

Netzanbindung von Schnellladestationen an Autobahnen

Nils Kreth (*), Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme, TU Clausthal, Leibnizstraße 28,
38678 Clausthal-Zellerfeld, Telefonnr. 05323-72-3597, nils.kreth@tu-clausthal.de,
<https://www.iee.tu-clausthal.de>

Kurzfassung: Die Sektorkopplung der Verkehrs- und Energiesektoren kann nur durch den Umstieg auf Elektromobilität erfolgen. Um den Anreiz zum Umstieg für den Nutzer zu erhöhen, soll dieser nur die Antriebstechnologie wechseln, nicht aber sein Verhalten ändern müssen. Das bedeutet, dass für die gewünschte Langstreckenmobilität mit Elektrofahrzeugen ein flächendeckendes Netz an Schnellladestationen an Autobahnen errichtet werden muss. In dieser Arbeit werden drei Varianten der Netzanbindung dieser Schnellladestationen hinsichtlich Auslegung, Umsetzung und Kosten untersucht: Während bei der ersten Variante die Anschlussleistung des vorhandenen Netzes durch Netzausbau angepasst wird, gleicht bei der zweiten Variante ein Batteriespeicher die Leistungsdifferenz zwischen dem vorhandenen Anschluss und der Schnellladestation aus. Als dritte Variante wird der direkte Anschluss an einen Windpark betrachtet. Unter Annahme des gleichbleibenden Nutzerverhaltens werden die Verteilung und Anzahl der voraussichtlichen Ladevorgänge an Schnellladestationen mit zwei bis sechs Ladesäulen mit jeweils 350 kW Ladeleistung modelliert. Mit diesem Modell wird für jede Variante die jeweilige Netzanbindung ausgelegt, der Betrieb simuliert und untersucht sowie die jährlichen Kosten berechnet. Beim Vergleich der Varianten werden die herausgearbeiteten Vor- und Nachteile bewertet und zusammen mit der Kostenbetrachtung folgen Empfehlungen für den Aufbau der Schnellladestationen. Der aufwändige und unflexible Netzausbau garantiert die Nutzung der Schnellladestation zu jeder Zeit. Im Gegensatz dazu basiert die Auslegung des Batteriespeichers auf dem vorhergesagten Nutzerverhalten und ist entsprechend unsicherer, jedoch ermöglicht der modulare Aufbau eine schnelle Installation und flexible Erweiterungen. Die Unsicherheit bei der Auslegung wird bei der Anbindung an einen Windpark wegen der fluktuierenden Einspeisung erhöht, garantiert jedoch das Laden mit CO₂-freien Strom. Da die Vorteile jeder Variante ihre Nachteile abschwächen und außerdem die Kosten von der Größe der Schnellladestation und den Gegebenheiten am Standort abhängen, kann keine der Varianten ausgeschlossen werden. Für die Übergangszeit, in der Schnellladestationen mit wenigen Ladesäulen ausreichen, empfiehlt sich die Verwendung eines Batteriespeichers, damit die Schnellladestation und der Anschluss später flexibel und kostengünstig angepasst werden können.

Keywords: Batteriespeicher, Elektromobilität, Ladeinfrastruktur, Langstreckenfähigkeit, Netzanbindung, Schnellladestation, Schnellladung

1 Bedarf an Schnellladestationen

1.1 Sektorkopplung und Effizienzsteigerung

Langfristig strebt die Bundesregierung im „Klimaschutzplan 2050“ [1] die Treibhausgasneutralität bis 2050 auch im Verkehrssektor, der etwa 18% der gesamten CO₂-Emissionen Deutschlands ausmacht, an. Diese Dekarbonisierung des Verkehrs erfordert die Substitution von derzeit etwa 730 TWh fossiler Kraftstoffe durch regenerativ hergestellte Energieträger. Eine Substitution mit biogenen Kraftstoffen, deren Anteil derzeit nur 4% betrage, sei nach *Quaschning* [2] aufgrund der begrenzten Anbauflächen nicht zielführend. Stattdessen müsse der Verkehrssektor im Rahmen der Sektorkopplung an den Energiesektor angebunden werden, wo durch den Ausbau erneuerbarer Energien die vollständige Dekarbonisierung möglich sei.

Ahmels und Brandmeyer [3] von der Deutschen Umwelthilfe e.V. weisen auf eine notwendige Verdopplung der derzeitigen Bruttostromerzeugung von etwa 620 TWh bei der Verwendung strombasierter Kraftstoffe aufgrund der geringen Wirkungsgrade hin. Die benötigte Energie lasse sich nach *Günther* [4] durch die direkte Verwendung des Stroms in Elektromotoren mit einem höheren Wirkungsgrad und den damit verbundenen großen Effizienzgewinnen deutlich reduzieren.

Nach der Sektorkopplung verlagern sich die Treibhausgasemissionen des Verkehrs auf die Energieerzeugung, wo sie durch den Ausbau erneuerbarer Energien reduziert werden. Aufgrund des zusätzlichen Strombedarfs bezweifelt *Sauer* [5], dass der derzeitige Ausbau der erneuerbaren Energien dafür ausreiche. Aufgrund des zusätzlichen Strombedarfs seien bis 2030 nur geringe CO₂-Einsparungen im Verkehrssektor möglich. Erst rein regenerativ erzeugter Strom reduziere die Emissionen deutlich.

1.2 Reichweitenerhöhung und Ladezeitenverkürzung

Um das Klimaschutzziel im Verkehrssektor zu erreichen, sollen im ersten Schritt bis 2020 eine Million und bis 2030 insgesamt 6 Millionen Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren [6]. Derzeit sind nur 35.000 Elektrofahrzeuge beim Kraftfahrtbundesamt gemeldet, obwohl *Hennings und Linssen* [7] anhand von Mobilitätsstudien zeigen, dass die Nutzung eines heutigen Elektrofahrzeuges mit geringer Reichweite ohne große Einschränkungen möglich und ein Nachladen über Nacht ausreichend wäre.

Diese Statistiken spiegeln den tatsächlichen Bedarf wider, dem gegenüber steht jedoch das Bedürfnis der Nutzer. *Kampker, Vallée und Schnettler* [8] führen die geringe Akzeptanz der Elektrofahrzeuge auf die Gewohnheit der Nutzer zurück, für wenige Tage im Jahr ein Fahrzeug mit Fernreisefähigkeit zu besitzen. Zur Steigerung der Attraktivität muss dem Nutzer also der Wechsel der Antriebstechnik ermöglicht, nicht jedoch ein Verhaltenswechsel aufgezwungen werden. Dies setzt nicht nur eine Steigerung der Reichweite von Elektrofahrzeugen durch den Einbau größerer Batterien voraus, sondern auch den flächendeckenden Ausbau der Schnellladeinfrastruktur.

2 Systembetrachtung

2.1 Modellierung der Schnellladestation

Um die Reisezeit durch die Verwendung eines Elektrofahrzeuges nicht zu verlängern, sollte die Ladezeit einer ausreichenden Reichweite auf die Dauer einer üblichen Pause reduziert werden. Technisch bereits heute möglich ist eine Ladeleistung von 350 kW [9], mit der innerhalb von 15 Minuten eine Reichweite von 350 km geladen werden kann. Die in dieser Arbeit untersuchte Schnellladestation soll deshalb pro Ladesäule eine maximale Ladeleistung von 350 kW bereitstellen, wobei die Möglichkeit einer fahrzeugbedingten geringeren Ladeleistung nicht betrachtet und so die maximale Belastung abgebildet wird.

Ziel des Aufbaus eines flächendeckenden Netzes an Schnellladestationen ist eine verbesserte Langstreckenfähigkeit und damit eine erhöhte Akzeptanz der Elektromobilität: Der Nutzer soll durch kürzere Ladezeiten und größere Reichweiten beim Umstieg auf ein Elektrofahrzeug sein Nutzerverhalten nicht verändern müssen. Deshalb kann für Planung und Betrieb der Schnellladestationen von demselben Nutzerverhalten auf Langstrecken ausgegangen werden, das bereits in verschiedenen Studien anhand Nutzer herkömmlicher Fahrzeuge untersucht wurde.

Datengrundlage zur Modellierung des Nutzerverhaltens bilden zwei Studien [10], [11], die die Verteilung der Langstreckenfahrten untersuchten. Mit diesen werden Gewichtungsfaktoren für jeden Monat, jeden Tag der Woche und jede Stunde eines Tages bestimmt. Ausgehend von 6 Millionen Elektrofahrzeugen und 7.100 Schnellladestationen, die von der *Nationalen Plattform Elektromobilität* [12] für eine flächendeckende Infrastruktur empfohlen werden, wird die Anzahl Fahrzeuge an einer Schnellladestation für jede Stunde eines Jahres berechnet.

Zusätzlich wird der Einfluss des Standorts durch die Anzahl Ladesäulen und einer entsprechenden Skalierung der Anzahl Fahrzeuge mit folgender Annahme berücksichtigt: An wenig genutzten Autobahnen reichen zwei Ladesäulen aus, wobei auch nur die Hälfte an Fahrzeugen die Schnellladestation nutzen. Im Gegensatz nutzen an stark frequentierten Autobahnen in der Nähe von Ballungszentren anderthalbmal so viele Fahrzeuge die Schnellladestation, sodass sechs Ladesäulen benötigt werden. In Tabelle 1 sind die maximale Leistung der Schnellladestation, die Anzahl Fahrzeuge pro Jahr und die umgesetzte Energie in Abhängigkeit der Anzahl Ladesäulen aufgelistet, die sich aus der Simulation ergeben.

Tabelle 1: Leistung und Energiebedarf abhängig der Anzahl Ladesäulen

Anzahl Ladesäulen	2	3	4	5	6
max. Leistung in kW	700	1050	1400	1750	2100
Anzahl Fahrzeuge pro Jahr	6018	9027	12036	15045	18054
Energieverbrauch in GWh	0,53	0,79	1,05	1,32	1,58

Das Nutzerverhalten kann aufgrund der vorhandenen Daten nur stundenweise modelliert werden, weshalb die Anzahl der Fahrzeuge einer Stunde jeweils auf vier Mal 15 Minuten zufällig verteilt wird. Dadurch stellt jede Simulation eine andere Belastung dar, sodass sowohl Leistungsspitzen, als auch längere konstante Belastungen der Schnellladestation simuliert werden.

2.2 Aufbau der untersuchten Varianten

In dieser Arbeit werden drei Varianten des Netzanschlusses einer Schnellladestation untersucht: Bei der Variante Netzausbau wird die Anschlussleistung des Netzes durch zusätzliche Transformatoren und gegebenenfalls einem zusätzlichen Mittelspannungskabel erhöht. Dahingegen nutzt die Variante Batteriespeicher den bestehenden Netzanschluss und gleicht die fehlende Anschlussleistung durch einen stationären Batteriespeicher auf der Niederspannungsseite aus. Die Variante Regenerativ verzichtet schließlich gänzlich auf einen eigenen Netzanschluss und wird stattdessen an das Mittelspannungsnetz eines Windparks angeschlossen. Auch hier dient ein Batteriespeicher zum Ausgleich der Übertragungsleistung des verwendeten Transformators sowie zum Ausgleich der fluktuierenden Einspeisung.

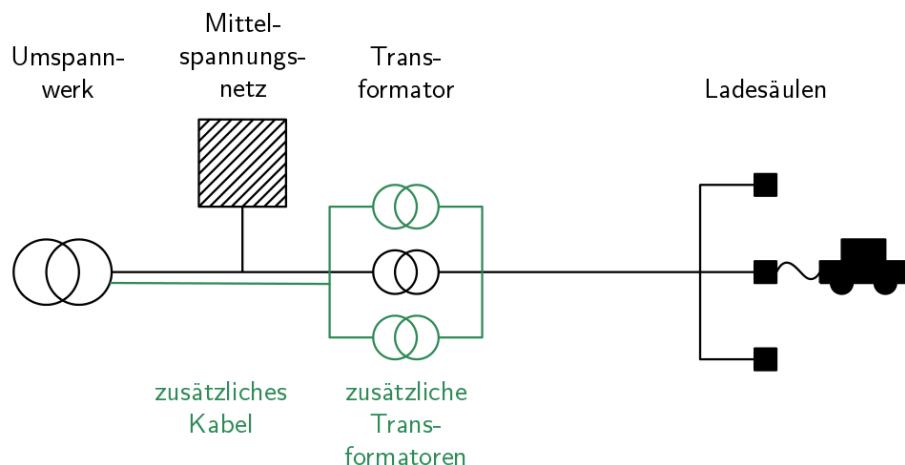


Abbildung 1: Netzanschluss einer Schnellladestation mit bestehenden Anschluss in schwarz und dem notwendigen Netzausbau in grün

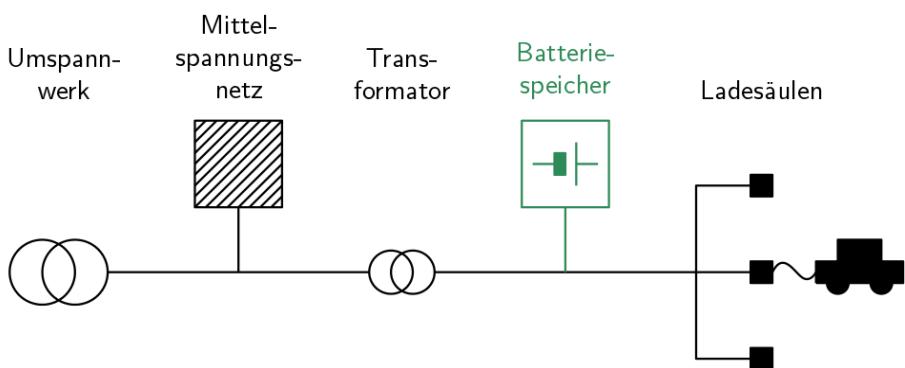


Abbildung 2: Netzanschluss einer Schnellladestation mit Batteriespeicher

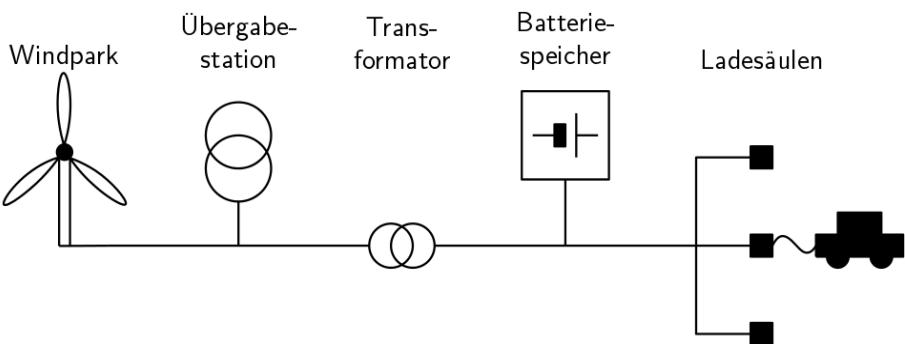


Abbildung 3: Aufbau einer regenerativen Schnellladestation

3 Vergleich der Varianten

3.1 Auslegung

Bei der Variante Netzausbau wird die Schnellladestation über einen Transformator an das Mittelspannungsnetz angeschlossen. Für die Dimensionierung des Netzanschlusses ist nur die maximale Leistung der Schnellladestation relevant, aus der sich die notwendige Anzahl Transformatoren zwischen zwei und vier direkt ergibt. Mithilfe von Lastflussberechnungen in Netzberechnungsprogrammen kann der vom derzeitigen Netzzustand abhängende, notwendige Netzausbau genau bestimmt werden. Somit ist die Auslegung des Netzanschlusses garantiert ausreichend und kann jederzeit vollständig genutzt werden, selbst wenn die Schnellladestation falsch ausgelegt ist. Ist das tatsächliche Nutzerverhalten niedriger als erwartet, sind Schnellladestation und Netzanschluss überdimensioniert. Nutzen mehr Fahrzeuge als erwartet die Schnellladestation, wird die maximale Leistung durch die Anzahl Ladesäulen begrenzt, sodass zwar längere Wartezeiten aber keine Probleme mit dem Netzanschluss entstehen.

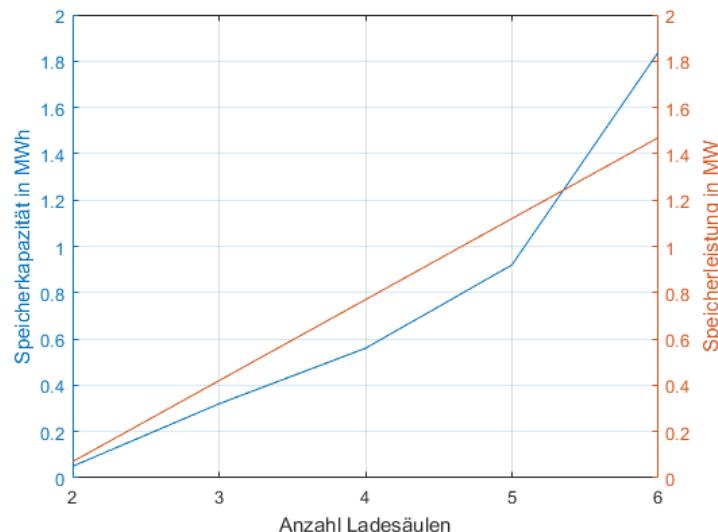


Abbildung 4: Benötigte Kapazität und Leistung des Batteriespeichers bei der Variante Batteriespeicher in Abhängigkeit der Anzahl Ladesäulen

Die Leistung des Batteriespeichers der Variante Batteriespeicher entspricht der Differenz zwischen der Anschlussleistung und der maximalen Leistung der Schnellladestation. Zur Bestimmung seiner Kapazität wird die Schnellladestation mit dem zuvor erstellten Modell des Nutzerverhaltens simuliert, wobei verschiedene Belastungen durch die zufällige Verteilung der Fahrzeuge einer Stunde auf vier Mal 15 Minuten abgebildet werden. Die Auslegung ist im Vergleich zur Variante Netzausbau aufwändiger und unsicherer: Nutzen mehr Fahrzeuge als erwartet die Schnellladestation, wird der Batteriespeicher eventuell vollständig entladen und die Schnellladestation kann nur noch mit der Transformatorleistung betrieben werden. Dieses Risiko kann bei der Auslegung durch eine Vergrößerung der Kapazität des Batteriespeichers um einen Sicherheitsfaktor verringert werden.

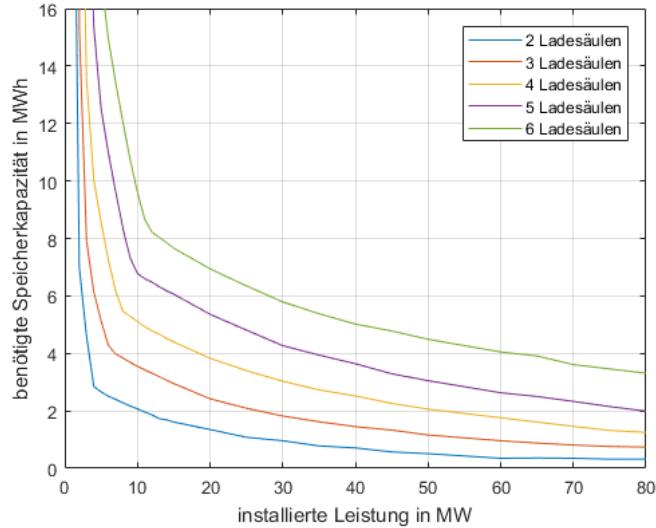


Abbildung 5: Benötigte Speicherkapazität bei der Variante Regenerativ in Abhängigkeit der installierten Leistung des Windparks

Bei der Variante Regenerativ kommt die Simulation der eingespeisten Leistung des Windparks bei der Auslegung des Batteriespeichers hinzu. Dazu wird die im Jahr 2016 in ganz Deutschland eingespeiste Windenergieleistung durch die im gleichen Zeitraum installierte Leistung geteilt, sodass mit den resultierenden Skalierungsfaktoren die Einspeisung eines Windparks beliebiger installierter Leistung simuliert werden kann. Da die Einspeisung nur auf der Grundlage vergangener Messwerte modelliert werden kann, ist hier die Unsicherheit bei der Auslegung im Vergleich zur Variante Batteriespeicher höher. Zwar können sich Fehler in beiden Modell aufheben, wenn beispielsweise weniger Fahrzeuge als erwartet die Schnellladestation nutzen und die Einspeisung ebenfalls geringer ist, die Fehler können sich jedoch auch verstärken. So kann eine höhere Nutzung zusammen mit einer geringeren Einspeisung dazu führen, dass die Kapazität des Batteriespeichers nicht ausreicht. Dann ist aufgrund der fluktuierenden Einspeisung der Leistungsbezug über den Transformator nicht mehr jederzeit möglich und die Schnellladestation fällt aus. Da das Risiko bei der Auslegung dieser Variante am höchsten ist, sollte hier auch ein höherer Sicherheitsfaktor gewählt werden.

Wird die Schnellladestation bei einer der hier untersuchten Varianten angepasst, da sich entweder das Nutzerverhalten während des Betriebs verändert oder die Schnellladestation von vornherein falsch ausgelegt wurde, muss auch der Netzanschluss bzw. der Batteriespeicher angepasst werden. Dafür muss die jeweils zuvor gewählte Variante zur Netzanbindung erneut ausgelegt werden, um die notwendigen Anpassungen zu bestimmen. Bei der Umsetzung dieser Anpassungen ist die Variante Netzausbau aufgrund der umfangreichen Erdarbeiten beim Kabelausbau aufwändiger und somit unflexibler als die anderen beiden Varianten. Da der Batteriespeicher der Variante Batteriespeicher und der Variante Regenerativ modular aufgebaut ist, kann seine Leistung und Kapazität flexibel angepasst werden.

3.2 Betrieb

Die Lebensdauer von Kabeln und Transformatoren liegt bei etwa 30 Jahren [13], sodass die Investitionen bei der Variante Netzausbau langfristig genutzt werden. Die Lebensdauer des

Batteriespeichers ist von der Zyklenzahl durch die Nutzung abhängig [14] und wird auf Basis der Simulationen abgeschätzt. Dabei ergibt sich für die Variante Batteriespeicher eine voraussichtliche Lebensdauer von 10 Jahren unabhängig der Anzahl Ladesäulen. Die Lebensdauer bei der Variante Regenerativ steigt mit steigender installierter Leistung des Windparks von 8,5 auf 12,5 Jahre an und beträgt im Durchschnitt ebenfalls 10 Jahre. Diese Abschätzungen basieren auf dem zuvor erstellten Modell des Nutzerverhaltens und bei der Variante Regenerativ zusätzlich auf dem Modell der eingespeisten Leistung des Windparks. Weicht die tatsächliche Nutzung bzw. die tatsächliche Einspeisung von diesem Modell ab, ändert sich die Belastung und somit die Lebensdauer des Batteriespeichers. Da die Auswirkung der Abweichungen nicht vorhergesagt werden können, bleibt bei der Investition eine Unsicherheit bestehen.

Nur an 50 Stunden im Jahr werden alle Ladesäulen einer Schnellladestation genutzt, dreiviertel des Jahres hingegen keine. Für die Variante Netzausbau wird also ein großer Aufwand betrieben, um die Anschlussleistung für wenige Stunden im Jahr anzupassen. Dies spiegelt sich in der geringen Auslastung der Betriebsmittel von unter 8% wider. Durch die Verwendung eines Batteriespeichers bei der Variante Batteriespeicher werden die Leistungsspitzen geglättet: Der hohe Leistungsbedarf weniger Stunden wird vom Batteriespeicher abgedeckt, der die benötigte Energie in Stunden ohne Nutzung der Schnellladestation zwischenspeichert. Dadurch wird die maximale Leistung am Netzanschluss abgesenkt, sodass kein aufwändiger Ausbau erforderlich und der Transformator mit bis zu 30% höher ausgelastet ist.

Durch den direkten Bezug der gesamten benötigten Leistung aus dem Netz entstehen bei der Variante Netzausbau abgesehen von den geringen Übertragungsverlusten und den Verlusten beim Laden der Elektrofahrzeuge keine zusätzlichen Verluste. Die Zwischenspeicherung der Energie in einem Batteriespeicher führt hingegen zu zusätzlichen Verlusten sowohl beim Ein- als auch beim Ausspeichern. Diese erhöhen den Energieverbrauch der Schnellladestation bei der Variante Batteriespeicher im Vergleich zur Variante Netzausbau um etwa 0,5% bis 5% und bei der Variante Regenerativ um bis zu 15%.

3.3 Kosten

Bei den Kostenbetrachtungen in dieser Arbeit werden die Investitions- und Betriebskosten der Ladesäulen nicht berücksichtigt, da zum Umfang dieser Kosten zum heutigen Zeitpunkt aufgrund der geringen Erfahrung noch keine Aussage getroffen werden kann. Für die Untersuchungen und den anschließenden Vergleich der verschiedenen Varianten können die Kosten der Ladesäulen außer Acht gelassen werden, da sie unabhängig vom Anschluss bei jeder untersuchten Variante gleich sind.

Die Kosten für den Netzanschluss setzen sich aus fixen und variablen Kosten zusammen: Die fixen Kosten enthalten die Investitionskosten, welche mit der Annuitätenmethode auf jährliche Kosten übertragen werden, und die jährlichen Betriebskosten. Diese müssen unabhängig der tatsächlichen Nutzung der Schnellladestation gezahlt werden. Die variablen Kosten sind die Netzentgelte und Stromkosten, welche vom Energieverbrauch, also von der Nutzung der Schnellladestation abhängen.

Während die Variante Netzausbau und die Variante Batteriespeicher auf der gleichen Ausgangslage eines bereits vorhandenen öffentlichen Netzes und einer Transformatorstation aufbauen, erfordert die strikte Trennung vom öffentlichen Netz bei der Variante Regenerativ den Aufbau eines eigenen Netzes. Dadurch entstehen höhere jährliche Fixkosten und niedrigere variable Kosten, sodass nur der Vergleich der jährlichen Gesamtkosten pro Kilowattstunde aussagekräftig ist.

Bei der Variante Netzausbau teilen sich die Investitionskosten auf die zusätzlichen Transformatoren mit ihren Stationsgebäuden und Schaltanlagen sowie den eventuellen Kabelausbau auf. Die *Deutsche Energie-Agentur* ermittelte in ihrer „Verteilnetzstudie“ [15] durchschnittliche Investitionskosten von 30.000€ für eine komplette Transformatorstation und 80.000€/km für den Kabelausbau. Die Investitionskosten werden mit der Annuitätenmethode auf jährliche Kosten umgelegt, wobei eine Lebensdauer von 30 Jahren und ein Zinssatz von 5% angenommen werden. Weitere jährliche Fixkosten sind die Betriebskosten der Transformatoren, die mit 2% ihrer Investitionskosten angesetzt werden. [13]

Die Investitionskosten für den Batteriespeicher der Variante Batteriespeicher setzen sich aus kapazitätsspezifischen Kosten für die Zellen, das Batteriemanagementsystem und das Gehäuse und leistungsspezifischen Kosten für die Umrichter und Leistungsschalter zusammen. Derzeit belaufen sich die kapazitätsspezifischen Kosten für große Batteriesysteme auf 350€/kWh und die leistungsspezifischen Kosten auf 100€/kW [16]. Bei der Berechnung der Annuität ist hier auf die niedrigere Lebensdauer des Batteriespeichers von voraussichtlich 10 Jahren zu achten. Jährliche Betriebskosten belaufen sich auf 14€/kW [17].

Zur Berechnung der variablen Kosten dieser beiden Varianten wurden die Netzentgelte der zehn größten Verteilnetzbetreiber Deutschlands für 2017 gemittelt, die Benutzungsstunden jeder Variante abhängig der Anzahl Ladesäulen berechnet und somit die pro Jahr zu zahlenden Netzentgelte ermittelt. Aufgrund der entnommenen Jahresenergie zwischen 0,5 und 1,5 GWh gelten für Schnellladestationen voraussichtlich Strompreise wie für die Industrie. Der *Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft* ermittelte in der „Strompreisanalyse 2017“ [18] einen durchschnittlichen Strompreis von 17 ct/kWh für Großverbraucher.

Die fixen Jahreskosten der Variante Regenerativ sind höher als bei den vorangegangenen Varianten, da sowohl Investitionskosten für den Aufbau eines eigenen Netzes bis zum Windpark, als auch für den Batteriespeicher anfallen. Dabei werden die gleichen Kosten und Annahmen verwendet. Die höheren Fixkosten werden durch niedrigere variable Kosten ausgeglichen, da durch die Trennung vom öffentlichen Netz keine Netzentgelte und kein regulärer Strompreis gezahlt werden muss. Stattdessen fallen für die Energieerzeugung im Windpark sogenannte Stromgestehungskosten an, welche die Investitions- und Betriebskosten des Windparks beinhalten. Das *Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik* [19] gibt für das Jahr 2016 mittlere Stromgestehungskosten von 7 ct/kWh für Onshore-Windparks an.

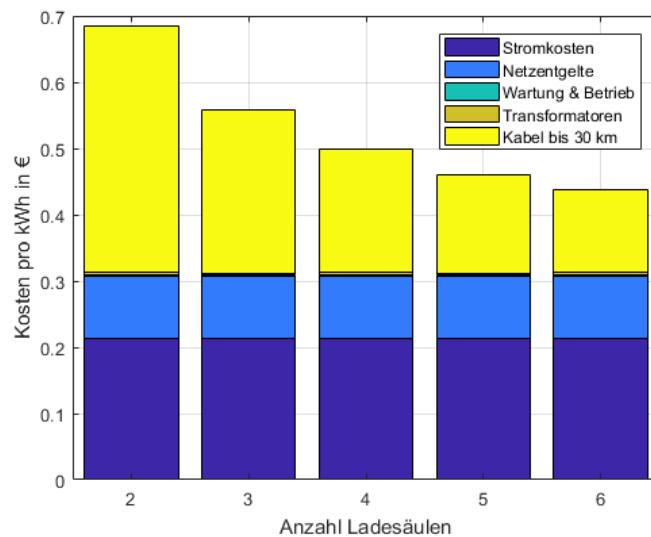


Abbildung 6: Kosten der Variante Netzausbau pro geladenen Kilowattstunde

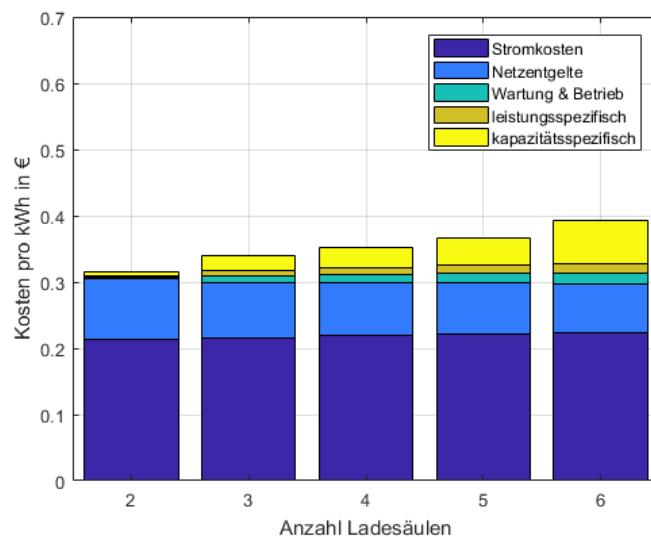


Abbildung 7: Kosten der Variante Batteriespeicher pro geladene Kilowattstunde

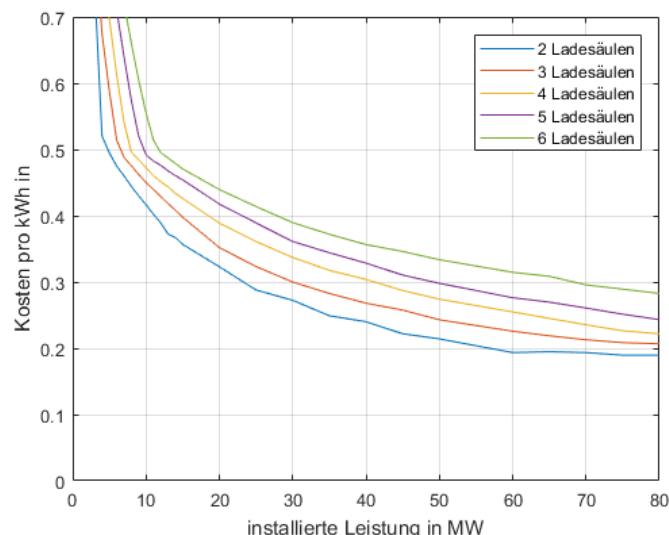


Abbildung 8: Kosten der Variante Regenerativ pro geladene Kilowattstunde

Die Berechnungen führen zu den in Abbildung 6 bis Abbildung 8 dargestellten Gesamtkosten pro geladener Kilowattstunde. Für die Variante Netzausbau ergeben sich Kosten von mindestens 31 ct/kWh, wenn kein Kabelausbau notwendig ist, bis maximal 69 ct/kWh bei 30 km notwendigen Kabelausbau und zwei Ladesäulen. Bei der Variante Batteriespeicher steigen die Gesamtkosten von 31 ct/kWh bei zwei Ladesäulen bis auf 39 ct/kWh bei sechs Ladesäulen an, da die Kapazität des Batteriespeichers bei einer stärkeren Nutzung der Schnellladestation ansteigt. Die Kosten der Variante Regenerativ hängen nicht nur von der Anzahl Ladesäulen, sondern auch von der installierten Leistung des Windparks und dessen Entfernung zur Schnellladestation ab. Dadurch liegen sie zwischen 19 ct/kWh bei einem großen Windpark und kurzer Entfernung und bei über 70 ct/kWh bei einem kleinen Windpark oder einer großen Entfernung.

3.4 Empfehlungen

Soll an einer wenig befahrenen Autobahn eine Schnellladestation errichtet werden, kann von einer geringen Nutzung ausgegangen werden, sodass zwei Ladesäulen für eine komfortable Nutzung mit geringen Wartezeiten ausreichen. Schnellladestationen an solchen Autobahnen liegen abseits großer Städte im ländlichen Raum mit einem schwach ausgebauten Netz und großen Entfernungen zwischen den Umspannwerken. Somit ist eine Überlastung der Kabel durch die Schnellladestation wahrscheinlich und ein teurer Ausbau des Netzes für die Variante Netzausbau erforderlich. Da der Batteriespeicher für die Variante Batteriespeicher aufgrund der geringen Nutzung nur eine kleine Kapazität von ungefähr 50 kWh haben muss, ist in diesem Fall diese Variante deutlich günstiger. Ist ein nahegelegener Windpark mit 20MW installierter Leistung vorhanden, ist eine Schnellladestation der Variante Regenerativ günstiger. Bei größeren Windparks sinken die Kosten, da ein kleinerer Batteriespeicher ausreicht.

In der Nähe von Ballungszentren und auf den Hauptstrecken sind mehr Fahrzeuge unterwegs, und die Schnellladestation wird von mehr Fahrzeugen genutzt. Durch die dann notwendigen sechs Ladesäulen steigt die Leistung der Schnellladestation, sodass die Kosten der Variante Netzausbau sinken und die der Variante Batteriespeicher steigen. Da in der Nähe großer Städte das Netz besser ausgebaut und die Entfernungen zum Umspannwerk geringer sind, ist die Variante Netzausbau günstiger. Hier ist die Variante Regenerativ erst ab einer Leistung des Windparks von 45MW bei einem 1km langen Kabel günstiger.

Für Schnellladestationen mit drei bis fünf Ladesäulen kann keine allgemein geltende Empfehlung abgegeben werden. Diese Schnellladestationen mit durchschnittlicher Nutzung werden in gemischten Gebieten aufgestellt, wo keine Voraussage über den notwendigen Ausbau des Netzes getroffen werden kann. Somit kann der voraussichtlich günstigste Preis der Variante Netzausbau oder Batteriespeicher nicht bestimmt und keine Empfehlung für die notwendige Größe des Windparks getroffen werden. Deshalb sollten bei der Auslegung der Schnellladestation alle Varianten berücksichtigt und mit den vor Ort geltenden Strompreisen und Netzentgelten bzw. Stromgestehungskosten untersucht werden.

Jedoch sollten nicht allein die Kosten im Vordergrund stehen. Die Energiewende im Verkehr befindet sich noch in der Anfangsphase und sowohl die Elektrofahrzeuge als auch die Ladetechnik werden zurzeit noch entwickelt. Um dies zu beschleunigen, müssen die Rahmenbedingungen verbessert werden. Dazu gehört der Aufbau eines flächendeckenden

Schnellladenetzes, sodass Langstreckenelektromobilität möglich wird. Dies erhöht den Anreiz des Umstiegs auf ein Elektrofahrzeug, was wiederum die technische Entwicklung fördert. Um die Anfangsinvestitionen zu senken und Fehlinvestitionen zu vermeiden, sollten die ersten Schnellladestationen klein und flexibel aufgebaut sein. Zu Anfang reichen wenige Ladesäulen pro Schnellladestation, da nur wenige Elektrofahrzeuge diese nutzen werden. Steigt die Zahl der Elektrofahrzeuge dann durch die Anreizerhöhung an, müssen die Schnellladestationen vergrößert werden. Für dieses Vorgehen eignet sich die Variante Batteriespeicher am besten, da die Leistung und Kapazität des Batteriespeichers aufgrund seines modularen Aufbaus einfach angepasst werden kann, während bei der Variante Netzausbau das Netz aufwändig ausgebaut werden muss. Wenn in zehn Jahren die Batteriespeicher erneuert werden müssen, ist der Umstieg auf die Elektromobilität fortgeschritten und es konnten Daten und Erfahrungen gesammelt werden. Mit diesen können dann die Schnellladestationen den neuen Gegebenheiten angepasst und bei der Auslegung alle Varianten untersucht werden, um die dann günstigste Variante zu wählen.

Netzausbau

- Kosten: 31 – 70 ct/kWh
- abhängig von Kabellänge zum UW
- bei großen Schnellladestationen günstiger
- + keine zusätzl. Verluste
- geringe Auslastung der Betriebsmittel

Batteriespeicher

- Kosten: 31 – 40 ct/kWh
- abhängig von Anzahl Ladesäulen
- bei kleinen Schnellladestationen günstiger
- + modularer Aufbau möglich
- zusätzliche Verluste

Regenerativ

- Kosten: 19 – 70 ct/kWh
- abhängig von Größe des Windparks
- ab 20 MW installierter Leistung günstiger
- + garantiert grüner Strom
- + modularer Aufbau möglich
- Unsicherheit bei Auslegung

4 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Umwelt Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit, „Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung“, Berlin, 2016.
- [2] V. Quaschning, „Sektorkopplung durch die Energiewende - Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung“, Berlin, 2016.
- [3] P. Ahmels und P. Brandmeyer, „Sektorenkopplung - Klimaschutz mit Strom für Wärme und Verkehr“, Berlin, 2017.
- [4] M. Günther, *Energieeffizienz durch erneuerbare Energien - Möglichkeiten, Potenziale, Systeme*. Kassel: Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [5] A. Sauer und T. Bauernhansel, *Energieeffizienz in Deutschland - eine Metastudie*, 2. Auflage. Stuttgart: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [6] Bundesministerium für Umwelt Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit, „Erneuerbar mobil - Marktfähige Lösungen für eine klimafreundliche Elektromobilität“, Berlin, 2014.
- [7] W. Hennings und J. Linssen, „Elektromobilität“, in *Energietechnologien der Zukunft*, Wiesbaden, 2015, S. 447–473.
- [8] A. Kampker, D. Vallée, und A. Schnettler, *Elektromobilität - Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Aachen: Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [9] V. Reber, „Neue Möglichkeiten durch Laden mit 800 Volt“, *Porsche Eng. Mag.*, Nr. 1, S. 10–15, 2016.
- [10] R. Follmer *u. a.*, „Mobilität in Deutschland 2008“, Bonn, 2008.
- [11] B. Harrer und S. Scherr, „Tagesreisen der Deutschen“, München, 2013.
- [12] Nationale Plattform Elektromobilität, „Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland“, Berlin, 2015.
- [13] A. Sillaber, *Leitfaden zur Verteilnetzplanung und Systemgestaltung*. Innsbruck: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [14] G. Fuchs, B. Lunz, M. Leuthold, und D. U. Sauer, „Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität“, Aachen, 2012.
- [15] A.-C. Agricola *u. a.*, „dena-Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030.“, Berlin, 2012.
- [16] T. Aundrup, H.-P. Beck, A. Becker, A. Berthold, A. Conreder, und D. Echternacht, „Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene“, Frankfurt am Main, 2015.
- [17] H. Kondziella, K. Brod, T. Bruckner, S. Olbert, und F. Mes, „Stromspeicher für die Energiewende - eine akteursbasierte Analyse der zusätzlichen Speicherkosten“, *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, Bd. 37, S. 249–260, 2013.
- [18] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., „BDEW-Strompreisanalyse Mai 2017“, Berlin, 2017.
- [19] K. Rohrig, „Windenergie Report Deutschland 2016“, Kassel, 2017.