Speichersystemen, die auch Blindleistung zur Verfügung stellen können, kann der Durchdringungsgrad im betrachteten Netz um 15 Prozentpunkte auf insgesamt 60% erhöht werden, ohne das erlaubte Spannungsband zu verletzen. Das bedeutet, dass im kritischen Strang 20 Wallboxen mit 11 kW bei 32 Haushalten vorhanden sind. Die Auslastung des Ortsnetztransformators beträgt im Maximum etwa 80%. Somit ist in diesem Ansatz keine Überlastung von Betriebsmitteln zu befürchten. Das zeigt, dass das Spannungsproblem dominant gegenüber der Stromtragfähigkeit ist.

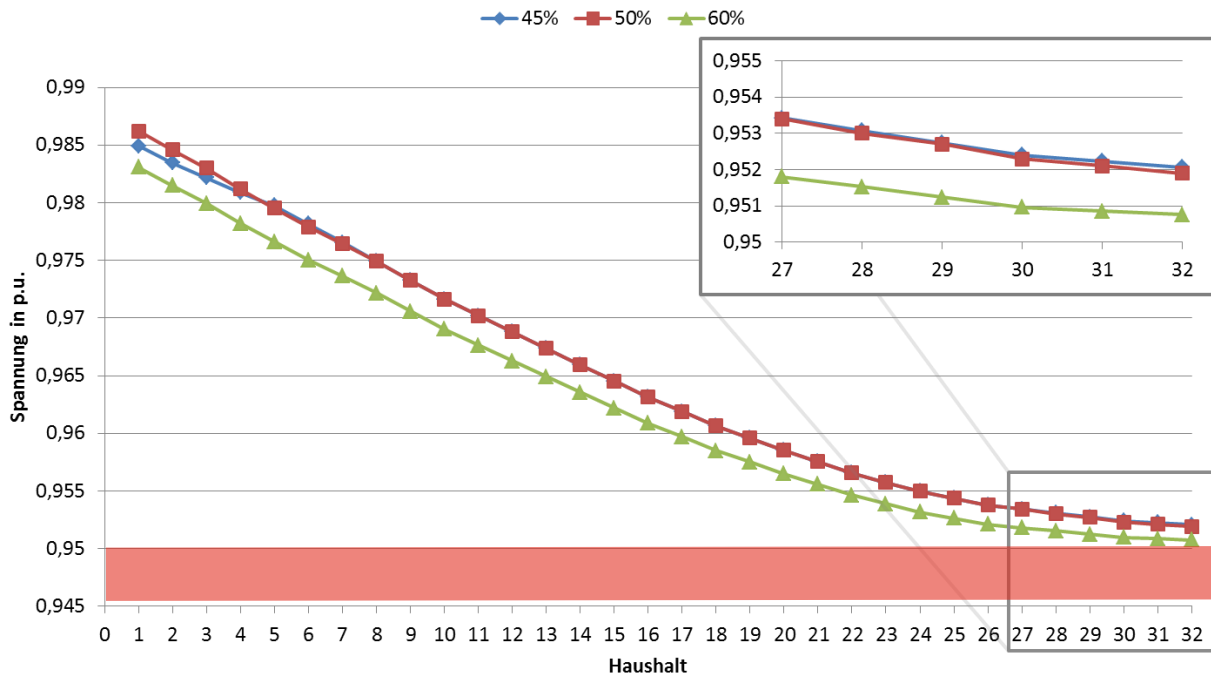


Abbildung 10: Spannungen im kritischen Strang bei steigender Durchdringung und der Verwendung von PV-Speichersystem mit Blindleistungsbereitstellung

## 6 Ladung des Speichers aus dem Netz (Mehrfachnutzung)

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, wird vor allem in den Wintermonaten der Speicher kaum in Anspruch genommen, sofern dieser nur aus der dazugehörigen PV-Anlage geladen wird. Wenn der Speicher bei wenigen Sonnenstunden zusätzlich aus dem Netz geladen wird, was insbesondere in den Wintermonaten vorkommen dürfte, könnte durch diese Mehrfachnutzung die Nutzungsdauer und die Kapazitätsauslastung des Speichers gesteigert werden. Aufgrund der bestehenden regulatorischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ist ein solcher Betrieb jedoch nicht vorgesehen [FNN16].

Wenn die regulatorischen Rahmenbedingungen eine Mehrfachnutzung der Batteriespeicher zulassen würde, hätte dies auf den Ausbau der Ladeinfrastruktur erhebliche positive Effekte, wie die Ergebnisse der Analyse zeigen, die in **Abbildung 11** dargestellt sind. Es wird deutlich, dass bei dem Ansatz der Mehrfachnutzung eine vollständige Durchdringung von 100% im betrachteten Netz möglich ist.

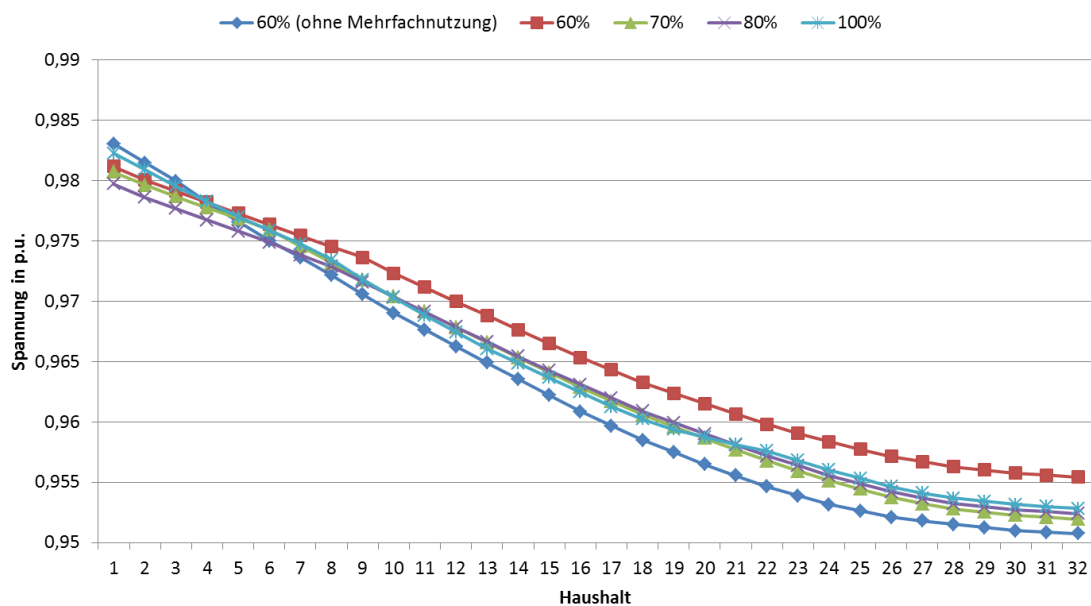


Abbildung 11: Spannungen im kritischen Strang bei Mehrfachnutzung der Speicher

Bei der Mehrfachnutzung der Speicher steigt die Auslastung des Ortsnetztransformators, weil die Speicher aufgrund der gewählten Betriebsgrenzen bereits vollständig geladen ist und somit – zumindest teilweise – keine Spitzenkappung für den gesamten Einspeisezeitraum möglich ist. Selbst im Fall der vollständigen Durchdringung mit Ladepunkten steigt die Auslastung des Ortsnetztransformators maximal auf knapp 115% und bleibt damit im

Toleranzbereich. Um die Überlastung zu reduzieren ist es sinnvoll, Ladestrategien anzuwenden, die die PV-Einspeisung und regionalen Windeinspeisung berücksichtigen. Aufgrund der Komplexität einer solchen Analyse konnte im Rahmen dieser Kurzstudie nicht detailliert auf das Thema eingegangen werden.

## 7 Zusammenfassung

Aufgrund der aktuellen Entwicklungen und der politischen Rahmenbedingungen mit dem Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität wird die Zahl der Elektrofahrzeuge in den kommenden Jahren erheblich steigen. Parallel dazu wird die Anzahl von öffentlichen und privaten Ladepunkten steigen.

Vor allem vorstädtische Wohngebiete, die durch Einfamilienhäusern mit Garagen bzw. Carports gekennzeichnet sind, bieten beste Voraussetzungen für das private Laden von Elektrofahrzeuge. Im Gegensatz zu öffentlichen (Schnell)Ladestationen ist der Ladepunkte zu Hause hinsichtlich des Betriebes kaum planbar. Daher kann eine steigende Durchdringung die bestehenden Energieversorgungsnetze vor Herausforderung stellen.

Im Rahmen dieser Kurzstudie wurden anhand eines beispielhaften Vorstadtnetzes unterschiedliche Ansätze betrachtet, mithilfe derer der Ausbau von privaten Ladepunkten für Elektrofahrzeuge gesteigert werden kann. Auf Basis von Normen und Forschungsergebnisse wurde ein erlaubtes Spannungsband von  $\pm 5\%$  festgelegt. Die Untersuchungen erfolgten mit dem Simulationsprogramm PowerFactory.

Die Ergebnisse sind eindeutig: PV-Speichersysteme ermöglichen im untersuchten Netz ohne weitere Ausbaumaßnahmen die Vollabdeckung mit Ladepunkten. Ohne PV-Speichersysteme ist nur eine Durchdringung mit Ladepunkten für Elektrofahrzeuge von 22 % bei gleichzeitigem Laden bzw. 45 % bei dynamischem Laden möglich. Sind Photovoltaikanlagen installiert mit dezentralen Batteriespeichern, die auch Blindleistung bereitstellen können, steigert sich der mögliche Durchdringungsgrad im bestehenden Netz um 15 Punkte auf 60 %. Eine Mehrfachnutzung der Speicher – also einem Beladen des Speichers mit Strom aus dem Netz – erhöht die mögliche Anzahl der Ladepunkte auf 122 %. Eine Volldurchdringung mit Ladepunkten ist also möglich. Diese Betriebsart ist derzeit jedoch aus regulativen Rahmenbedingungen ausgeschlossen. In **Abbildung 12** sind die betrachteten Fälle und die jeweils mögliche Durchdringung mit Ladepunkten (in Prozent) im repräsentativen Beispielnetz zusammengefasst dargestellt.

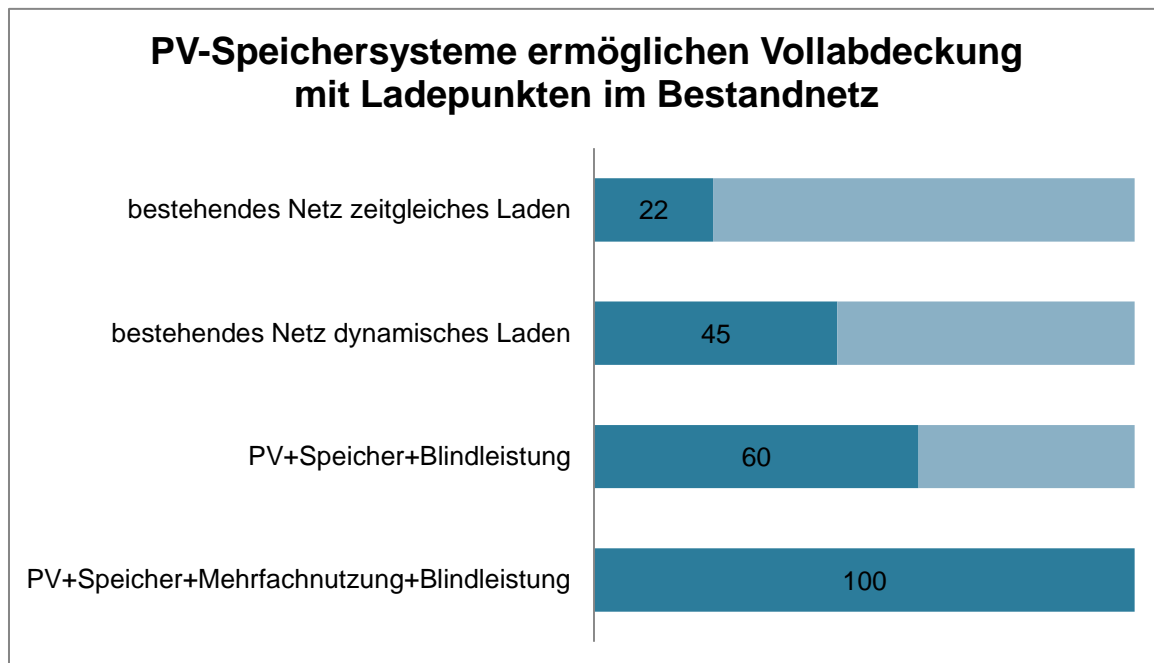


Abbildung 12: Einfluss der Maßnahmen auf die Durchdringung mit Ladepunkten pro Haushalt (in Prozent)

Klar wird, dass Photovoltaik-Speichersysteme maßgeblich die Netzintegration und damit den Rollout der Elektromobilität voranbringen können und zugleich kostenintensive Ertüchtigungsmaßnahmen im Verteilnetz vermeiden helfen. Die Forschungsfrage dieser Untersuchung kann also eindeutig bejaht werden.

Diese Kurzstudie basiert auf konservativen Annahmen. Nicht betrachtet wurden Energiemanagementsysteme und intelligente Ladesteuerung, mit deren Hilfe die vorhandenen Netzkapazitäten zusätzlich optimiert werden können. Offensichtlich ist der Vorteil von mehrfach genutzten Speichern. Insofern halten es die Autoren für sinnvoll, die regulatorischen Rahmenbedingungen auf ein modernes Energiesystem entsprechend anzupassen.



## 8 Anhang

Tabelle 1: Übersicht der minimalen Spannungen bei den betrachteten Fällen

Szenario (%-Angaben sind die Durchdringungsgrade)	Minimale Spannung am Ende des kritischen Stranges in p.u.
Nur Haushalte	0,9795
Haushalte mit Wallboxen (statisch, 25%)	0,9522
Haushalte mit Wallboxen (45%)	0,9509
Haushalte mit Wallboxen und PV-Anlagen (45%)	0,9509
Haushalte mit Wallboxen und PV-Speichersystemen (45%)	0,9509
Haushalte mit Wallboxen und PV-Speichersystemen, Batteriewechselrichter mit Q(U) (45%)	0,9521
Haushalte mit Wallboxen und PV-Speichersystemen, Batteriewechselrichter mit Q(U) (50%)	0,9519
Haushalte mit Wallboxen und PV-Speichersystemen, Batteriewechselrichter mit Q(U) (60%)	0,9508
Haushalte mit Wallboxen und PV-Speichersystemen, Batteriewechselrichter mit Q(U) und Mehrfachnutzung (60%)	0,9554
Haushalte mit Wallboxen und PV-Speichersystemen, Batteriewechselrichter mit Q(U) und Mehrfachnutzung (70%)	0,9520
Haushalte mit Wallboxen und PV-Speichersystemen, Batteriewechselrichter mit Q(U) und Mehrfachnutzung (80%)	0,9524
Haushalte mit Wallboxen und PV-Speichersystemen, Batteriewechselrichter mit Q(U) und Mehrfachnutzung (100%)	0,9528

## 9 Literatur

- [BRA18] Braunschweiger Zeitung: Batteriebetriebene Autos sind Übergangsfahrzeuge, 23. Januar 2018
- [DIN11] DIN EN 50160:2011-02: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen
- [FAZ17] Frankfurter Allgemeine Zeitung: „Merkel kassiert Deutschlands Elektroauto-Ziel“ [online] <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/neue-antriebstechnik-merkel-kassiert-deutschlands-elektroauto-ziel-15017473.html> [Letzter Zugriff am 22. Februar 2018]
- [FFN16] Forum Netztechnik / Netzbetrieb im VDE (FNN): Anschluss und Betrieb von Speichern am Niederspannungsnetz, 2016
- [FNN17] FNN: „Das Netz ist das Backbone für die Elektromobilität“. Positionspapier, Mai 2017.
- [HAN18] Handelsblatt: „Blackout-Gefahr durch Elektroautos“ [online], <http://www.handelsblatt.com/my/unternehmen/industrie/boom-belastet-stromnetz-blackout-gefahr-durch-elektroautos/20866160.html?ticket=ST-467163-4NCdu2oaf6RqKkEPQRID-ap4> [Letzter Zugriff am 22. Februar 2018]
- [HIN12] Hinz, A.; Sojer, M.: Spannungsgeregelte Ortsnetzstationen zur Verbesserung der Netzintegration von erneuerbaren Energien in VDE Kongress 2012: Intelligente Energieversorgung der Zukunft, VDE (Hrsg.), Stuttgart, 2012
- [KAU95] Kaufmann, W.: Planung öffentlicher Elektrizitätsverteilungs-Systeme. VDE-Verlag GmbH: Frankfurt am Main, 1995.
- [KER11] Kerber, G.: Aufnahmefähigkeit von Niederspannungsverteilnetzen für die Einspeisung aus Photovoltaikkleinanlagen. Dissertation. Technische Universität München, 2011
- [MAN16] manager magazin: VW plant Elektrooffensive gegen Dieselkrise [online], <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/volkswagen-vw-will-25-prozent-e-autos-bis-2025-a-1088231.html> [Letzter Zugriff am 13. Juni 2018]
- [NPE15] Nationale Plattform Elektromobilität: Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland - Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015
- [QUA15] Quaschnig, V.: „Regenerative Energiesysteme“, Hanser, 2015.
- [WUS17] Wussow, J.; Engel, B.: Peak Shaving by Means of Buffer Storages in Charging Stations in 1st E-Mobility Power System Integration Symposium , Energyautics (Hrsg.), Berlin, 2017.

## 10 Abkürzungsverzeichnis / Glossar

EV	Elektrofahrzeug ( <i>engl. electric vehicle</i> )
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
PV	Photovoltaik

## 11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untersuchtes Netz [KER11] .....	5
Abbildung 2: Spannungsverlauf im MS- und NS-Netz in Anlehnung an [HIN12] .....	6
Abbildung 3: Spannungsverlauf im betrachteten NS-Netz.....	6
Abbildung 4: Spannungen im kritischen Strang bei statischer Betrachtung.....	7
Abbildung 5: Überblick exemplarischer Profile für einen Haushalt (Winter- und Sommerwoche).....	8
Abbildung 6: Spannungen im kritischen Strang bei quasi-dynamischer Betrachtung .	9
Abbildung 7: Grundgedanke beim PV-Speichersystem in Verbindung mit Elektrofahrzeug.....	10
Abbildung 8: SOC-Verlauf eines Speichers über ein Jahr .....	11
Abbildung 9: Spannungen im kritischen Strang bei unterschiedlichen Ansätzen.....	12
Abbildung 10: Spannungen im kritischen Strang bei steigender Durchdringung und der Verwendung von PV-Speichersystem mit Blindleistungsbereitstellung .....	13
Abbildung 11: Spannungen im kritischen Strang bei Mehrfachnutzung der Speicher .....	14
Abbildung 12: Einfluss der Maßnahmen auf die Durchdringung mit Ladepunkten pro Haushalt (in Prozent) .....	16

## 12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der minimalen Spannungen bei den betrachteten Fällen.....	17
--	----