



Grafik: Alstom/T. Tenschert

Abb. 1: Akteure und Komponenten der Energieversorgung von Stadtbahnen und Elektrobusen.

Energieversorgung für Bahn und Bus

GUV+ nutzt Bestandsinfrastruktur für Elektromobilität

Dr.-Ing. Sven Klausner, Dipl.-Ing. Claudius Jehle, Dresden; Dr.-Ing. Carsten Söffker, Dipl.-Ing. Raphael N. Hofstädter, Salzgitter; Dipl.-Ing. Jens Thiede, Dresden

Bereits 1990 folgte das Inter-governmental Panel on Climate Change, dass vom Menschen verursachte Emissionen den natürlichen Treibhauseffekt verstärken. Dadurch wird sich die durchschnittliche Temperatur der Erdoberfläche erhöhen [1]. Die Europäische Union strebt eine Reduzierung der Kohlendioxid-Emissionen an. Dies soll unter anderem durch höhere Energieeffizienz von Produkten und Dienstleistungen erreicht werden [2]. Um eine gute Luftqualität sicherzustellen, gibt es durch das Göteborg-Protokoll weitere gesetzliche Vorgaben [3]. Die Effizienz des Transportsektors ist besonders wichtig für den gesamten Energiebedarf, denn etwa 30 Prozent der gesamten in Deutschland verbrauchten Energie werden dafür aufgewendet [4]. Bezogen auf das urbane Verkehrsaufkommen hat der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) eine überproportionale Bedeu-

tung, weil sein Anteil mit steigender Bevölkerungszahl wächst und in Ballungsräumen bis zu 40 Prozent betragen kann.

Die Effizienz der schienengebundenen Verkehrsnetze konnte in den vergangenen Jahrzehnten deutlich gesteigert werden. So sind heute (fast) alle elektrisch betriebenen Schienenfahrzeuge in der Lage, die beim Bremsen frei werdende Energie zurück zu speisen. Die Durchkopplung der Fahrleitungsnetze war daraufhin ein konsequenter Schritt, diese Energie über Speisebezirksgrenzen hinaus nutzen zu können. Mit moderner Technik ist es nun auch möglich, die bislang nicht genutzte Bremsenergie in das Mittelspannungsnetz abzugeben [5]. All das hat dazu beigetragen, dass der schienengebundene Verkehr das energieeffizienteste Transportmittel ist [6]. Da auch andere Sektoren an Effizienzsteigerungen arbeiten, kann der ÖPNV nur durch bestän-

dige Anstrengungen auf diesem Gebiet führend bleiben.

Durch das Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG) wurde ab dem Jahr 2000 die Energiewende eingeleitet. Die verstärkte Nutzung von Wind-, Wasser- und Sonnenenergie ist neben einer steigenden Energieeffizienz die wichtigste Komponente, um den Kohlendioxidausstoß zu senken. Heute wird bereits jede dritte Kilowattstunde CO₂-frei erzeugt. Die Einbindung von erneuerbaren Energien ist aufgrund ihrer wechselhaften Verfügbarkeit für das Stromnetz herausfordernd. So kommt es vor, dass erneuerbare Energien nicht vollständig eingespeist werden können und die Erzeugeranlagen abgeregelt oder gar abgeschaltet werden müssen. Durch die gute Planbarkeit des Verbrauchs kann der ÖPNV zur verstärkten Nutzung von erneuerbaren Energien beitragen.

Auch die Automobilindustrie befasst sich seit einiger Zeit (wieder) mit elektrisch angetriebenen Fahrzeugen. Viele Hersteller haben Elektro- oder Plug-in-Hybridmodelle präsentiert oder angekündigt. In Deutschland sind mit steigender Tendenz mehr als 10.000 Elektroautos zugelassen. Diese Entwicklung wird durch die Bundesregierung direkt gefördert. Eine stärkere Verbreitung von Elektroautos führt zu sinkenden Preisen der Batterie, der teuersten Komponente eines Elektrofahrzeugs, was wiederum die Umstellung von Dieselsebussen auf Elektrobusse begünstigt. Die größer werdende Anzahl von Elektrofahrzeugen – ganz gleich ob Bus, Lkw oder Pkw – benötigen eine passende Ladeinfrastruktur, die in ähnlicher Form bei Schienenbahnen bereits vorhanden ist. Kann sie für den elektrischen Stadtverkehr genutzt werden?

Die Umfrage des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen ist ein erster wichtiger Schritt in diese Richtung [7]. Die ÖPNV-Betreiber haben mehr als 100 Jahre Erfahrung mit elektrischem Stadtverkehr. Dieses Wissen sollte beim weiteren Ausbau genutzt werden.

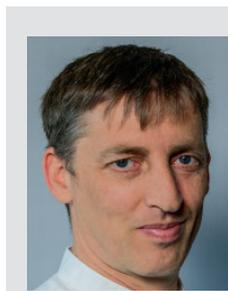
Aus diesen Herausforderungen können für den Nahverkehr folgende Ziele abgeleitet werden:

- Vorhandene Rekuperationsenergie der Stadtbahnen soll vollständig genutzt werden.
- Existierende (Bahn-)Infrastruktur soll von Elektrofahrzeugen mitbenutzt werden können.
- Netzdienliche Maßnahmen sollen gefördert werden, um eine stärkere Nutzung der erneuerbaren Energien zu begünstigen.

Mit der Umsetzung dieser Ziele wird der ÖPNV seine führende Rolle als Anbieter von umweltfreundlichen Mobilitätskonzepten weiter ausbauen können.

Warum gibt es keine „einfache Lösung“?

Ein Verkehrsbetrieb, in Abbildung 1 oben rechts dargestellt, betreibt in einer Stadt Busse und Bahnen. Die Stadtbahn bezieht die Energie aus der Fahrleitung, die durch ein Gleichrichterunterwerk (GUW) gespeist wird (Abb. 1 Mitte links). Die GUW sind mit dem Fahrleitungsnetz über die Stadt verteilt. Moderne Schienenbahnen speisen Energie zurück, dennoch bleiben mancherorts bis zu 30 Prozent der Brems-



Zum Autor

Dr.-Ing. Sven Klausner (48) ist seit 2002 am Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme mit Grundlagenermittlung und Technologieentwicklung in den Themenfeldern Linienbusse mit vollelektrischer Betriebsführung, vollautomatisierter Energietransfer mit hoher Leistung und stationäre Energiespeichertechnologie beschäftigt. Zwischenzeitlich promovierte er mit dem Thema „Thermische Beanspruchung von Leistungshalbleitern in Fahrzeugen des ÖPNV“ an der Technischen Universität Dresden.



Zum Autor

Dipl.-Ing. Claudius Jehle (30) ist seit 2013 am Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme als Gruppenleiter für Speicher und Wandler beschäftigt. Er studierte Maschinenbau mit der Spezialisierung Mechatronik und Regelungstechnik an den Technischen Universitäten München und Delft.



Zum Autor

Dr.-Ing. Carsten Söffker (44) ist seit 1998 bei Alstom Transport Deutschland beschäftigt. Nach verschiedenen Tätigkeiten in den Bereichen Antriebstechnik, Validierung und Zulassung ist er heute für das Energiemanagement von Schienenfahrzeugen und Infrastruktur zuständig. Zwischenzeitlich promovierte er mit dem Thema „Konzeption und Erprobung eines Schwungradspeichers in einem dieselelektrischen Triebzug“ an der Technischen Universität Clausthal. Zudem leitet er den Fachbereich „Bahnen mit elektrischen Antrieben“ der Energietechnischen Gesellschaft im VDE. Er studierte Maschinenbau mit Fachrichtung Elektrotechnik an der TU Clausthal.



Zum Autor

Dipl.-Ing. Raphael N. Hofstädter (32) ist seit 2014 im Bereich Innovationen für die Alstom Transport Deutschland GmbH tätig. Er studierte Verfahrenstechnik. Während seiner anschließenden Anstellung am Institut für Mechanik und Mechatronik arbeitete er am Projekt EcoTram mit.



Zum Autor

Dipl.-Ing. Jens Thiede (54) ist seit August 2009 Instandhaltungsbereichsleiter Bahnstromversorgung bei den Dresdner Verkehrsbetrieben AG. Nach einer Ausbildung zum Elektromonteur bei der Deutschen Reichsbahn, studierte er an der Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ Dresden die Fachrichtung Elektrische Bahnen. Von 1992 bis 2003 arbeitete er als Ingenieur für Gleich- und Wechselstrombahnen in der Industrie, ab 2004 war er Gruppenleiter bei der Elbas GmbH.

nergie ungenutzt. Die Umstellung von Diesel- auf Elektrobusse macht die Errichtung von (Schnell-) Ladestationen auf der Strecke nötig (Abb. 1 unten), sofern die Busse nicht ausschließlich in Depots geladen werden. Die Aufgabe des Energieversorgungsunternehmens (Abb. 1 oben links) ist, symbolisiert durch ein Windkraftwerk, hierfür verstärkt erneuerbare Energien zu

nutzen. Deren wechselnde Verfügbarkeit muss kompensiert werden, anderenfalls ändert sich die Netzfrequenz. Nur wenn im Stromnetz der Verbrauch immer dem Angebot entspricht, werden diese Abweichungen in engen Grenzen gehalten.

An dem eben beschriebenen System lässt sich erläutern, wie die aktuellen Herausfor-

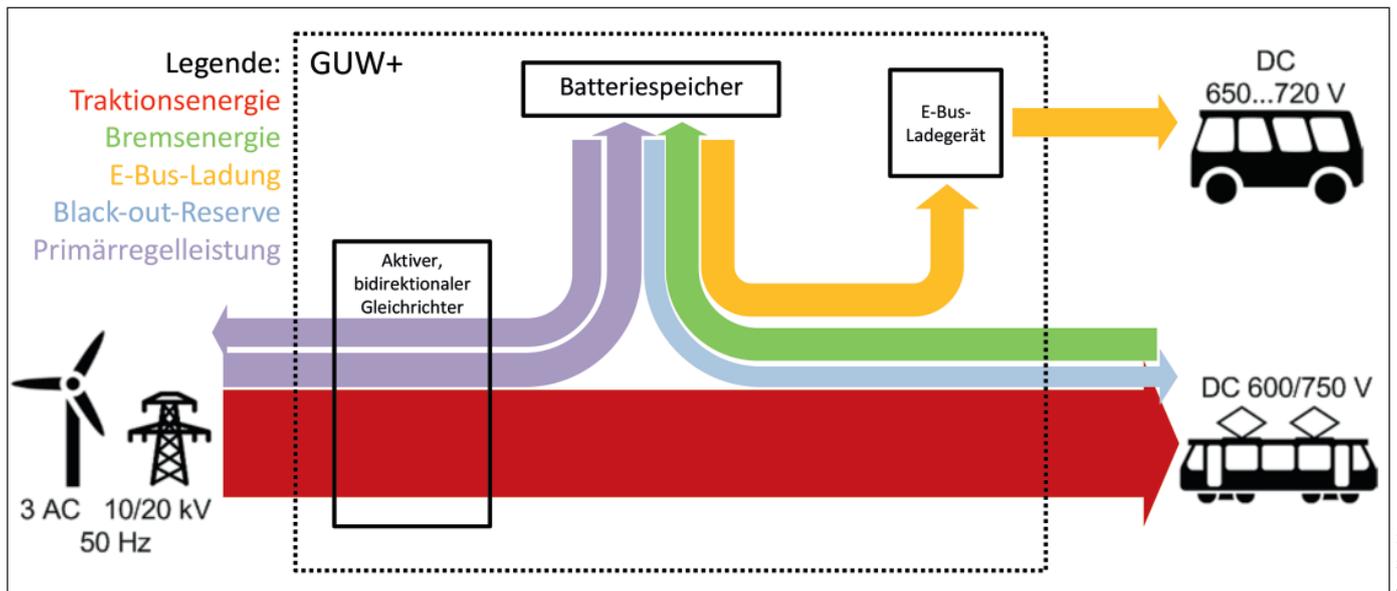


Abb. 2: Wesentliche Energieflüsse aufgrund des neuartigen Versorgungskonzeptes G UW+.

derungen gelöst werden können. Für die Umsetzung der ersten Herausforderung – möglichst vollständige Bremsenergieerückgewinnung – erscheint es sinnvoll, die überschüssige Energie stationär im Unterwerk zu speichern. Die Speicherung von Energie in Schwungrad- und Hochleistungskondensator wurde in Deutschland schon mehrfach demonstriert, wie beispielsweise in Zwickau, Dessau [8], Hamburg [9], Bielefeld [10] und Freiburg [11]. Aus den Quellen sind Amortisationszeiten von deutlich über zehn Jahren zu entnehmen. Keine wirkliche Alternative – selbst bei möglicherweise höheren Wirkungsgraden – stellen mobile Energiespeicher dar, die in die Bahnen integriert werden. Diese Lösung kann in einem etablierten Netz nur langfristig effektiv umgesetzt werden, indem ein Fahrzeugtausch erfolgt.

Ein stationärer Energiespeicher kann auch aus „alten“ Busbatterien aufgebaut werden (2nd-use Batterien). Das senkt die notwendige Investition für den Speicher. Eine zusätzliche Amortisationsmöglichkeit kann durch die Erbringung von Primärregelleistung (PRL) erzielt werden, was die zweite Herausforderung darstellt. Dazu unten mehr.

Die dritte Herausforderung besteht darin, Elektrofahrzeugen die Mitbenutzung existierender (Bahn)infrastruktur zu erlauben. Das verspricht zunächst erhebliche Vorteile, denn die G UW des Verkehrsbetreibers sind über die Stadt verteilt. Wenn eine Schnellladestation für einen Bus in der Nähe eines G UW geschaffen werden soll, braucht dafür offensichtlich kein (zusätzlicher) Anschluss an das Mittelspannungs-

netz hergestellt zu werden. Die sinkenden Investitionen können die Verbreitung der Elektrobusse begünstigen. Ähnliches gilt auch für Elektroautos, auch wenn hier die zu erwartenden Ladeleistungen geringer sind; andererseits ist die Anzahl der Ladepunkte deutlich höher.

Können die genannten Herausforderungen so einfach gemeistert werden? Die einzelnen Komponenten müssten nur noch zusammengesetzt werden? Die Lösung ist leider nicht ganz so einfach. Die Komponenten existieren zwar, müssen aber für den vorliegenden Fall angepasst und aufeinander abgestimmt werden. Des Weiteren muss ein ganzheitlicher Regelansatz gefunden werden, der die Möglichkeiten und Beschränkungen adäquat berücksichtigt. Die technischen Aufgaben, die zu lösen sind, sind in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Zudem sind technische Aufgaben nicht die einzigen, die gelöst werden müssen, denn es kommen noch rechtliche Herausforderungen hinzu. Dazu muss man die technische Brille gegen eine juristische tauschen und die auftretenden Energieströme aus energierechtlicher Sicht betrachten. Für jeden Energiestrom werden die Quelle (der Ort der Energieerzeugung) und die Senke (der Ort des Letztverbrauchs) ermittelt. Sodann kann anhand der einschlägigen Gesetze, Verordnungen und Merkblätter bewertet werden, welche Stromkostenbestandteile anfallen und ob gegebenenfalls eine Reduzierung der Abgabepflicht möglich ist. Bei der vorläufigen rechtlichen Bewertung von G UW+ sind einige Erkennt-

nisse aufgetreten, die für Stadtbahnnetze insgesamt von Interesse sind. Eine genauere Betrachtung an dieser Stelle würde jedoch den Rahmen sprengen; stattdessen sei auf die kommende Fachtagung des Ausschusses für Elektrische Anlagen im Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (AEE des VDV) in Dresden verwiesen [12].

Worin unterscheidet sich G UW+ von bisherigen Ansätzen?

Das Fraunhofer IVI Dresden arbeitet zusammen mit einem Industriekonsortium an der Umsetzung eines Konzeptes für die gemeinsame Energieversorgung für E-Busse und ÖPNV-Bahnen, welches die Integration netzdienlich wirksamer Energiespeicher in Gleichrichterunterwerke mit bidirektionalem Netzanschluss und eine von der Bahnenergieversorgung galvanisch getrennte Energieversorgung von E-Bus-Ladestationen vorsieht. Abbildung 2 illustriert die wesentlichen Energieflüsse für den erarbeiteten Systemansatz. Im Folgenden wird beschrieben, welche Aspekte der zukünftigen gemeinsamen Energieversorgung von Stadtbahnen und Elektrobusen das Konzept G UW+ vorteilhaft löst, dabei wird ebenfalls auf bestehende rechtliche Rahmenbedingungen eingegangen und Anpassungsbedarf aufgezeigt.

Nutzung von Bestandsinfrastruktur für die E-Bus-Ladung

Die elektrotechnische Verbindung von weitestgehenden E-Bus-Ladepunkten mit beste-

henden Stadtbahnnetzen ist nicht ohne besondere Maßnahmen möglich. Zum einen können gummibereifte E-Busse mit einfacher Isolation aufgrund der hierfür erforderlichen erhöhten Erdungsanforderungen nicht ohne galvanische Trennung aus dem Bahnenergieversorgungssystem versorgt werden. Andererseits arbeiten die Ladesysteme für batterieelektrische Stadtbusse in einem Eingangsspannungsbereich, welcher aus einem stark belasteten Stadtbahnnetz nicht bereitgestellt werden kann. Neben einer deutlich erhöhten Kabeldimensionierung könnten ebenfalls zusätzliche Gleichspannungssteller zur Erhöhung der Versorgungsstabilität eingesetzt werden. Eine bessere Systemlösung bietet der Einsatz aktiver Gleichrichter im G UW, wodurch bezüglich der E-Bus-Ladung der gleiche Effekt erzielt wird, zusätzlich aber die Leitungsverluste im Stadtbahnnetz sinken.

Aus wirtschaftlicher Sicht kommen für die Umsetzung des Konzeptes *G UW+* vor allem Standorte in Betracht, welche einen möglichst engen örtlichen Bezug zu einer oder mehreren Bushaltestellen (Endpunkten) aufweisen, an welchen die Nachladung von batterieelektrischen Stadtbussen nach dem Prinzip der Gelegenheitsladung erfolgen soll. Abbildung 3 offenbart diese räumliche Nähe zwischen Stadtbahn und Busladestation in Hannover. Ein zusätzlich motivierender Aspekt für die aufgezeigte Modifikation von Bestandsinfrastruktur ist die auf diese Weise mögliche E-Bus-Energieversorgung ohne nennenswerten stadtplanerischen Eingriff.

Selbstverständlich ist eine darüber hinaus gehende Versorgung anderer batterieelektrisch betriebener Verkehrsmittel auf technisch ähnliche Weise möglich. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass der Nahverkehrsbetreiber durch eine solche Maßnahme zum Stromlieferanten würde, was Konsequenzen bezüglich seiner energiewirtschaftlichen und steuerrechtlichen Einordnung und damit verbundenen Begünstigungen haben kann.

Maximale Bremsenergierückgewinnung

Mit einem im Gleichrichterunterwerk integrierten Batteriespeicher, welcher eine hinsichtlich Speicherkapazität und Leistungsaufnahme ausreichende Dimensionierung aufweist, kann das im Stadtbahnnetz vorhandene Potential ungenutzter Bremsenergie nahezu vollständig gehoben werden. Dieses Potential, immer zu verstehen als prozentualer Energieanteil bezogen auf



Abb. 3: Stadtbahn und Elektrobus am Holweg-Platz in Hannover.

den Traktionsenergiebezug der Fahrzeuge, kann nicht pauschal abgeschätzt werden. Das wirtschaftlich erschließbare Potential unterliegt innerhalb eines Stadtbahnnetzes großen Schwankungen, bedingt neben jahreszeitlichen Einflüssen durch unterschiedliche Netztopologien und vor allem infolge stark differierender Fahrzeugfrequentierung. Aktuelle Untersuchungen der TU Dresden mit einer Mess-Straßenbahn im Netz der Dresdner Verkehrsbetriebe bestätigen diese Annahme [13].

Aus wirtschaftlicher Sicht ist das vorhandene Potential ungenutzter Bremsenergie immer im Verhältnis zu der über das Unterwerk aus dem Energieversorgungsnetz zur Erfüllung der Traktionsaufgabe bezogenen Energie zu betrachten. Im Sinne des Energieversorgungskonzeptes *G UW+* können überschlägig Potentiale ab 15 Prozent ungenutzter Bremsenergie als relevanter Beitrag zur Amortisation der zusätzlichen Investition betrachtet werden.

Verstetigung des Energiebezugs

Die absoluten Leistungsspitzen eines Jahres, nach denen sich der Preis für den Bezug elektrischer Energie richtet, treten erfahrungsgemäß nur an sehr wenigen Tagen im Jahr auf. Folglich müsste zu deren Reduktion eine große Speicherkapazität vorgehalten werden, die de facto selten benötigt wird. Eine nochmals deutliche Verschärfung dieses Aspektes aus wirtschaftlicher Sicht ergibt sich, wenn die einzelnen Energiebezugspunkte (G UW) am Mittelspannungsnetz gegenüber dem Energieversorger zu einem virtuellen Anschlusspunkt zusammengefasst sind (Pooling).

An das Mittelspannungsnetz angebundene E-Bus-Ladestationen können jedoch nicht die gesetzlichen Rahmenbedingungen für eine Poolbildung von Energiebezugspunkten erfüllen, weil nach § 17 Absatz 2a der Stromnetzentgeltverordnung [14] deren galvanische Verbindung auf der Lastseite eine notwendige Bedingung dafür ist.

Die Absenkung von Leistungsspitzen des Stadtbahnnetzes würde nach überschlägiger Betrachtung sehr hohe Speicherinhalte erfordern. Dagegen erscheint die Pufferung von E-Bus-Ladestationen durch einen Batteriespeicher nach dem Energieversorgungskonzept *G UW+* durchaus realistisch. Die Ursache hierfür ergibt sich aus der diskontinuierlichen Bereitstellung von Energie an den E-Bus-Ladestationen, welche mit dem im stationären Energiespeicher ohnehin vorzuhaltenden Arbeitsbereich bedient werden kann, da nach einer Busladung in aller Regel einige Minuten bis zum nächsten Ladevorgang vergehen. Die Versorgung von E-Bus-Ladestationen kann daher über eine Regelstrategie so gesteuert werden, dass diese nicht zu einer Erhöhung des 15-Minuten-Jahresspitzenwertes des Gleichrichterunterwerkes führt.

Bestehende rechtliche Rahmenbedingungen der Energiewirtschaft, insbesondere die nicht vorhandene Gleichstellung unterschiedlicher Verkehrsmittel nach dem EEG, würden die Umsetzung momentan erschweren, da hierfür alle unterschiedlichen Energieflüsse hinter dem Energiebezugspunkt messtechnisch sauber erfasst werden müssten. Dies ist bei Gleichstromanlagen aber nicht Stand der Technik. Ein wichtiger Schritt für die einfache Umsetz-

barkeit der gemeinsamen Energieversorgung von Stadtbahnen und Elektrobussen wäre somit deren Gleichstellung als öffentliche Verkehrsmittel durch den Gesetzgeber.

Reaktionsmöglichkeit auf Black-Out-Szenarien

Im Herbst 2016 ereignete sich ein Netzausfall im Stadtgebiet von Chemnitz [15] und zuvor in ähnlicher Form in Zürich [16]. Durch solche Ereignisse hat die Ermittlung möglicher Maßnahmen zur Vorhaltung von Havarie-Reserven für Verkehrsunternehmen in den letzten Jahren zusätzlich Bedeutung erlangt.

Ausgehend von der mittleren Anschlussleistung eines Gleichrichterunterwerkes von 2,5 MVA sind in einem solchen Unterwerk nach dem innovativen Energieversorgungskonzept *GUW+* etwa 700 kWh Batteriespeicherkapazität zu integrieren. Somit wären für jedes derart modifizierte *GUW* etwa 350 kWh Energiereserve zur Unterstützung eines Black-Out-Szenarios nutzbar, vorrangig zur Bewegung der Fahrzeuge aus gefährlichen Bereichen wie Brücken, Tunneln oder Kreuzungen in eine „sichere Parkposition“. Somit kann neben der Evakuierung der Fahrgäste auch ein störungsfreier Wiederanlauf gewährleistet werden. Bei entsprechender Verteilung der neuen *GUW+* im Stadtgebiet erscheint die Energiereserve groß genug, um im Falle eines kompletten Netzausfalls auch andere kritische Verbraucher jenseits der Bahnenergieversorgung bedienen zu können.

Wie stellt sich die Gesamtwirtschaftlichkeit für *GUW+* dar?

Das vorherige Kapitel hat aufgezeigt, auf welche Weise das Energieversorgungskonzept *GUW+* Anforderungen der gemeinsamen Energieversorgung von E-Bussen und ÖPNV-Bahnen vorteilhaft löst. Darüber hinaus wurden wirtschaftliche Aspekte dargestellt, welche zur Amortisation der Investitionen bei der Modifikation vorhandener Gleichrichterunterwerke beitragen. Benötigt werden:

- aktive Gleichrichter,
- Batteriespeichersystem mit zugehörigem bidirektionalem Umrichter,
- von der Bahnenergieversorgung galvanisch getrennte Energieversorgung von E-Bus-Ladestationen,

- Erfassung der Energieflüsse innerhalb des *GUW+*,
- Regelungssystem.

Als relevante Amortisationsquellen wurden dabei bisher identifiziert und erläutert:

- Kostenersparnis bei der Versorgung von E-Bus-Ladestationen mit engem örtlichen Bezug zu Gleichrichterunterwerken durch Nutzung von Bestandsinfrastruktur,
- Vermeidung von Leistungsentgelten der E-Bus-Ladestationen durch Leistungspufferung mittels stationärem Batteriespeicher,
- nahezu vollständige Erschließung der vorhandenen ungenutzten Bremsenergie im Speisebereich des Gleichrichterunterwerkes.

Zwei weitere Aspekte, die zur schnelleren Amortisation der zusätzlichen Anlagentechnik führen, werden nachfolgend dargestellt.

Teilnahme am Regelleistungsmarkt (Primärregelleistung)

Das Energieversorgungskonzept *GUW+* sieht die Integration eines Batteriespeichers mit mehreren hundert Kilowattstunden Speicherkapazität in Gleichrichterunterwerken vor. Setzt man im *GUW* darüber hinaus einen bidirektionalen Gleichrichter ein, können diese Speicherkapazitäten ebenfalls zur Teilnahme am Regelleistungsmarkt qualifiziert werden. Eine intensive Auseinandersetzung mit der Thematik lässt vornehmlich die Vorhaltung von Primärregelleistung (PRL) als wirtschaftlich attraktiv erscheinen. Die Erbringung von PRL ist eine durch den Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) vergütete Verpflichtung, mit der angemeldeten Leistung als Quelle/Senke nach vorgegebenen Regeln automatisch die Netzfrequenz zu stabilisieren.

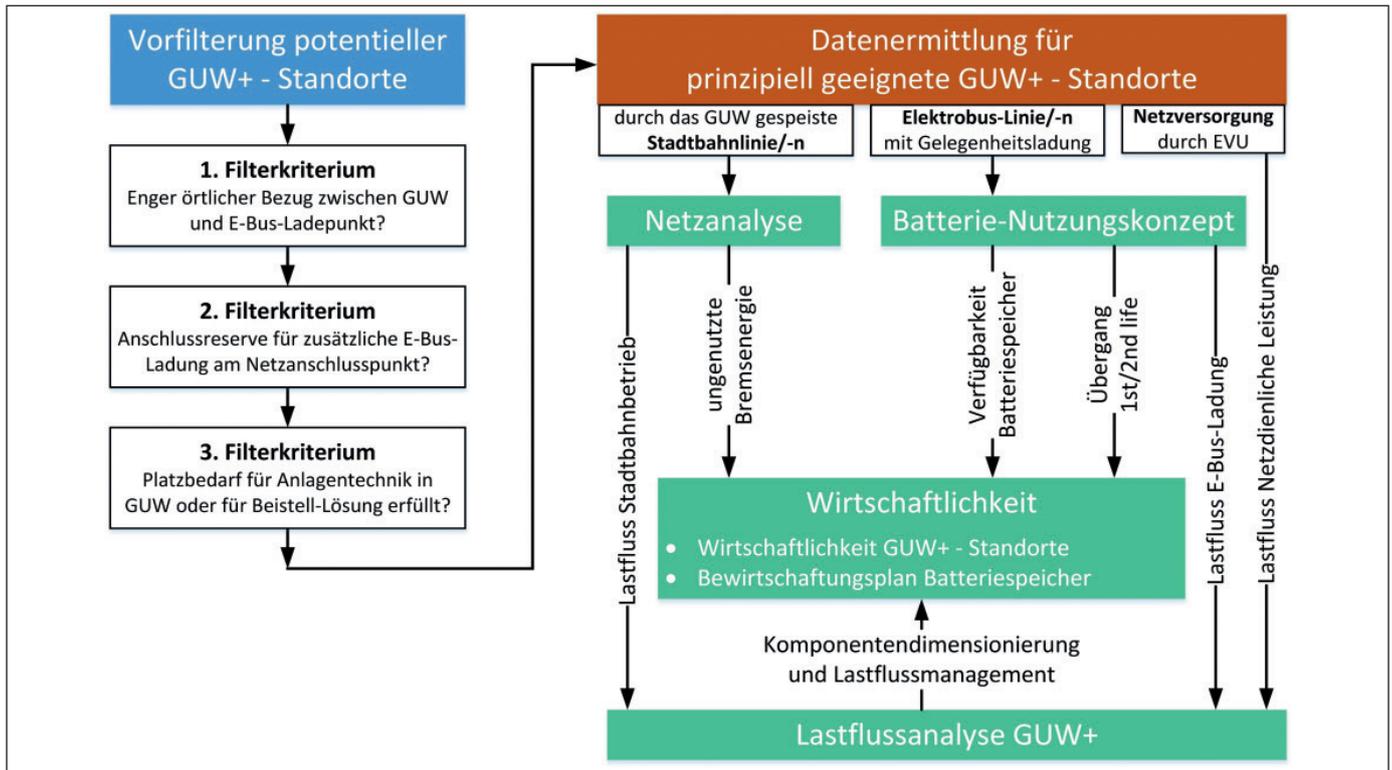
Für die Präqualifikation durch den ÜNB ist durch den Anlagenbetreiber nachzuweisen, dass der Batteriespeicher das sogenannte 30-Minuten-Kriterium einhält. Danach muss die angemeldete Leistung in voller Höhe, zu jeder Zeit für eine halbe Stunde, aus dem Versorgungsnetz aufgenommen respektive in dieses abgeben werden können. Dies bedeutet, dass ein Batteriespeicher mit zum Beispiel 1 MWh Nutzkapazität maximal 1 MW Primärregelleistung erbringen kann. In der Regel wird zur Erweiterung des Arbeitsbereiches oder/und zur Erfüllung weiterer Betriebsziele eine kleinere PRL ge-

genüber dem ÜNB angemeldet. Weil eine Teilnahme am Primärregelleistungsmarkt erst ab einer Gesamtleistung von 1 MW möglich ist, müssten zumindest zwei *GUW+* die PRL bilanziell gemeinsam erbringen. Dazu brauchen sie jedoch nicht beim gleichen Verkehrsbetrieb installiert zu sein.

Die erforderliche Primärregelleistung wird heute noch größtenteils durch Pumpspeicher- und gekoppelte Kraft-Wärme-Kraftwerke erbracht. Bei diversen Energieversorgern, beispielsweise bei der Dresdner Drewag, sind bereits als Pilotanwendungen Batteriespeicherkraftwerke [17] zur Erbringung von PRL im Einsatz. Es bleibt abzuwarten, ob und in welchem Maße der fortschreitende Netzausbau hin zu alternativen Energiequellen den Bedarf an Primärregelleistung generell und der damit verbundene Rückbau konventioneller Kraft-Wärme-Kraftwerke die Nachfrage nach Batteriespeichern zu deren Erbringung erhöhen werden. Dieser Aspekt könnte zu einer Beruhigung des derzeit starken Schwankungen unterliegenden Zuschlagspreises von etwa 2500€/ (MW*Woche) führen, und damit zu einer erhöhten Planungssicherheit für die Betreiber solcher Anlagen.

Nachnutzung von gealterten Traktionsbatterien aus Elektrobussen

Aus Sicht des Verkehrsunternehmens, welches neben dem Betrieb einer Stadtbahn zukünftig Elektrobuse nach dem Prinzip der Gelegenheitsladung [18] (Opportunity Charging) betreiben wird, ist die Kenntnis des Alterungsverhaltens der eingesetzten Speichertechnologie von vorrangiger Bedeutung. Die Anforderungen des Busbetriebs hinsichtlich der zu erfüllenden Umlaufpläne und Nachladekonzeption führen mit zunehmender Nutzungszeit zu einer abfallenden Kapazität und einem gleichzeitig ansteigenden Innenwiderstand der Batteriespeicher. Hinsichtlich der Traktionsanforderungen könnten verfügbare schnellladefähige Batteriespeicher über einen sehr langen Zeitraum im Fahrzeug verbleiben, im Extremfall bis zum Erreichen der Fahrzeuglebensdauer. In den meisten Fällen jedoch ist aus betrieblicher Sicht das entscheidende Kriterium, dass mit den beschriebenen Alterungserscheinungen ein Anstieg der notwendigen Nachladezeit am Linienendpunkt einhergeht. Dies mindert die Versorgungsstabilität des Buslinienbetriebs und bestimmt so den Zeitpunkt für den notwendigen Austausch der Fahrzeugbatterien. Im *GUW+* besteht nun die Möglichkeit zu deren nutzbringender Weiterverwendung als stationärer Energiespeicher.



Grafik: Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme

Abb. 4: Ermittlung wirtschaftlicher Standorte für eine Umrüstung auf GUV+.

Folglich stellt der parallele Betrieb von Stadtbahnen und E-Bussen in einem öffentlichen Nahverkehrsunternehmen ein attraktives Anwendungsszenario für den geschlossenen Batteriespeichereinsatz von der Erstbeschaffung bis zum Erreichen des kalendarischen Lebensendes dar. Werden schon während des Beschaffungsprozesses für E-Busse die Qualität und Quantität der Batteriespeichermodule sowie die mittels Ferndiagnose realisierbare Batteriespeicherüberwachung vorausschauend berücksichtigt, können die zwei wesentlichen Hemmnisse für die Weiterverwendung gealterter Traktionsbatterien in stationären Anwendungen mit überschaubarem Aufwand überwunden werden. Hierdurch verbessern sich die ökonomischen Erfolgsaussichten des innovativen Energieversorgungskonzeptes GUV+ nochmals signifikant.

Dabei ist aus technischer Sicht von vornehmlichem Interesse, dass die Erbringung von PRL im Realbetrieb lediglich mit einer hinsichtlich der Lebensdauer des Batteriespeichersystems zu vernachlässigenden Leistungsbereitstellung verbunden ist.

Vorgehensweise zur Ermittlung der Gesamtwirtschaftlichkeit

Abbildung 4 erläutert das zweistufige Verfahren zur gesamtwirtschaftlichen Be-

wertung, welche Bestandsunterwerke potentiell für GUV+ geeignet sind. Mit dem hierfür beim Fraunhofer IVI entwickelten Werkzeugsatz lassen sich in gleicher Weise Untersuchungen für alle Nahverkehrsunternehmen durchführen, welche am Energieversorgungssystem GUV+ Interesse haben. Hierfür werden ausschließlich vorhandene Daten zur Beschreibung von Bestandsinfrastruktur und Betriebskonzepten für Stadtbahn- und Buslinien benötigt.

Im Rahmen einer Vorfilterung werden die Bestands-GUV mit prinzipieller Eignung für eine Modifikation nach dem Energieversorgungskonzept GUV+ identifiziert. Dabei werden diejenigen Anlagen ausgefiltert, welche

- keinen ausreichenden örtlichen Bezug zu Linienendpunkten von Buslinien haben,
- keine ausreichende Leistungsreserve für deren zusätzliche Versorgung aufweisen oder
- nicht über entsprechende Bauraumreserve zur Integration der notwendigen Anlagenbestandteile im Bestandsgebäude selbst oder für eine Beistell-Lösung auf dem betreffenden Grundstück verfügen.

Die eigentliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgt nach der Kapitalwertmethode für einen Betrachtungszeitraum von 20 Jah-

ren unter Einbezug von Investitionen für Anschaffung und Wartung sowie erzieltm Ertrag und Verzinsung der jeweiligen Rechnungsbestandteile. Der Vergleich erfolgt dabei jeweils mittels zweier Vergleichsszenarien:

- Bestands-GUV wird modernisiert und die in der Nähe vorgesehenen E-Bus-Ladestation/-en werden mit eigenem Anschluss an das MS-Netz errichtet und betrieben.
- Umbau Bestands-GUV zu GUV+ mit 250 kWh nutzbarer Energiespeicherspeicherkapazität je 1 MVA Anschlussleistung und Leistungselektronik zur Versorgung von E-Bus-Ladepunkt/-en mit engem örtlichem Bezug zum untersuchten GUV

Ergebnisse einer beispielhaften Betrachtung

Am Beispiel der Dresdner Verkehrsbetriebe AG (DVB) erfolgte eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für das Energieversorgungskonzept GUV+. Von den 47 gepoolten Gleichrichterunterwerken der DVB weisen nach Anwendung der erwähnten drei Vorfilterkriterien (Nähe zu einer bestehenden Buslinie, Leistungs- und Bauraumreserve) immerhin zwölf GUV eine prinzipielle Eignung für das Energieversorgungskonzept GUV+ auf. Er-

mittelt man für diese Restmenge nach der zuvor beschriebenen Vorgehensweise die Gesamtwirtschaftlichkeit, so weist das Szenario *GUW+* in acht Fällen einen höheren Kapitalwert aus als die separate Errichtung einer E-Bus-Ladestation bei gleichzeitiger Modernisierung des Bestands-GUW.

Diese Zahlen sind das Ergebnis für ein konkretes Szenario und prinzipiell vielversprechend. Mit den Parametern eines anderen Verkehrsbetriebes kann das Verhältnis zwischen lohnenswerten und uninteressanten Standorten jedoch ganz anders aussehen und müsste individuell ermittelt werden. Dagegen sind die beiden nachfolgenden Erkenntnisse allgemeingültig:

- Veränderliche Marktbedingungen (Inflationsrate, Kapitalzinsfuß, PRL-Preis, Arbeits- und Leistungspreis) in einem unter heutigen Gesichtspunkten als realistisch anzunehmenden Wertebereich stellen die Wirtschaftlichkeit des Energieversorgungskonzeptes *GUW+* nicht in Frage.
- Veränderliche Marktbedingungen im Sinne anzunehmender Normalität (Teuerung von Betriebsmitteln oder/und Preissenkung für Technologie) haben positive Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit von *GUW+*.

Fazit und Ausblick

Wesentliches Ziel des innovativen Energieversorgungskonzeptes *GUW+* ist die Integration der neu entstehenden E-Mobilität auf der Straße in die historisch gewachsene Bahnenergieversorgung. Das schafft Synergien und stärkt somit auch die Position des ÖPNV. Bahn, Bus und umweltfreundlicher Individualverkehr verschmelzen in der öffentlichen Wahrnehmung zu unverzichtbaren Bausteinen eines modernen Verkehrskonzeptes in unseren Städten.

Über die technische Machbarkeit hinaus sind auch die aktuellen rechtlichen Rah-

menbedingungen analysiert und Grundlagen für eine ökonomische Bewertung gelegt worden. Aus dieser Position heraus hat sich ein Projektkonsortium gegründet, bestehend aus Nahverkehrsbetreiber, Energieversorger, Batteriehersteller, Unterwerksintegrator, Zertifizierer, Rechtsberater und den Autoren. Es bewirbt sich im Rahmen des aktuellen Förderaufrufs des BMVI/NOW [19] um den Zuschlag für die Entwicklung und Errichtung eines Demonstrators mit voller Leistungsfähigkeit. Anhand dessen soll vor allem die Funktionalität in allen beschriebenen Aspekten nachgewiesen werden, so dass einer Präqualifizierung und Zertifizierung des Serienproduktes nichts im Wege steht.

Für die Erlangung der Marktreife ist es weiterhin wichtig, die spezifischen Anforderungen und Gegebenheiten möglichst vieler Nahverkehrsbetriebe zu berücksichtigen. Dies geht über die bloße Eignungsprüfung hinaus und lässt sich elegant im Rahmen einer Assoziierten Partnerschaft zwischen Projektkonsortium und potenziellem Anwender realisieren. Interessierte Partner sind eingeladen, die Autoren diesbezüglich zu kontaktieren. Dazu bietet auch die kommende VDV-Fachtagung Elektrische Energieanlagen von Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen und Ladeinfrastruktur für elektrische Bussysteme in Dresden [12] eine passende Gelegenheit.

Literatur

- [1] J. T. Houghton, G. J. Jenkins and J. J. Ephraums: Climate Change: The IPCC scientific assessment. In: Intergovernmental Panel on Climate Change, Eds. Cambridge, Great Britain. Cambridge University Press, 1990, ca. 414 pages.
- [2] European Commission. EUROPE 2020: A European strategy for smart, sustainable and inclusive growth. In: Publications Office of the European Union, Brussels (3/2010), EN Version.
- [3] United Nations Economic Commission for Europe. Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, Gothenburg Protocol: Gothenburg (Sweden), 30 November 1999. http://www.unece.org/env/lrtap/multi_hi.html, aufgerufen am 4.12.2017.
- [4] U. Maaßen: Energieflussbild 2015 für die Bundesrepublik Deutschland. In: P.J. AG Energiebilanzen e.V., Berlin Charlottenburg (7/2016). Verfügbar unter www.ag-energiebilanzen.de, aufgerufen am 28. Nov. 2017.
- [5] Gralla, Ch., Söffker, C.: „Smarte“ Bahnenergieversorgung für den Nahverkehr dank Hesop. In: Elektrische Bahnen 114 (2016), H. 6, S. 309–315.
- [6] N. Richter: Daten zum Verkehr – Ausgabe 2012. Umweltbundesamt, Postfach 1406, 06813 Dessau (10/2012). Verfügbar unter: www.umweltbundesamt.de, aufgerufen am 28. November 2017.
- [7] Nutzung von Einrichtungen der Fahrstromversorgung von Straßen-, Stadt- und U-Bahnen. Rundschreiben Nr. 12/2017 (VSTB) und 1/2017 (VOBS). Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V., Kamekestr. 37-39, 50672 Köln.
- [8] Energiespeicher für das Straßenbahnnetz. rosseta Technik GmbH, Karl-Liebknecht-Straße 38, 06862 Roßlau/Elbe (08/2006). <http://www.rosseta.de/texte/bahnsr.pdf>, aufgerufen am 28. November 2017.
- [9] Steinhorst, F., Jonassen, I., Peters, A.: „Mit Schwung Energie sparen - Stationärer Schwungmasse-Energiespeicher bei der Hochbahn AG“. In: NAHVERKEHR 26 (2008), H. 6, S. 16–19.
- [10] Bremsenergie-Rückgewinnung. moBiel GmbH, Postfach 21 90 46, 33697 Bielefeld. <https://www.mobiel.de/unternehmen/umweltschutz/bremsenergie-rueckgewinnung/>, aufgerufen am 28. November 2017.
- [11] Innovationsprojekt ‚Schwungradspeicher‘ wird erprobt. Freiburger Verkehrs AG, Besançonallee 99, 79111 Freiburg. <https://www.vag-freiburg.de/aktuelles/meldung/artikel/innovationsprojekt-schwungradspeicher-wird-erprobt.html>, aufgerufen am 28. November 2017.
- [12] AEE-Fachtagung 2018. <https://www.bekaseminare.de>, aufgerufen am 24.11.2017.
- [13] Beitzschmidt, M., Dürrschmidt, G.: „Energy saving potential in Light Rail Vehicles“. The Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. 5-8 April 2016, Cagliari, Italy.
- [14] Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen. BGBl I 2005, 2225.
- [15] Welche Auswirkungen der Stromausfall in der City hatte. <http://www.freipresse.de/LOKALES/CHEMNITZ/Welche-Auswirkungen-der-Stromausfall-in-der-City-hatte-artikel9642451.php>, aufgerufen am 28.11.2017.
- [16] Fast drei Stunden Blackout – Dieses Kabel legte Zürich lahm! <https://www.blick.ch/news/schweiz/uerich/fast-drei-stunden-blackout-dieses-kabel-legte-zuerich-lahm-id1739910.html>, aufgerufen am 28.11.2017.
- [17] Innovationskraftwerk Dresden-Reick. DREWAG – Stadtwerke Dresden GmbH, Friedrich-List-Platz 2, 01069 Dresden. https://www.drewag.de/wps/portal/drewag/cms/menu_main/privatkunden/die-drewag/energieerzeugung/innovationskraftwerk-dresden-reick, aufgerufen am 28.11.2017.
- [18] Klausner, S.: „Vom Diesel- zum Batteriebus, aber wie?“. In: Verkehr&Technik (2016), Heft 04/05.
- [19] Forschungsförderung für Elektromobilität mit Batterie. https://www.now-gmbh.de/content/4-bundesfoerderung-elektromobilitaet-vor-ort/1-foerderrichtlinie/auftruf-fe-skizzeneinreichung_11_2017_final.pdf, aufgerufen am 24.11.2017.

Zusammenfassung/Summary

Energieversorgung für Bahn und Bus

Mit zunehmender Verbreitung von E-Bussen steigt der Bedarf an effizienter Ladeinfrastruktur. Die bestehende Energieversorgung für Stadtbahnen zu diesem Zweck zu nutzen, bietet Synergien. Ein solcher Ausbau ist unter Beachtung regulatorischer Rahmenbedingungen durchaus umsetzbar. Das Konzept *GUW+* geht konsequent noch einen Schritt weiter und ergänzt das Unterwerk um einen stationären Speicher. Damit lassen sich Energiebedarf und CO₂-Emission des öffentlichen Nahverkehrs weiter senken. Außerdem erhöht sich die Wirtschaftlichkeit durch zusätzliche Amortisationspfade.

Energy supply for rail and bus

With the spreading of e-buses, the need for efficient charging infrastructure is increasing. Using the existing energy supply for light rail vehicles for this purpose offers synergies. Such an expansion appears quite feasible from a regulatory point of view. The *GUW+* concept takes one step beyond and adds a stationary energy storage system to the substation. This will further reduce the energy need and CO₂ emissions of public transport. Moreover, the profitability increases through additional amortization paths.