

„Smarte“ Bahnenergieversorgung für den Nahverkehr dank Hesop

Carsten Söffker, Salzgitter; Christoph Gralla, Berlin

Die klassische Bahnenergieversorgung für den städtischen Nahverkehr mit Gleichspannungs-Unterwerken auf der Basis von Transformatoren und Diodenbrücken ist bewährt und robust. Diese Technologie beschränkt aber den Energiefluss auf eine Richtung. Moderne Stromrichter vermeiden diesen Nachteil. Das System Hesop bietet in Verbindung mit Transformator- und Filtermodulen verschiedener Leistungsklassen eine neue Produktplattform, nutzbar sowohl für Netzerweiterungen als auch Modernisierungen.

“Smart” POWER SUPPLY FOR URBAN RAIL SYSTEMS THANKS TO Hesop

Classical power supply systems for urban rail application are constructed of DC substations that primarily contain transformers and diode bridges. This technology is service proven and robust, but its energy flow is limited to one direction. Modern converters avoid this disadvantage. The Hesop system offers a new product platform comprising transformer and filter modules of different power ranges in order to serve both network extensions as well as modernization projects.

ALIMENTATION «Smart» EN ÉNERGIE POUR LES RESEAUX DE TRANSPORT URBAINS GRÂCE À Hesop

Les sous-stations de traction à courant continu pour les réseaux de transport urbains utilisent généralement des transformateurs et des ponts redresseurs à diodes. Cette technologie est robuste et a fait ses preuves, mais limite le passage de l'énergie dans une seule direction. Les convertisseurs modernes évitent ce désavantage. Le système Hesop offre une nouvelle gamme de convertisseurs couplés avec des modules de transformateurs et de filtrage de différente puissance, pour aussi bien des projets d'extensions ou de modernisations.

1 Einführung

Das Attribut „smart“ wird heutzutage vielen alltäglichen Begriffen vorangestellt, wenn neben ihrer Grundfunktion zusätzliche Nutzungsmöglichkeiten angeboten werden. Verbreitete Beispiele dafür sind

Markenbezeichnungen wie SmartPhone, SmartCity oder auch SmartHome. Ein wichtiges Ziel dieser Wortschöpfung besteht darin, dem Adressaten die Angst vor der Innovation zu nehmen, denn diese ist ja smart. So wird eine mögliche Skepsis in Neugierde verwandelt.

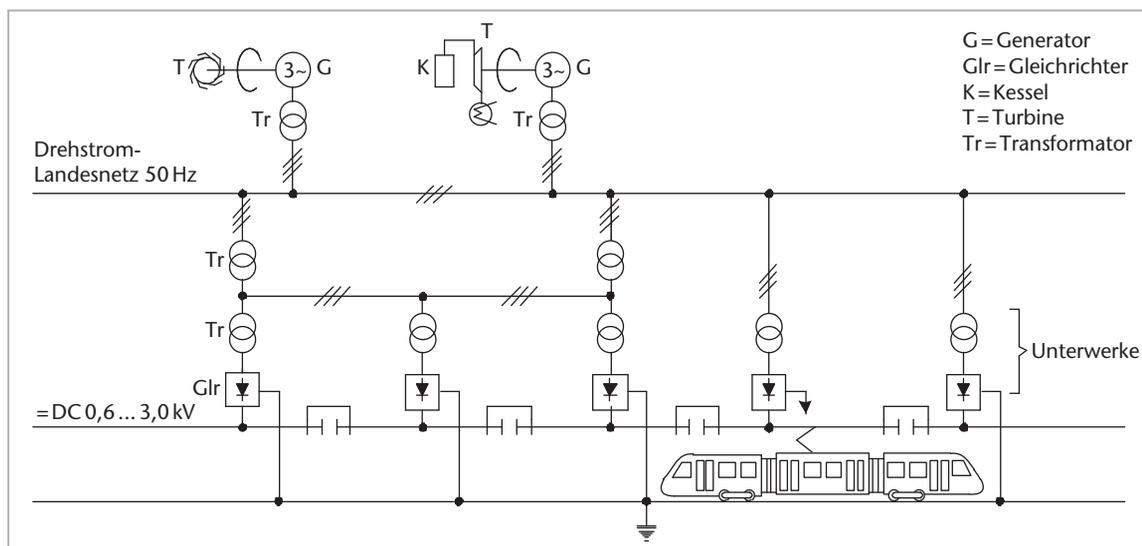


Bild 1: Energieversorgung von Gleichstrom-Bahnen (nach [1]).

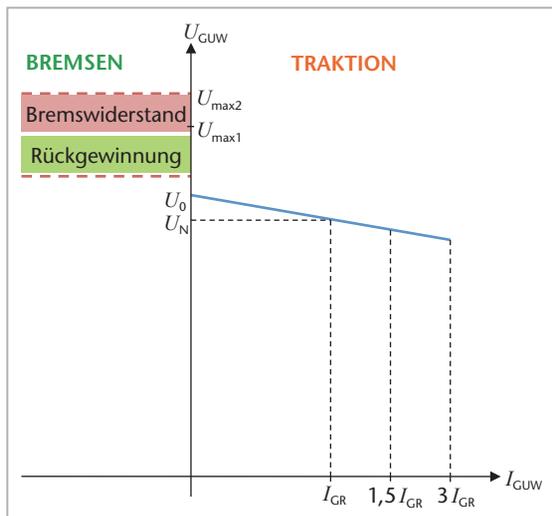


Bild 2: Strom-/Spannungs-Kennlinie eines klassischen Gleichrichter-Unterwerkes mit prinzipieller Darstellung der Spannungsbänder für Rekuperation.

Genau dies soll auch in Bezug auf die Bahnenergieversorgung erreicht werden. Stationäre Anlagen gehören zu den langlebigen Investitionsgütern; daher bestehen als grundlegende Anforderungen unter anderem

- größtmögliche Robustheit, sie führt tendenziell zu hoher Zuverlässigkeit, und
- hoher Standardisierungsgrad, er bedeutet geringes Obsoleszenz-Risiko.

So hat sich über Jahrzehnte hinweg eine Technologie etabliert, bestehend aus Transformatoren am Drehstrom-Landesnetz und nachgeschalteten passiven Gleichrichtern [1] (Bild 1). Jedoch traten mit der Einführung von rückspeisefähigen Fahrzeugen einige systemimmanente Schwächen zutage:

- Je höher der Traktionsstrom, desto höher ist auch die Spannungsminderung am Unterwerk und an der Fahrleitung; dieser Effekt wird durch Stromrichterantriebe verstärkt, die aufgrund einer Drehmomentregelung die Leistung am Stromabnehmer konstant halten.
- Die Nutzung von beim Bremsen rückgewonnener Energie beschränkt sich auf die Hilfsbetriebe des erzeugenden Fahrzeuges selbst sowie auf gleichzeitig beschleunigende Fahrzeuge im gleichen Speiseabschnitt; sind diese zu weit entfernt, wird der Leistungsüberschuss weiterhin im Bremswiderstand in Wärme umgewandelt.

Im rechten und linken Teil von Bild 2 sind diese Zusammenhänge prinzipiell visualisiert. Bei fehlender Last liegt die Leerlaufspannung U_0 am Unterwerk an. Die Spannung U_{GUW} sinkt linear mit steigendem Strom I_{GUW} , erreicht ihren Nennwert U_N bei Abga-

be des Gleichrichter-Nennstroms I_{GR} und bricht im Überlastfall weiter ein. „Rückgewinnung“ bezeichnet den Energieaustausch zwischen zwei Zügen und kann nur oberhalb von U_0 erfolgen, damit der Gleichrichter im Unterwerk sperrt. Sind die Züge zu weit voneinander entfernt, erreicht die Spannung an der Quelle den Schwellwert U_{max2} nach EN 50163, so dass der Bremswiderstand einspringen muss, wobei die Spannung am Unterwerk durchaus unterhalb der höchsten Dauerspannung U_{max1} liegen kann.

An dieser Stelle setzt *Hesop* an: *Hesop* ist der Markenname von Alstom für ein Gleichspannungs-Unterwerk auf der Basis eines Vierquadrantenstellers (4QuS). Dieses System bietet dem Anwender die entscheidenden Freiheitsgrade, um eine energetisch optimierte und damit eine „smarte“ Bahnenergieversorgung zu realisieren. Abhängig von den Randbedingungen des Netzes kann mittels *Hesop* die Anzahl der Unterwerke um 20% reduziert oder alternativ die Verkehrsleistung bis zu 40% erhöht werden. Über 99% der rückgewonnenen Bremsenergie sind auch tatsächlich nutzbar, weil *Hesop* den Gleich- und Wechselrichter-Modus in einem einzigen Stromrichter vereint. Verschiedene alternative Technologien [2] ermöglichen dagegen nur partielle Verbesserungen:

- Liegt der Fokus lediglich auf der Optimierung der Traktionsenergieversorgung, kann man den Gleichrichter mit Thyristoren anstelle von Dioden aufbauen. Auch so lässt sich die Oberspannung dynamisch regeln, aber auf Kosten erhöhter Oberschwingungen im übergeordneten Verteilnetz und mit gesteigertem Blindleistungsbedarf.
- Möchte man hingegen den Rückspeisegrad erhöhen und sind netzseitige Maßnahmen, zum Beispiel hinsichtlich Vermaschung, weitgehend ausgeschöpft, kann man antiparallel zum Gleichrichter einen Wechselrichter-Strang mit eigenem Transformator installieren. Dies ermöglicht zwar die Beibehaltung der klassischen Traktionsenergieversorgung, erfordert deshalb aber eine klare Abgrenzung der beiden Spannungsregler voneinander und verschlechtert somit die Energiebilanz des Systems.
- Weil viele Energieversorgungsunternehmen solche punktuell auftretenden Rückspeisungen nicht honorieren, haben sich einige Verkehrsbetriebe für die Installation stationärer Energiespeicher entschieden. Neben ihrer begrenzten Kapazität haben diese Systeme den Nachteil hoher Komplexität wegen Leistungselektronik plus Speichermedium mit entsprechendem Instandhaltungsaufwand.

Tabelle 1 zeigt qualitativ die relevanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Lösungsansätzen.

TABELLE 1

Verschiedene Stromrichter-Bauarten für Gleichspannungs-Unterwerke: Vergleich der Funktionen und Eigenschaften, gegebenenfalls mit deren Erfüllungsgrad.

Funktionen	IGBT-Stromrichter <i>Hesop</i>	Dioden-Gleichrichter	Thyristor-Gleichrichter	IGBT/Thyristor-Wechselrichter	Energiespeicher
Dynamische Spannungsregelung	✓	✗	✓	✗	tlw. ✓
Oberschwingungsunterdrückung	✓	✗	✗	Nur ✓ IGBT	✗
Dämpfung von Leistungsspitzen	✓	✗	✓	✗	tlw. ✓
Glättung von AC-Spannungsschwankungen	✓	✗	✓	✗	✗
Rückgewinnung von Bremsenergie	✓	✗	✗	✓	tlw. ✓
Eigenschaften					
Optimale Traktionsenergieversorgung	██████████	✗	██████████	✗	██████████
Erhöhung der Verkehrsleistung	✓	✗	✓	✗	✓
Vorrang für „direkten Energietransfer“ zwischen Zügen in einem Abschnitt	██████████	-	-	██████████	██████████
Verzicht auf Bremswiderstände/reduzierter Wärmeeintrag	██████████	✗	✗	██████████	██████████
Energiebilanz (Spitzenlast + Gesamtbedarf)	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████
Investitionssumme – Unterwerk allein	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████
Investitionssumme – Ganze Strecke	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████
Betriebskosten	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████
Aufwand für Sicherheitsbetrachtung	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████

2 Hesop-Technologie

Das wesentliche Verbesserungspotenzial durch den Einsatz eines 4QuS besteht in der Flexibilisierung der Strom-/Spannungs-Kennlinie in beiden Energieflussrichtungen. Bild 3 zeigt, dass die Spannung U_{GUW} am Unterwerk unabhängig vom Ausgangsstrom I_{GUW} dynamisch auf einen konstanten Wert geregelt wird. Für den Spannungswert im Rückspeisemodus bei negativem Strom I_{GUW} muss ein netzspezifisches Optimum gefunden werden: Ziel

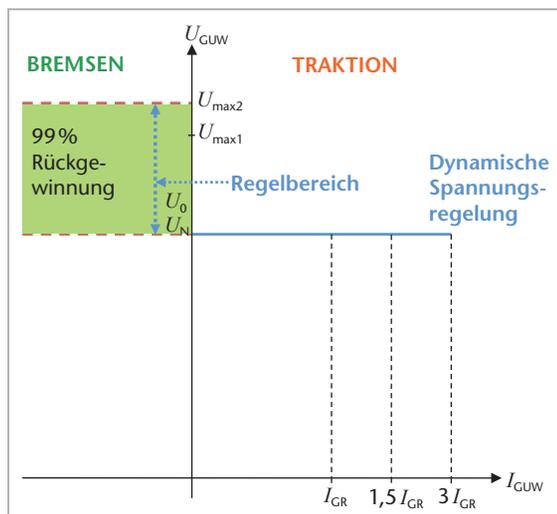


Bild 3: Strom-/Spannungs-Kennlinie eines *Hesop*-Unterwerkes mit prinzipieller Darstellung des Spannungsbereichs für die Rückgewinnung von Bremsenergie.

wäre einerseits eine möglichst hohe U_{GUW} , um den Energieaustausch zwischen gleichzeitig bremsenden und anfahrenden Zügen zu priorisieren; Ziel wäre aber andererseits eine möglichst niedrige U_{GUW} , um an jeder Stelle des Speiseabschnitts zu vermeiden, dass die lokale Spannung beim Bremsen über den zulässigen Höchstwert U_{max2} ansteigen würde, weil dann der Bremssteller des Fahrzeuges aktiviert werden müsste und Energie dem Bremswiderstand zugeführt würde. So bewegt sich die Oberleitungsspannung innerhalb des skizzierten Regelbereichs, und es wird sichergestellt, dass über 99 % der verfügbaren Bremsenergie auch tatsächlich rückgewonnen werden.

Für die praktische Umsetzung dieses Prinzips kann auf eine Technologie zurückgegriffen werden, die auf (Wechselstrom-)Fahrzeugen seit über einem Jahrzehnt Stand der Technik ist [3]. Die Analogie zwischen beiden Architekturen wird in Bild 4 offensichtlich, wobei die einzelnen Elemente nicht mit den gleichen Spannungen und Frequenzen beaufschlagt werden und je nach Einsatzfeld stationär oder beweglich ausgeführt sind:

Im oberen Teil a) ist das Antriebssystem des Regionaltriebzuges *Coradia Continental* der Baureihe 440/1440 abgebildet, der in verschiedenen Ausführungen seit 2008 in Deutschland im Einsatz ist. Einen IGBT-Antriebsstromrichter, bestehend aus 4QuS, Gleichspannungs-Zwischenkreis und Antriebswechselrichter, findet man heutzutage auf allen Triebzügen und Lokomotiven, die mit Wechselstrom gespeist werden. Die Ausführung des Haupttransformators ist insbesondere von der

Architektur des Hauptstromkreises abhängig. Beim *Coradia Continental* ist zur Unterdrückung von Störströmen, die mit Gleisstromkreisen interferieren könnten, ein spezielles Netzfilter installiert worden, das an eine Tertiärwicklung des Transformators angeschlossen wird. Zusammen mit speziellen Software-Algorithmen für die Regelung des 4QuS werden so die einschlägigen Grenzwerte in allen relevanten Betriebszuständen eingehalten.

Im unteren Teil *b)* von Bild 4 erkennt man genau die gleichen Komponenten, wobei links das *Hesop*-Gleichspannungs-Unterwerk dargestellt ist und rechts der typische Drehstromantrieb eines Zuges, bestehend aus Umrichter und Fahrmotoren. Die Schnittstelle zwischen stationärem und beweglichem Teil liegt im Pendant des Gleichspannungs-Zwischenkreises, hier ausgeführt als Oberleitung und (geerdete) Schiene. Die Oberschwingungs-

Kompensation geschieht gleichermaßen zweistufig, wobei der Eingangstransformator in Spannung und Frequenz an das jeweilige dreiphasige Mittelspannungsnetz adaptiert werden muss.

Auf die Darstellung von Schutzmaßnahmen ist in Bild 4 bewusst verzichtet worden. Selbstverständlich sind diese in beiden Varianten vorhanden und den individuellen Erfordernissen entsprechend ausgeführt; dabei werden Leistungsschalter, Trenner und auch Halbleiter zur schnellen Begrenzung von Überspannungen eingesetzt.

Ein spezieller Aspekt soll an dieser Stelle jedoch noch behandelt werden, weil er aufgrund der räumlichen Ausdehnung eines Gleichspannungsnetzes von besonderer Bedeutung für dessen Auslegung ist: der Kurzschlussfall [4].

Bei Gleichstrombahnen mit klassischer Energieversorgung ist der Übergang von hohen Betriebsströmen I_{Bmax} zum minimalen Kurzschlussstrom I_{kmin} fließend, weil der Schleifenwiderstand des Netzes, bestehend aus Unterwerk und Oberleitung, ohmsch-induktiv ist. Folglich muss ein hinreichend großer Abstand zwischen beiden Szenarien eingehalten werden, um Fehlauflösungen zu verhindern. Mit einem *Hesop*-Unterwerk ist das Verhalten am Netz anders: Zum einen ist wegen der dynamischen Spannungsregelung (Bild 3) der Betriebsstrom bei gleicher Fahrzeuggesteuerung geringer. Zum anderen ist der Stromanstieg di/dt im Kurzschlussfall höher, weil die wirksame Netzimpedanz wegen des Glättungskondensators ohmsch-kapazitiv ist. Dieser Effekt kann beim *Hesop* höherer Leistung so groß sein, dass zum Schutz der Halbleiter eine zusätzliche Drosselspule am Ausgang erforderlich ist. Diese Betrachtung liefert den Grund dafür, dass *Hesop* auch aus schutztechnischen Gründen eine Erhöhung der Verkehrsleistung ermöglicht, wenn die klassische Technologie an ihre Grenzen stößt.

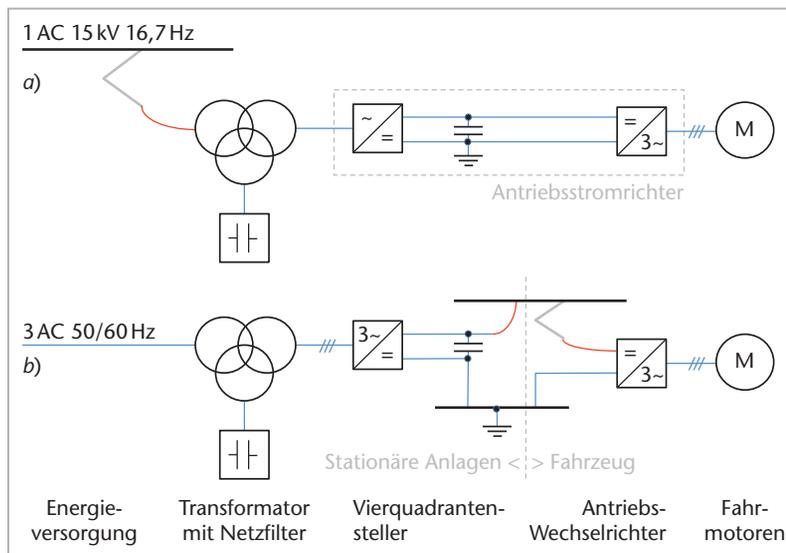


Bild 4:

Analogie der Prinzipschaltbilder.

- a) Regionaltriebzug *Coradia Continental* BR 440/1440, Antriebssystem
- b) *Hesop*-Gleichspannungs-Unterwerk mit Straßenbahn-Antrieb



Bild 5:

„Smarte“ Energieversorgung einer Straßenbahn mit *Hesop*.

3 Hesop-Produktplattform

Äußerlich unterscheiden sich die Anlagen mit *Hesop*-Technologie überhaupt nicht von einer klassischen Bahnenergieversorgung und sie sind auch flexibel in bestehende Gebäudestrukturen integrierbar. Bild 5 visualisiert den Energiefluss von der Mittelspannungs-Verteilung über einen Unterwerks-Container mit Drehstromtransformator und Stromrichtergerätschrank bis zur Straßenbahn-Oberleitung – oder umgekehrt.

Hesop ist vollständig modular aufgebaut und als Produktplattform in zwei Leistungsklassen verfügbar:

Für den Straßenbahnsektor liefert der Stromrichter eine Nennleistung von 1,2 MW bei 750 V, beziehungsweise 1,0 MW bei lediglich 600 V. Er ist kurzzeitig stark überlastfähig, nämlich mit dem vier-

TABELLE 2

Aktuelles Portfolio der Hesop-Produktplattform von Alstom.				
	Hesop 600V / 1,0MW	Hesop 750V / 1,2MW	Hesop 750V / 2,0MW	Hesop 1500V / 4,0MW
Leistungsfähigkeit im Gleichrichter-Modus: Traktion				
AC-Netzfrequenz	50Hz, adaptierbar auf 60Hz			
DC-Nennleistung	1,0MW	1,2MW	2,0MW	4,0MW
maximale DC-Ausgangsleistung	4,5MW für 15s	5,4MW für 15s	6,0MW für 60s	12,0MW für 60s
Ausgangsspannung	600V...660V	750V...825V	750V...825V	1500V...1650V
Überlastbarkeit nach EN 50328	Klasse VII: 150% für 2h, 300% für 1min, 450% für 15s		Klasse VI: 150% für 2h, 300% für 1min	
Leistungsfähigkeit im Wechselrichter-Modus: Rückspeisung				
AC-Netzfrequenz	50Hz, adaptierbar auf 60Hz			
DC-Nennleistung	0,78MW	0,92MW	1,5MW	3,0MW
maximale DC-Ausgangsleistung	3,51MW für 15s	4,14MW für 15s	4,65MW für 60s	9,3MW für 60s
Überlastbarkeit nach EN 50328	Klasse VII: 150% für 2h, 300% für 1min, 450% für 15s		Klasse VI: 150% für 2h, 300% für 1min	
elektrische Charakteristik				
Technologie	IGBT (vollständig)			
Wirkungsgrad	> 97%			
Leistungsfaktor	1 (einstellbar)			
Verzerrung	< 5% harmonisch			
Spannungswelligkeit	< 4%			
Kühlung	selbstbelüftet		zwangsbelüftet	
mechanische Charakteristik				
Stromrichter-Maße Breite x Höhe x Tiefe	4600mm x 2400mm x 800mm		5000mm x 2400mm x 800mm	8800mm x 2400mm x 800mm
Netzfilter-Maße Breite x Höhe x Tiefe	1200mm x 600mm x 600mm		1200mm x 1800mm x 600mm	
Hesop entspricht den REACH-Standards.				

einhalbfachen Nennstrom für 15s entsprechend Klasse VII nach EN 50328. Das sind über 5MW Ausgangsleistung. Dieser Typ ist auch zweisträngig erhältlich, mit verdoppelter Leistungsfähigkeit bei Konzentration der Installation an einem Ort.

Für Nahverkehrsbahnen mit höherem Leistungsbedarf gibt es eine Variante mit 2,0MW bei 750V, die für 60s den dreifachen Nennstrom abgeben kann entsprechend Klasse VI nach EN 50328. Schaltet man zwei dieser Hesop-Module ausgangsseitig in Reihe, sind nominal 4,0MW an 1500V verfügbar, beziehungsweise eine Spitzenleistung von 12MW.

Der Drehstromtransformator muss zur Oberschwingungskompensation einer besonderen technischen Spezifikation genügen und an die Netzparameter des Energieversorgers angepasst werden. Derzeit gibt es verschiedene Ausführungen für 50 und 60Hz, die nicht standardisierbar sind. Eine vollständige Übersicht der aktuellen Hesop-Produktplattform enthält Tabelle 2.

Bezüglich der notwendigen Schutztechnik werden die gleichen Prinzipien angewandt wie bei der klas-

sischen Technologie. Vorhandene oder neue Komponenten unterschiedlicher Hersteller können integriert werden. Für die Einbindung eines Hesop-Umrichters in die bestehende Netzleittechnik liegen detaillierte Schnittstellenbeschreibungen und Spezifikationen vor.

4 Hesop-Pilotanwendungen

Von 2011 bis 2014 war der Hesop-Prototyp bei der RATP (*Régie Autonome des Transports Parisiens*) im Einsatz und versorgte die Pariser Straßenbahnlinie 1 mit elektrischer Energie. Hier konnte man wertvolle Erfahrungen im täglichen Betrieb sammeln, die in die Serienentwicklung der Produktplattform eingeflossen sind. So konnte der Platzbedarf für den Stromrichter trotz einer Umstellung von Wasser- auf Luftkühlung minimiert werden, was die Investitionssumme senkt. Nach Ende dieser Erprobungsphase wurde in London das Pilotprojekt für die aktuelle Serie in Betrieb genommen, und weitere Applikationen aus der gesam-

ten Bandbreite werden in den kommenden Jahren folgen. Mittlerweile gibt es Lieferverträge auf allen Kontinenten, wie Tabelle 3 demonstriert.

Zwei dieser Projekte seien beispielhaft herausgegriffen, um aufzuzeigen, welche unterschiedlichen Bedürfnisse bei den verschiedenen Kunden bestehen und mittels *Hesop* befriedigt werden können:

Bei der London Underground handelt es sich um ein typisches Modernisierungsprojekt, um ein netzspezifisches Problem zu lösen. Die gesteigerte Verkehrsdichte einerseits und der erhöhte Anspruch an die Fahrzeugklimatisierung andererseits haben den Lüftungsbedarf in den engen Tunnelröhren so stark ansteigen lassen, dass der bauliche und energetische Aufwand nicht mehr beherrschbar erschien. Dank *Hesop* ist der Wärmeeintrag durch die Bremswiderstände entfallen, und „ganz nebenbei“ wird von einem einzigen Unterwerk eine tägliche Energiemenge von 800 kWh rückgewonnen, was für die Versorgung zweier mittelgroßer Tunnelstationen ausreicht.

Sydney hat für sein schlüsselfertiges Neubauprojekt den Investitionsumfang insgesamt minimiert, weil *Hesop* längere Speiseabschnitte ermöglicht und somit weniger Unterwerke benötigt werden. Zudem hat der Kunde eine umweltfreundliche, energie-optimale Lösung gewählt und wird eine „smarte“ Technologie für unterschiedliche Betriebszenarien bekommen.

5 Fazit

Es ist unstrittig, dass dem sorgsamem Umgang mit Energie zukünftig noch mehr Bedeutung zukommen wird als bisher, um die gefährliche Spirale zwischen Bevölkerungswachstum, Verstädterung, Verkehrszunahme und Klimawandel bewältigen zu können. Deshalb befinden sich vielfältige „smarte“ Ansätze in der öffentlichen Diskussion und in der technischen Erprobung, auch wenn sie noch nicht in allen Fällen marktreif, geschweige denn für den Nutzer wirtschaftlich sind.

Bei der „smarten“ Bahnenergieversorgung ist man aber schon einen Schritt weiter, denn die hier vorgestellte Technologie ist im Fahrzeugsektor seit langem Stand der Technik und hat auch in der neuen stationären Anwendung ihre Betriebstauglichkeit bewiesen. In Bezug auf Wirtschaftlichkeit haben Neubauprojekte offensichtlich die Nase vorn (Tabelle 3), weil ohnehin ein großes Investitionsbudget vorhanden ist und viele Systemvorteile (Bild 6) direkt zum Tragen kommen können.

Das soll aber nicht heißen, den Modernisierungsmarkt vernachlässigen zu wollen; im Gegenteil: Stoßen die existierenden Netze an ihre physikalischen Grenzen, die sich in den Größen Spannung, Strom, Leistung und Energie ausdrücken lassen, müssen die

TABELLE 3				
Übersicht der weltweiten <i>Hesop</i> -Installationen in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft.				
		Projekt/Kunde	Anzahl/Typ	Betriebsaufnahme
	Frankreich	Paris Tramway T1 RATP	1 <i>Hesop</i> (750V/0,9MW)	2011–2014
	Großbritannien	London Metro Victoria Line London Underground Ltd.	1 <i>Hesop</i> (600V/1 MW)	2015
	Italien	Milano Metro Line 3 ATM	1 <i>Hesop</i> (1 500V/4 MW)	2016
	Saudi Arabien	Riad Metro Lines 4, 5 & 6 ADA	70 <i>Hesop</i> (750V/1,2MW)	2017
	Australien	Sydney CBD & South-East Light Rail Transport for New South Wales	9 <i>Hesop</i> (750V/1,2MW) + 4 <i>Hesop</i> (750V/2MW)	2017
	Italien	Milano Desio-Seregno Tramway CMC di Ravenna	16 <i>Hesop</i> (600V/1 MW)	2019
	Panama	Panama Metro Line 2 SMP	8 <i>Hesop</i> (1 500V/4MW)	2019

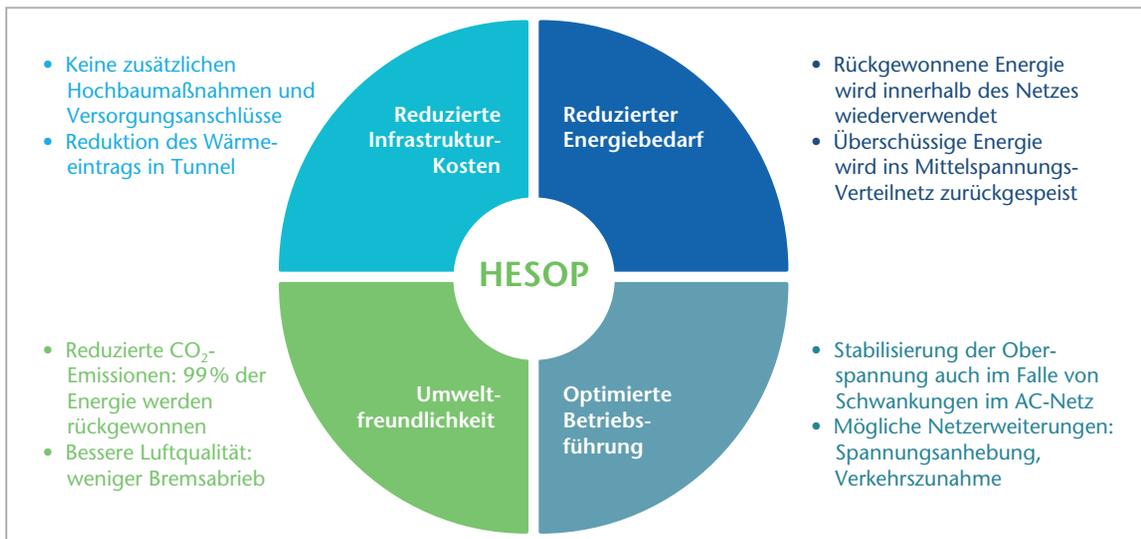


Bild 6: Portfolio an Verbesserungen durch Einsatz eines 4QuS im Unterwerk.

möglichen Auswege individuell untersucht werden. Dies geschieht am besten anhand von Netzsimulationen, um im Kontext von betrieblichen, technischen und kommerziellen Randbedingungen ein optimales Szenario bestimmen zu können. Alstom und verschiedene Partnerunternehmen bieten den Verkehrsunternehmen diese Dienstleistung an und können dabei klassische und moderne Systeme miteinander vergleichen. So wird sichergestellt, dass aus der großen Vielfalt von Lösungsansätzen diejenigen herausgefiltert werden, die kurz-, mittel- oder langfristig den größten Kundennutzen bieten.

In diesem Zusammenhang ist festzuhalten, dass *Hesop* dank seiner Abwärtskompatibilität durch eine flexible Strom-/Spannungs-Kennlinie und standardisierte Schnittstellen zur Netzleittechnik auch schrittweise in bestehende Netze integriert werden kann, wenn bestehende Unterwerke am Ende ihrer Lebensdauer angelangt sind. Viele vorteilhafte Eigenschaften kann man dann sukzessive und aufwandsarm „freischalten“,

sobald alle technischen Voraussetzungen geschaffen sind und das wirtschaftliche Interesse gegeben ist.

In Anlehnung an Albert Einstein: *Probleme kann man niemals mit derselben Technologie lösen, durch die sie verursacht wurden.* Dieses Plädoyer für Offenheit gegenüber Innovationen gilt auch für die Bahnenergieversorgung, die dank *Hesop* eine „smarte“ Zukunft hat.

Literatur

- [1] Tietze, Ch.: Bahnstrom wieder im Gerede. In: Eisenbahn-Magazin (1996), H. 9, S. 38-42.
- [2] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen: Stadtbahnen in Deutschland (2000), S. 324-346.
- [3] Steimel, A.: Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung. Deutscher Industrie-Verlag (2014), S. 293-302.
- [4] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen: Kurzschluss- und Überlastschutz von Fahrstromanlagen für Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen, VDV-Schrift Nr. 520 (2015).

AUTORENDATEN



Dr.-Ing. Carsten Söffker (42), 1993 Studium des Maschinenbaus mit Fachrichtung Elektrotechnik an der TU Clausthal; ab 1998 Aufbau einer Fachgruppe für die Integration elektrischer Antriebe bei ALSTOM LHB in Salzgitter, ab 2007 Abteilungsleiter Validierung und Zulassung, seit 2016 Technischer Experte für Energiemanagement; 2005 berufsbegleitende Promotion an der TU Clausthal; seit 2006 Leitung des Fachbereichs *Bahnen mit elektrischen Antrieben* der ETG im VDE.

Adresse: Alstom Transport Deutschland GmbH, Linke-Hofmann-Busch-Str. 1, 38239 Salzgitter, Deutschland;
Fon: +49 5341 900-4222, Fax: -6578;
E-Mail: carsten.soeffker@alstom.com



Dr.-Ing. Christoph Gralla (56), Studium Elektrotechnik und bis 1991 Wissenschaftlicher Mitarbeiter Universität Hannover, in 2000 Abschluss Zertifizierter Projektmanager PMF(D), 2009 Promotion; ab 1992 in leitender Funktion mit Projektaufgaben im Salzgitter Anlagenbau, bei AVL in Graz, bei der Krantz TKT, bei der DB Netz AG und bei der Siemens AG tätig; seit 2013 Geschäftsbereichsleiter Leit-/Sicherheitstechnik und Infrastruktur bei der Alstom Deutschland GmbH; Mitglied im Fach- und Kongressbeirat der Zeitschrift *Signal und Draht*, Vertreter der Alstom im VDB BKL und beim ZVEI.

Adresse: Alstom Transport Deutschland GmbH, Repräsentanz Berlin, Friedrichstr. 149, 10117 Berlin, Deutschland;
Fon: +49 30 3309638-17 Fax: -38;
E-Mail: christoph.gralla@transport.alstom.com