

Das Energieeinsparpotenzial von Straßenbahnnetzen

Eine analysierende Parameterstudie hinsichtlich Einflussfaktoren mittels entwickeltem Simulationsmodell am Beispiel Ulm

MATTHIAS LINK | MANUEL BURKHART |
MANUELA MCCULLOCH | BASEM IDLBI |
DIETMAR GRAEBER

Dieser Beitrag untersucht das Potenzial zur Energieeinsparung in Straßenbahnnetzen am Beispiel des Netzes in Ulm. Ein Simulationsmodell wurde entwickelt, um dissipierte Energie während des Betriebs zu analysieren und die Hauptfaktoren, die den Energieverbrauch beeinflussen, zu identifizieren. Verschiedene Lösungsansätze, wie die Nutzung von Energiespeichern und Netzverstärkungen, sowie die Auswirkungen von unterschiedlichen Nennspannungen und einer erhöhten Bremsspannung wurden simulativ betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, wie technische Veränderungen im Netz Energieeffizienz verbessern können.

Einleitung

Der Betrieb elektrischer Straßenbahnen zählt zu den energieeffizientesten Verkehrsmitteln im Nahverkehr. Dennoch wird im Betrieb ein Teil der kinetischen Energie in Wärme umgewandelt, da die bei der Rekuperation ins Netz eingespeiste Leistung nicht aufgenommen werden kann. Die dissipierte Energie verringert den Wirkungsgrad des Systems, verursacht Kosten und belastet die Umwelt durch den erhöhten Gesamtenergiebedarf. Durch Datenanalysen wurden im Rahmen des vom Land Baden-Württemberg geförderten Projektes der Smart Grids Forschungsgruppe (SGFG) der Technischen Hochschule Ulm (THU) zum Thema „Energiewirtschaftliche Lösungsansätze zur Steigerung der Energieeffizienz elektrischer Bahnen durch Digitalisierung“ Erkenntnisse über die Menge und die Herkunft der „verheizten“ Energie gewonnen. Dazu wurde ein Simulationsmodell entwickelt, um die Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch zu identifizieren und mögliche Lösungskonzepte zu untersuchen. Als Lösungsansätze wurden netztechnische Ausbaumaßnahmen in Form von Energiespeichern (ESS) und Netzverstärkungen simulativ betrachtet. Weiterhin wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Nennspannungen und einer erhöhten Bremsspannung auf die Verlustleistung untersucht [1, 2].

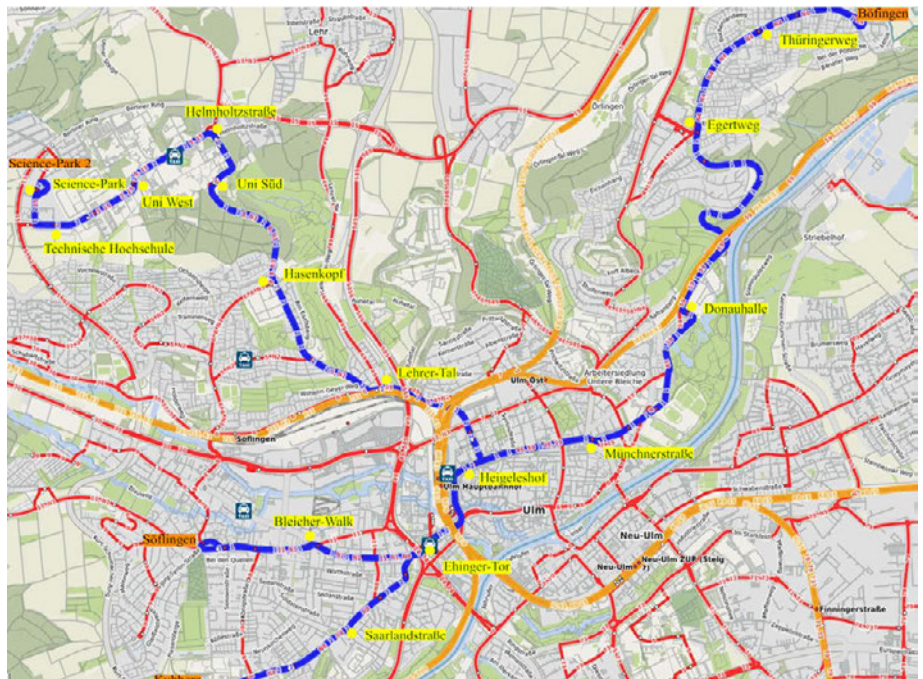


Abb. 1: Unterwerkspositionen und Endhaltestellen im Ulmer Straßenbahnnetz [5]

Grundlagen Bahnnetz Ulm

Straßenbahn- und U-Bahnssysteme werden in der Regel mit Gleichstrom bis 1000 V versorgt. Die Spannungsbegrenzung ist durch die hohen Sicherheitsanforderungen im Nahverkehr begründet. Bei rückspeisefähigen Systemen liegt die Nennspannung des Systems deutlich unter der maximalen Grenzspannung von 1000 V. Nur so kann ein Zug die Spannung über die Nennspannung anheben und damit Energie ins Netz zurückspeisen [3].

Das Straßenbahnnetz in Ulm (Abb. 1) ist ein 750 V Gleichstromnetz mit zwei Linien und einer Gesamtlänge von ca. 20 km mit 42 Haltestellen. Beide Linien verkehren im Ringverkehr, sodass ein Einrichtungsbetrieb möglich ist. Im Straßenbahnnetz befinden sich 15 Unterwerke, die nicht rückspeisefähig sind. Bei den Unterwerken handelt es sich um Gießharztransformatoren mit sechs Puls-Dioden-Gleichrichterkreisen mit einer Leistung von je 1600 kVA [4].

Die eingesetzten Straßenbahnen sind Niederflurfahrzeuge vom Typ Siemens Combino und Siemens Avenio M. Die Leistung beträgt 480 kW (4x120 kW) und wird von Elektro-

motoren unter dem Produktnamen Sibas 32 bereitgestellt. Hinzu kommen bis zu 64 kW Hilfsantriebsleistung [4, 6].

Modellierung

Für die Modellierung des Straßenbahnnetzes wird MatLab/Simulink verwendet. Das Gesamtsystem basiert auf einem mechanischen und einem elektrischen Teilmodell.

Das mechanische Teilmodell simuliert den Gesamtwidestand, bestehend aus Fahrwidestand und Beschleunigungswiderstand wie in Abb. 2 dargestellt. Der Fahrwidestand unterteilt sich in den Fahrwidestand und den streckenabhängigen Widerstand. Der Luftwidestand wird bei den Simulationen vernachlässigt. Außerdem wird Windstille angenommen.

Der mechanische Leistungsbedarf wird nach dem Newtonschen Gesetz berechnet. Der Zusammenhang zwischen der mechanischen Leistung P_{mech} und Traktionskraft F_{Tr} wird über die Geschwindigkeit v hergestellt. Hierbei wird der Wirkungsgrad η_{ges} aller in Reihe geschalteten Antriebskomponenten berücksichtigt. Dieser setzt sich aus den Wir-

kungsgraden des Stromabnehmers η_{str} des Elektromotors η_{mot} des Inverters η_{inv} und des Getriebes η_{getr} zusammen.

$$P_{P_{mech}} = \frac{F_{Tr} \cdot v}{\eta_{ges}} = U \cdot I$$

mit

$$\eta_{ges} = \eta_{str} \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{getr}$$

Vereinfacht kann das Zugmodell auf ein einfaches elektrisches Ersatzschaltbild zurückgeführt werden. Für die Herleitung wird der Netzabschnitt zwischen zwei Unterwerken zunächst isoliert als einzelner Abschnitt ohne Verbindungen zwischen den Oberleitungen (Querverbindungen) betrachtet. Dadurch werden die aufzustellenden Gleichungen auf der Basis der Kirchhofschen Regeln stark vereinfacht.

Die Unterwerke werden als eine ideale Spannungsquelle mit einem Innenwiderstand R_i modelliert. Daraus resultiert eine linear abfallende Kennlinie im U/I-Diagramm. Eine dynamische Spannungsregelung wäre theoretisch möglich, wird aber bei den Umspannwerken nicht eingesetzt. Die Grenzspannung ist auf 1000 V festgelegt. Wird diese Spannung dauerhaft überschritten, schaltet eine Schutzbeschaltung im Unterwerk diesen Abschnitt ab.

Der Zug besteht aus zwei identischen Antriebs-einheiten, die parallel geschaltet sind. Die einzelnen Komponenten lassen sich daher nach elektrischen Gesetzmäßigkeiten zusammenfassen. Die Bremswiderstände befinden sich auf dem Dach des Zuges und sind im Modell als „Sample & Hold-Schaltung“ ausgeführt. Die Ansteuerung der Bremswiderstände erfolgt spannungsgetriggert durch Vergleich der Spannung am Antrieb mit der Spannung am Stromabnehmer.

Für Oberleitungen ist ein dynamisches Modell erforderlich, da sich die Einspeiser/Verbraucher dynamisch ändern. Obwohl die Widerstände in den Oberleitungen von Straßenbahnen gering sind, kann der Spannungsabfall in den Oberleitungen aufgrund der hohen Ströme und Spannungen nicht vernachlässigt werden. Die Oberleitungen und die Rückleiter werden im Modell durch jeweils zwei veränderliche Widerstände dargestellt. Der Widerstand hängt im Wesentlichen von der Entfernung zur jeweiligen Spannungsquelle ab.

In die Streckensimulation gehen das Höhenprofil sowie der Streckenverlauf in Form von Radien ein. Zur Definition der Streckenlängen werden die Planungsdaten von Gleis A verwendet und vereinfacht auf Gleis B übertragen. Die Kurvenprofile basieren ebenfalls auf den Planungsdaten der Streckenabschnitte. Vereinfachend wird im Modell angenommen, dass eine Kurve unmittelbar mit dem jeweiligen Kurvenradius beginnt. Diese Annahme ist aufgrund des geringen Anteils des Kurvenwiderstandes am Gesamtwiderstand zulässig [4].

Simulationszenarien

Es wird nur die Strecke der Böffinger Steige untersucht. Dabei handelt es sich um einen 3655 m langen Streckenabschnitt mit sechs

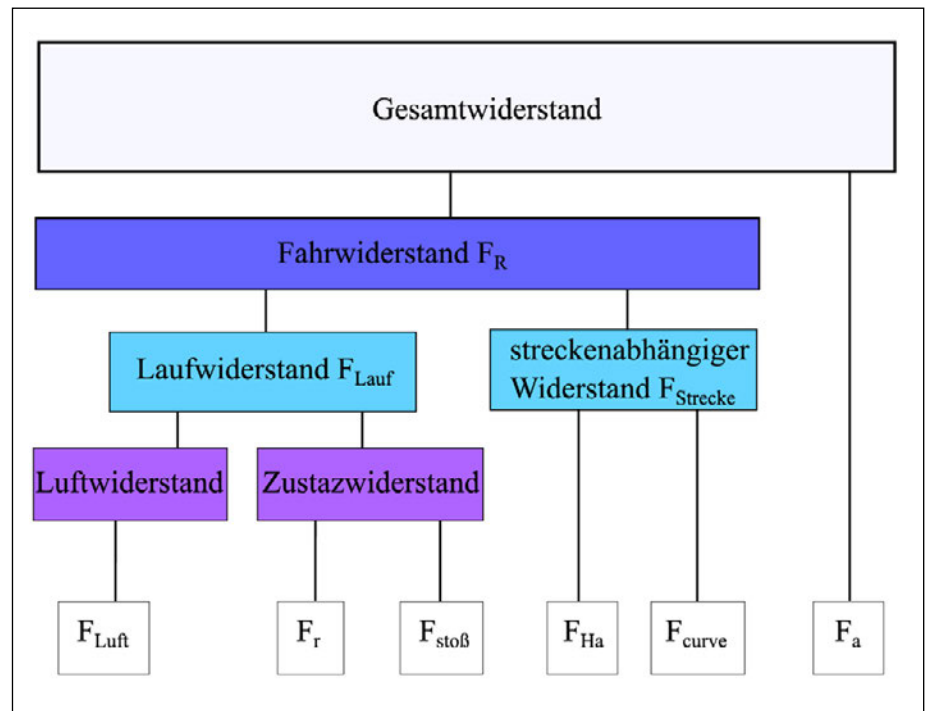


Abb. 2: Fahrwiderstand von Schienenfahrzeugen [5]

Haltestellen der Linie 1. Dieser Streckenabschnitt wurde ausgewählt, da hier ein Höhenunterschied von 100 m überwunden werden muss. Daraus ergibt sich eine hohe Energieaufnahme bei der Bergfahrt und eine große Menge an Bremsenergie bei der Talfahrt. Für die Simulation wurde anhand von Planungsunterlagen und Messwerten ein Höhen-, Kurven- und Geschwindigkeitsprofil erstellt, welches in den Simulationen verwendet wurde. Für den Energieaustausch ist es notwendig, mehrere Züge gegeneinander zu simulieren. Im Folgenden wird der bergwärts fahrende Zug als „Zug A“ bezeichnet und der talwärts fahrende Zug als „Zug B“. Zur Ermittlung des Potenzials wird zunächst der Ist-Zustand simuliert und mit den über eine Messbox erhobenen Werten verglichen. Die Validierung erfolgt durch die Betrachtung verschiedener Szenarien.

Insgesamt werden fünf Netzmodifikationen definiert, die mit dem entwickelten Modell untersucht und bewertet werden. Ziel der Untersuchungen ist es, eine Aussage über die Wirksamkeit der Maßnahmen im ausgewählten Netzabschnitt zu treffen. Die zu untersuchenden Maßnahmen sind:

- konventioneller Netzausbau durch erhöhten Leiterquerschnitt
- Änderung der Nennspannung
- zusätzliche Netzeinspeisung in Form eines neuen Unterwerks
- Implementierung einer 450 kW Ladestation
- Erhöhung der Bremsspannung U_{Brems}

Bei der Simulation mit konventionellem Netzausbau ist davon auszugehen, dass aufgrund von Netzausbaumaßnahmen der Oberleitungswiderstand im angegebenen Netzabschnitt verringert wird.

Die Simulation soll eine Verringerung des Oberleitungswiderstandes, z.B. durch eine Querschnittsänderung, um 20 % darstellen. Eine Änderung der Nennspannung verringert die Verluste im Leiter, aber auch die Leitungslänge für die Rückspeisung. Die Auswirkungen einer Erhöhung bzw. Verringerung der Nennspannung auf die Energiebilanz sind zu untersuchen. Als weitere Variante wird der Effekt einer Erhöhung der Bremsspannung von 900 V auf 950 V untersucht. Durch die erhöhte Einspeisepotential ist zu erwarten, dass die Verlustleistung der rückgespeisten Energie reduziert wird. Ebenso verlängert sich der Rückspeiseweg. Dadurch nehmen die Wahrscheinlichkeit und Effektivität einer Energieübertragung zu.

Am Streckenabschnitt der Böffinger Steige wird die Implementierung eines weiteren Unterwerks geplant. Der Standort des untersuchten Unterwerks liegt geografisch an der Unterführung der Bahnstrecke zwischen den Haltestellen Donauhalle und Egertweg am Fuß der Böffinger Steige. Durch eine zusätzliche Einspeisung wird einerseits der Spannungsabfall im Netz reduziert. Dadurch verringert sich einerseits die Verlustleistung am Leiter, andererseits verkürzt sich ggf. die Leitungslänge, über die Energie zurückgespeist werden kann. An der Station am Egertweg wird weiterhin die Nutzung einer 450 kW-Ladestation als Szenario betrachtet.

Durch die Nutzung als Busladestation ist das angeschlossene Speichermedium ein elektrochemischer Energiespeicher (Batterie). Dieser wird in diesem Fall vereinfacht als idealer Energiespeicher betrachtet.

Entscheidend ist, dass die eingespeiste Energiemenge sinkt. Nur so kann in Summe Ener-

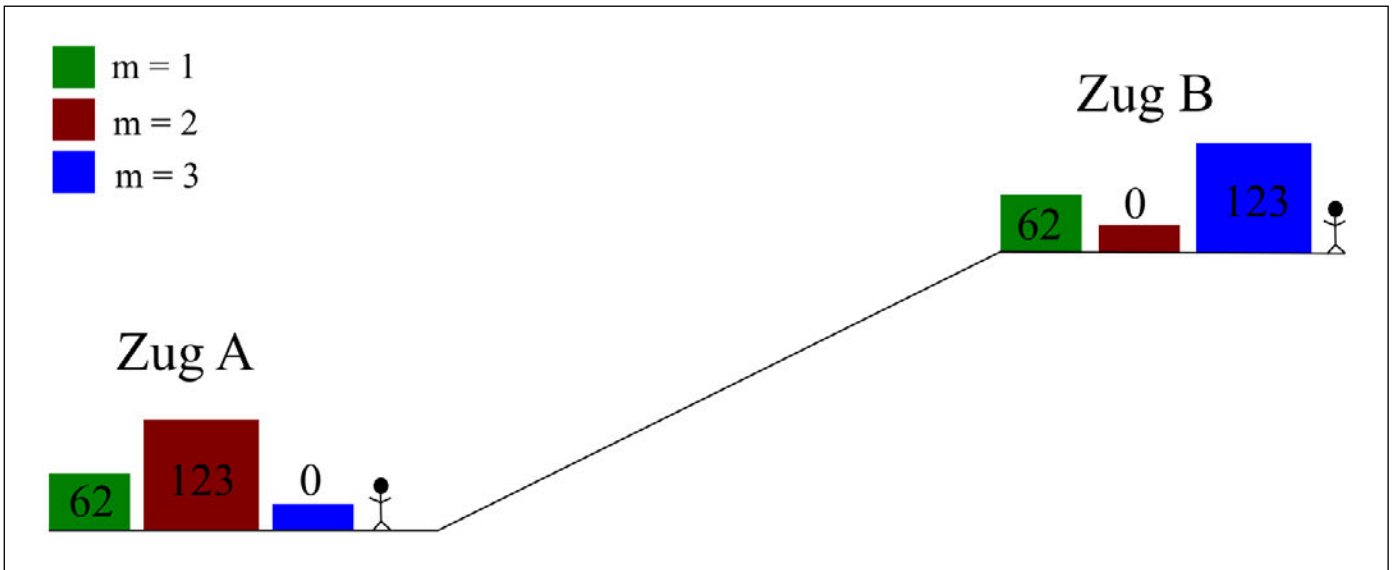


Abb. 3: Personenaufkommen nach Massenparameter

gie eingespart werden. Die fahrzeugspezifischen Parameter sind dem untergeordnet. Die folgenden Ergebnisse werden ausschließlich nach diesem Kriterium bewertet.

Ergebnisse

Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, werden innerhalb der Simulationsszenarien Parametervariationen der Masse und der Hilfsantriebsleistung durchgeführt. Diese Variation (Abb. 3) repräsentiert die unterschiedlichen Fahrgastzahlen aufgrund der Massenvariation sowie die unterschiedlichen Hilfstriebwerksleistungen (HLK) aufgrund der dynamischen Klimatisierungsleistung bzw. Heizleistung. Während bei gleichzeitigem Start die Wahrscheinlichkeit überlappender Bewegungen hoch und damit der Energieaustausch prinzipiell größer ist, wird bei geringer Überlappung weniger Energie übertragen. Daher

wird die Wirkung der Maßnahmen an zwei unterschiedlichen Profilen untersucht. Ausgehend von den ermittelten Bewegungsprofilen wird der zeitliche Abstand zwischen den Bewegungen auf Basis mehrerer Messungen auf 317 Sekunden festgelegt. Dabei beginnt jede Fahrt mit einem Halt von 10 Sekunden vor dem ersten Beschleunigungsvorgang. Ebenso endet jede Fahrt mit einem Halt von 10 Sekunden an der Endhaltestelle. Während dieser ersten 10 Sekunden wird bereits Hilfsenergie verbraucht. Bahn A startet somit ab Sekunde 10. Bahn B ist im Profil „real“ ab Sekunde 317 aufnahmefähig, startet ab Sekunde 327 mit der ersten Beschleunigung. In Abb. 4 und 5 sind der zeitliche Versatz über der Strecke bzw. der Geschwindigkeit dargestellt. Es zeigt sich, dass gerade im Bewegungsprofil „real“ die zeitliche Überlappung der Züge gering ist.

Als netztechnische Variante soll der Einfluss von drei unterschiedlichen Spannungszuständen auf die Energiebilanz untersucht werden. Neben der heutigen Nennspannung von 770 V wird eine Spannungserhöhung auf 850 V bzw. eine Spannungsabsenkung auf 650 V angenommen. Dabei ändern sich die Verluste im Leiter jeweils mit der Spannung. Für das Profil „gleichzeitig“ sinkt bei einer Spannungserhöhung auf 850 V der Gesamtenergieverbrauch des Netzabschnittes. Allerdings steigt der Anteil der Verlustenergie, da die Energieübertragung aufgrund der geringeren Differenz zur oberen Spannungsgrenze nur über kürzere Strecken erfolgen kann. Fällt die Spannung am Unterwerk unter die Nennspannung, speist das Unterwerk Energie ein und verhindert durch die Spannungserhöhung eine Energieübertragung. Für den untersuchten Streckenabschnitt führt die niedrigere Nennspannung

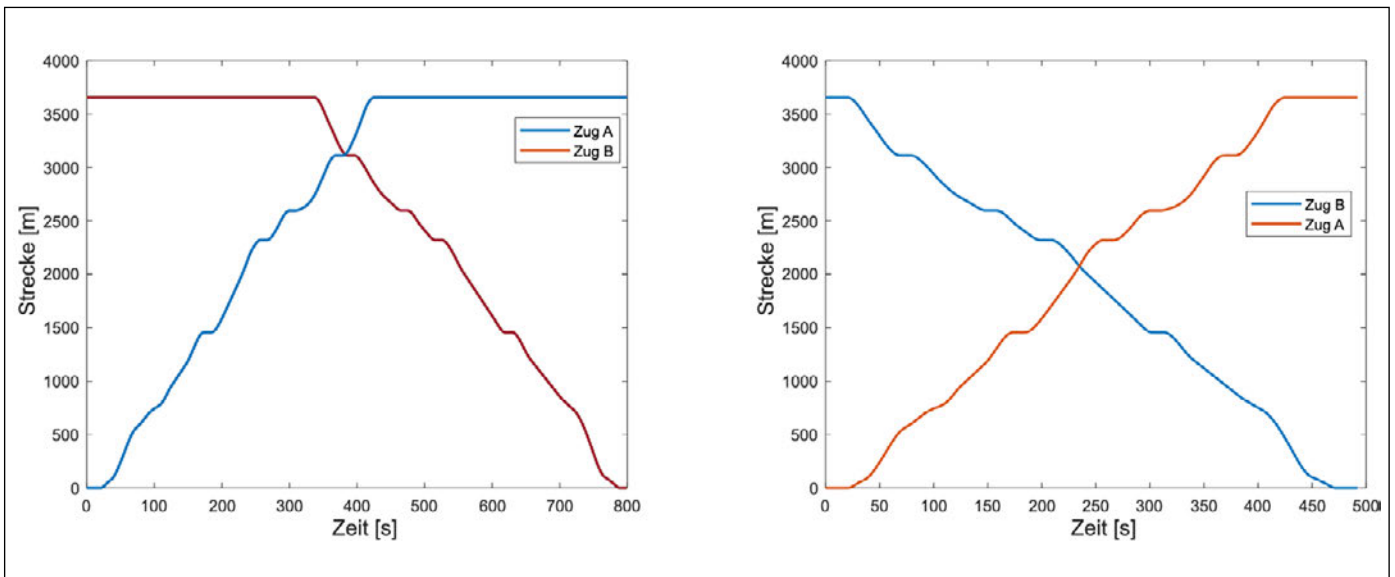


Abb. 4: s-t-Diagramm der Profile „real“ und „gleichzeitig“

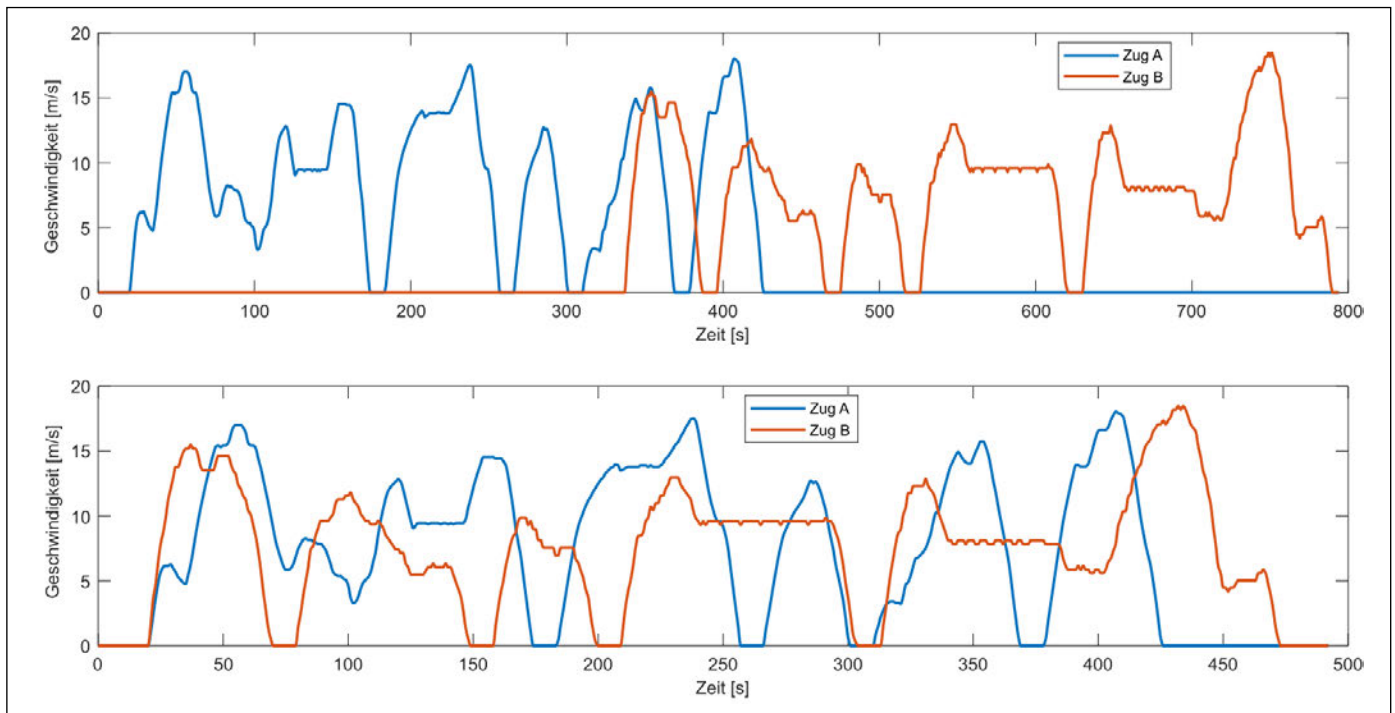


Abb. 5: Profilüberschneidungen v-t-Diagramm der Profile „real“ und „gleichzeitig“

zu einem höheren Energieverbrauch, während nur wenig Leistung mehr zurückgespeist werden kann. Übertragen auf das reale Profil ist der Effekt der reduzierten Rückspeisestrecke sehr gering. Stattdessen überwiegt der Effekt der reduzierten Leitungsverluste.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei hohem Rückspeiseaufkommen eine Spannungserhöhung auf 850 V kaum positive Auswirkungen hat, da der Effekt der Reduzierung der Leitungsverluste durch die Erhöhung der dissipierten Energiemenge gemindert wird. Es ist zu erwarten, dass sich dieser Effekt bei größeren Leitungsquerschnitten verstärkt. Bei geringen Streckenbelastungen, bei denen in der Regel keine oder nur eine geringe Rückspeisung zu erwarten ist, kann sich die Anhebung der Spannung positiv auf die Reduzierung der Leitungsverluste auswirken. Eine Reduzierung des Spannungsniveaus auf 650 V hat auf dem untersuchten Streckenabschnitt keinen positiven Effekt.

Des Weiteren wurde eine Reduzierung des Oberleitungswiderstands um 20 % untersucht. Dies kann durch Netzausbau erreicht werden. Dadurch wird eine Verringerung der Leitungsverluste und eine Verlängerung der Energieübertragungstrecke erwartet. In beiden Profilen wirkt sich eine Erhöhung des Leiterquerschnitts positiv auf den Gesamtenergieverbrauch aus, jedoch kaum auf die Anteile der verbrauchten und rückgespeisten Energie. Die Einsparungen betragen 0,38 % im simultanen Profil und 0,33 % im realen Profil. Im Vergleich zu den umgesetzten Energiemengen sind diese vernachlässigbar. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Netzbaumaßnahme den Energieverbrauch in den untersuch-

ten Fällen geringfügig reduzieren kann. Es ist möglich, dass bei der Untersuchung eines größeren Netzabschnittes eine Erhöhung des Leiterquerschnittes zu höheren Energieeinsparungen führt.

Ein zusätzliches Umspannwerk ermöglicht eine dichtere Einspeisung. Dadurch verkürzen sich die Übertragungswege. Der Anteil der rückgespeisten Energie ist aufgrund der kurzen Profilüberdeckung sehr gering und unterscheidet sich nicht. Ebenso sind die abgegebene Energie und der Energieverbrauch der Züge identisch. Damit ist sichergestellt, dass der Unterschied im Gesamtenergieverbrauch nicht auf einen erhöhten Energiebedarf der Züge zurückzuführen ist. Beim zweiten untersuchten Profil sind die gleichen Effekte zu beobachten. Hier kommt es aufgrund der längeren Profilüberlappung zu einer Erhöhung der rückgespeisten Energiemenge. In beiden Fällen reduziert das Unterwerk die jeweilige Energiemenge des Gesamtenergieverbrauchs. Die übrigen Energiegrößen der Züge ändern sich nicht. Das zusätzliche Unterwerk hat in den untersuchten Szenarien keinen Einfluss auf die rückgespeiste Energie. Für alle untersuchten Betriebspunkte wird eine Energieeinsparung von 0,48 % ermittelt. Dies ist auf die geringeren Verluste in der Oberleitung zurückzuführen.

Als weitere Variante wurde eine Erhöhung der Bremsspannung auf 950 V untersucht. Dadurch verschiebt sich die Aktivierungsspannung des Bremschoppers um 50 V nach oben. Die höhere Rückspeisespannung reduziert zum einen die Leitungsverluste. Andererseits vergrößert sich die Rückspeisestrecke durch den größeren Abstand zur Nennspannung. Die Maßnahme wird gleichzeitig am Profil un-

tersucht, da hier die Energieübertragung über größere Strecken erfolgt und der Effekt der Maßnahme besser messbar ist. Die Auswertung der Messungen zeigt für alle betrachteten Massenzustände einen Unterschied. Für den Massenzustand 1 und einer HLK-Leistung von 10 kW beträgt diese z.B. für den Gesamtenergieverbrauch 0,014 kWh und ist damit gering. Dies ist vermutlich auf die geringeren Leitungsverluste bei der Rückspeisung zurückzuführen. Der Effekt einer längeren Übertragungstrecke fällt kaum ins Gewicht, da der Abstand zwischen den Leitungen vermutlich zu gering ist. Selbst bei der Annahme eines doppelt so hohen Leitungswiderstandes (135 mΩ) können 0,36 % mehr Energie rückgespeist werden. Dieser Effekt kann bei der Betrachtung eines größeren Netzabschnittes stärker ins Gewicht fallen. Zudem birgt die Erhöhung hinsichtlich der Einhaltung der Spannungsobergrenze von 1000 V die Gefahr, dass diese bei Spannungsspitzen nicht eingehalten werden kann. Aus diesem Grund ist eine Umsetzung in der Praxis als kritisch zu betrachten. Die Ladestation ist an der Position des Unterwerks Egertweg simulativ betrachtet. Diese wird als idealer Energiespeicher modelliert und ist dadurch stark vereinfacht ausgeführt. Daraus resultiert ein idealer Wirkungsgrad (keine Verlustleistung beim Speichern der Energie) sowie ideale Energie und Leistungsdichte. Die Implementierung der Ladestation zeigt einen deutlich besseren Effekt als die zuvor genannten Ergebnisse. Die Simulation ist anhand der bekannten Profile und Parameter durchgeführt. Es wird vereinfacht angenommen, dass die Leistungsspitzen oberhalb 450 kW nicht von der Ladestation genutzt wer-

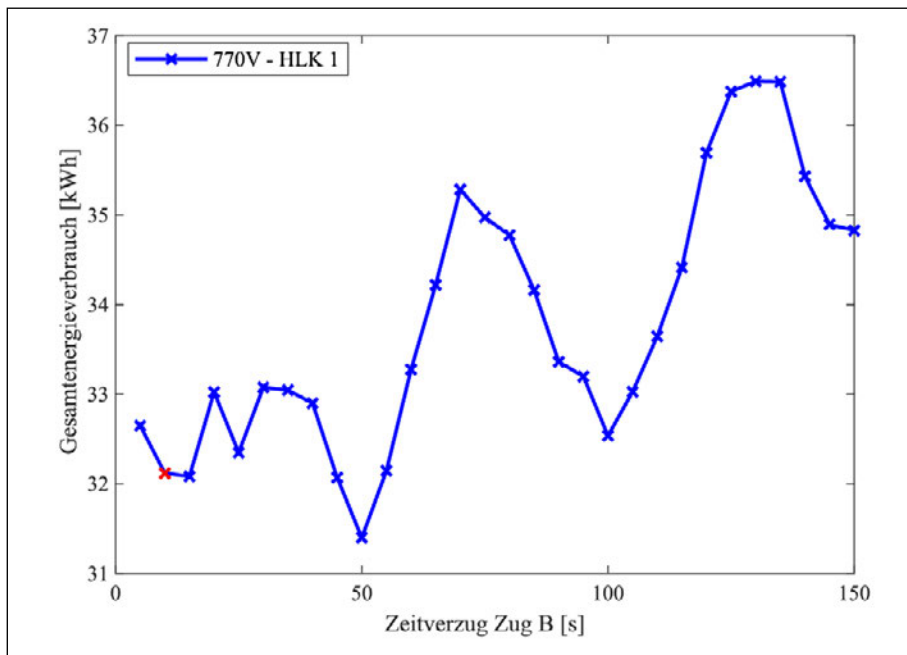


Abb. 6: Energieverbrauch bei Profilverchiebung B in 5-Sekunden-Schritten

den können. Somit können Leistungen oberhalb dieser Grenze nicht eingespeichert werden. Beim realen Profil liegen zwischen 3,39 % und 4,74 % der rückspeisbaren Energiemenge im Bereich nicht nutzbarer Leistungsspitzen. Die rückspeisbare Energiemenge liegt zwischen ca. 32-53 % der eingespeisten Energiemenge, abhängig von dem Energieverbrauch der Züge. Eine niedrige HLK-Leistung wirkt sich positiv aus, genauso wie große potenzielle Energie. Beim Profil „gleichzeitig“ kann der Speicher allgemein weniger Energie aufnehmen. Im untersuchten Fall beläuft es sich auf 23,26 – 41,05 % der eingespeisten Energie unter idealisierten Betrachtungen. Durch erhöhten Austausch der Bahnen untereinander ist das Potenzial der einsparbaren Gesamtmenge bzw. auch prozentual geringer. Die installierte Nennleistung von 450 kW ist ausreichend, um in allen Fällen über 92 % der rekuperierenden Energiemengen aus dem Netz nutzen zu können. Die Simulationsstudie zeigt weiterhin, dass bei geringer Streckenauslastung mit Taktzeiten von z. B. 15 und 30 Minuten ein Energiespeicher einen sehr großen Teil der sonst dissipierten Energie einspeichern kann. Bei hohen Taktzeiten ist der Energiespeicher dagegen etwas weniger effektiv.

Abschließend (Abb. 6) erfolgt die Betrachtung der Einflüsse der Bewegungsvorgänge auf den Energieverbrauch.

Unter der Annahme konstanter Haltezeiten von 10 Sekunden an den Haltestellen ergeben sich energetisch günstigere Abfahrtszeiten zwischen den beiden Zügen. So kann bei einer um 50 Sekunden späteren Abfahrt des Zuges B die gesamte Fahrt mit 31,4 kWh energetisch günstiger zurückgelegt werden. Nur 20 Sekunden später hingegen steigt der Energieverbrauch bereits um 12,2 % auf 35,28 kWh.

Fazit / Zusammenfassung

Das entwickelte Modell analysiert die Einflussfaktoren auf die Energiebilanz von Straßenbahnen in Ulm anhand eines definierten Netzabschnitts. Die Validierung erfolgte mit realen Messdaten und wurde als ausreichend genau bewertet, jedoch ist eine exakte Bewertung aufgrund fehlender Informationen nicht möglich. Die Simulationsergebnisse zeigen erwartungsgemäße Größenordnungen und Verhaltensweisen bei Änderungen der Parameter.

Eine Erhöhung der Nennspannung auf 650 V wird aufgrund erhöhter Leitungsverluste nicht empfohlen, während 850 V unter bestimmten Bedingungen rentabel sein könnte. Eine dynamische Spannungsregelung basierend auf Verkehrsaufkommen könnte Energieeinsparungen ermöglichen, ist jedoch technisch und finanziell unklar. Eine Leerlaufspannung von 770 V erscheint als geeigneter Kompromiss.

Die Vergrößerung des Leitungsquerschnitts um 20 % führt zu einer Energieeinsparung von 0,33–0,38 %. Eine zusätzliche Einspeisung durch ein Unterwerk zeigt positive Effekte mit einer Energieeinsparung von 0,48 %. Die Erhöhung der Bremsspannung auf 950 V und der Anschluss einer 450 kW Ladestation können ebenfalls signifikante Energieeinsparungen bewirken, abhängig vom Verkehrsaufkommen.

Die Bewegungsvorgänge der Straßenbahnen beeinflussen die Energiebilanz stark. Eine Abstimmung der Bewegungsprofile und eine gesteuerte Fahrempfehlung könnten den Energieverbrauch weiter optimieren. Das Modell bietet Potenzial für weitere Untersuchungen auf größeren Netzabschnitten, erfordert jedoch eine detaillierte Erweiterung für eine realistischere Simulation. Netztechnische Maßnahmen sind mit Investitionskosten verbunden, die sich für die Verkehrsbetriebe amortisieren müssen. ■

QUELLEN

- [1] Greaber, G.: Projektantrag Energieeffizienz elektrische Bahnen, 2020
- [2] Söffker, C.; Gralla, C.: Bahnenergieversorgung: „Smarte“ Bahnenergieversorgung für den Nahverkehr dank Hesop, 2016; Online: https://guwplus.de/images/Publicationen/eb_06_2016_Smarte-Bahnenergieversorgung.pdf; Gesehen: 22.01.2024
- [3] Fendrich, L.; Fengler, W.: Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019
- [4] Walcher, S.: SWU Straßenbahn Ulm Netzberechnung – Standortbestimmung von 2 neuen Unterwerken, Bericht
- [5] Burkhart, M.: Analyse von Einflussgrößen auf das Energieeinsparpotenzial von Straßenbahnnetzen am Beispiel Ulm durch Parameterstudie an einem entwickelten Simulationsmodell, Masterthesis, Energietechnik und Energiewirtschaft – IEE, Technische Hochschule Ulm, Ulm, 2022
- [6] Siemens Mobility GmbH: Avenio M Ulm Datenblatt; <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:658bb9c5-aa21-4bdf-8b2c-b3efacd-23cef/version:1700047246/avenio-m-ulm-2019-de.pdf>



Matthias Link

ehem. wissenschaftlicher Mitarbeiter
m1link@posteo.de



Manuel Burkhart

ehem. wissenschaftlicher Mitarbeiter
manuburkhart@hotmail.de



Manuela McCulloch

Senior Researcherin
manuela.mcculloch@thu.de



Basem Idlbi

Senior Researcher
basem.idlbi@thu.de



Prof. Dr. Dietmar Graeber

Professor für Energiewirtschaft
dietmar.graeber@thu.de

Alle Autoren:
Institut für Energietechnik
und Energiewirtschaft – IEE
Technische Hochschule Ulm, Ulm
manuela.mcculloch@thu.de