

Modernisierung bestehender DC-Bahnstromversorgung mittels *Hesop*

Nicolas Nevot, Paris (FR); Carsten Söffker, Salzgitter

Netzerweiterungen und Verkehrszunahme im öffentlichen Nahverkehr stellen besondere Anforderungen an die Bahnenergieversorgung. Im Vergleich zu anderen Lösungen bietet das System *Hesop* diesbezüglich einige entscheidende Vorteile. Aufgrund seiner dynamischen Spannungsregelung reicht die Modernisierung bestehender Anlagen und man kann auf neue Unterwerke verzichten. Dann sinken sowohl die notwendigen Investitionen als auch die Betriebskosten, weil dank *Hesop* sämtliche Bremsenergie genutzt wird.

MODERNISATION OF EXISTING DC RAIL POWER SUPPLY SYSTEMS BY MEANS OF *HESOP*

Network extensions and traffic increase in urban railway systems impose special requirements on the power supply. Compared against other solutions, *Hesop* provides some relevant advantages in this respect. Due to its dynamic voltage regulation it is sufficient to refurbish existing installations, so that new sub-stations are not needed. This reduces both the necessary investment as well as the operational expenditure, because thanks to *Hesop* all available brake energy is recovered.

MODERNISATION DES SYSTÈMES EXISTANT D'ALIMENTATION DE TRACTION EN COURANT CONTINUE AU MOYEN D'*HESOP*

Les extensions de réseau et l'augmentation de trafic dans les systèmes ferroviaires urbains imposent des exigences particulières à l'alimentation électrique. Par rapport aux autres solutions, *Hesop* offre des avantages pertinents à cet égard. En raison de sa régulation de tension dynamique, il suffit de rénover les installations existantes, de sorte que de nouvelles sous-stations ne sont pas nécessaires. Cela réduit à la fois les investissements nécessaires ainsi que les dépenses opérationnelles, car grâce à *Hesop*, toute l'énergie de freinage disponible est récupérée.

1 Einführung

Hesop ist in [1] als *smarte Energieversorgung* für Nahverkehrsbahnen auf der ganzen Welt vorgestellt worden. Neben anderen neuen Freiheitsgraden für den Betreiber sind die wesentlichen Vorteile

- eine dynamische Spannungsregelung unabhängig von der Belastung
- die Möglichkeit, einen Überschuss an Bremsenergie in das AC-Netz zurückzuspeisen.

Beide Aspekte können nicht nur für Streckenerweiterungen oder ganz neue Verkehrssysteme sehr attraktiv sein, sondern auch für die Modernisierung bestehender Netze. Über die reine Kosteneinsparung durch Reduktion des Energieverbrauchs für den öffentlichen Verkehr hinaus ergibt sich ein positiver Effekt bezüglich des CO₂-Ausstoßes der Region. Dieser Faktor gewinnt auf politischer Ebene immer mehr an Bedeutung.

Während die Auswirkungen steigender Anforderungen an den Reisekomfort (beispielsweise durch Klimatisierung) ebenfalls kompensiert werden müssen, hat die Verstädterung als solche den größten Einfluss. Sie führt zu einem Anstieg der Transportleis-

tung mit Konsequenzen für den Energie- und Leistungsbedarf. Aufgrund der Fähigkeit zur Spannungsregelung ist *Hesop* eine Option, um auch diesen letztgenannten Punkt zu adressieren.

Die gesamte Produktlinie ist mit dem Ziel entwickelt worden, einfach in bestehende Bahnenergieversorgungssysteme integrierbar zu sein.

2 *Hesop*-Architektur

2.1 Hauptstromkreis

Das System *Hesop* (Bild 1) besteht aus drei Hauptkomponenten: dem Transformator, dem Netzfilter und dem Stromrichter. Für die *High Power*-Leistungsklasse wird auf der Gleichspannungsseite eine Drosselspule als vierte Komponente erforderlich. Die Schnittstellen zur übrigen Unterwerksausrüstung entsprechen denen eines klassischen Diodengleichrichters. Auf der Wechselspannungsseite wird ein Mittelspannungsschalter benötigt, um den Transformator und den Stromrichter zu schützen. Auf der Gleichspannungsseite speist das *Hesop*-System direkt

auf die Sammelschiene mit einem oder mehreren Leistungsschaltern in den Abgangsfeldern.

Der Transformator ist an die spezielle Verwendung angepasst worden. Die Primärspannung wird verglichen mit einem klassischen Gleichrichter auf ein niedrigeres Niveau reduziert, weil der nachgeschaltete Stromrichter im Traktionsbetrieb als Hochsetzsteller arbeitet. Hierzu wird, wie bei jedem einphasigen Vierquadrantensteller auf Wechselstrom-Triebfahrzeugen auch, die sekundärseitige Induktivität des Transformators als Energiespeicher benutzt. Darüber hinaus bildet die Streuinduktivität der Wicklungen auch einen Teil des Netzfilters, mit dem die netzseitigen Oberschwingungen kompensiert werden. Diese Neuerung ist eine der Innovationen von *Hesop* und erlaubt eine geringe Baugröße des Filters, der nur noch aus Kondensatoren besteht. Sie ist ein weiterer Grund dafür, dass kein Standard-Gleichrichtertransformator verwendet werden kann.

Die Leistungsmodule setzen sich aus Standard-IGBT-Modulen zusammen, und werden in einer einfachen dreiphasigen Brücke verschaltet. Diese Architektur ist in Schienenfahrzeugen Stand der Technik, jedoch mit geringerer Leistung. In der *Hesop*-Anwendung müssen die Module sowohl hohe Überlastzyklen als auch hohe Kurzschlussströme ertragen können. Folglich sind sie leistungsfähiger und in Parallelschaltung aufgebaut, mit hoher Lebensdauer

infolge gleichmäßiger Stromverteilung. Am Ausgang des Stromrichters sind sowohl ein Gleichstromschalter als auch ein manueller Trenner vorgesehen, um die Anlage betrieblich oder im Wartungsfall freischalten zu können. In der hohen Leistungsklasse (750 V/2 MW und 1 500 V/4 MW) ist weiterhin eine Drosselspule vorzusehen. Im Falle eines – insbesondere unterwerksnahen – Kurzschlusses reduziert sie den Stromanstieg, um die Freilaufdioden in den IGBT-Modulen zu schützen.

Im aktiven Stromrichter ist das Steuergerät *Agate AUX 3 (AA3)* Steuergerät integriert. Diese von Alstom entwickelte Elektronik wird standardmäßig in zahllosen Zügen eingebaut, um die Antriebs- oder Bordnetzumrichter zu steuern. Die Verwendung desselben Steuergerätes für *Hesop* stellt sowohl Betriebserfahrung als auch Obsoleszenzmanagement sicher. Dabei regelt die AA3 nicht nur die IGBT-Pulsmuster, sondern überwacht auch alle Betriebsmodi und Parameter des Stromrichters. Im Falle abnormaler Spannungen oder Ströme wird bedarfsweise der externe Schutz ausgelöst. Einige Schutzmechanismen, wie die Gerüstschlussüberwachung (64er Relais) zur Detektion von Leckströmen zwischen Geschränk und Erde oder auch die thermische Überwachung der IGBT-Kühlkörper, werden intern realisiert. Die AA3 wird weiterhin benutzt, um alle

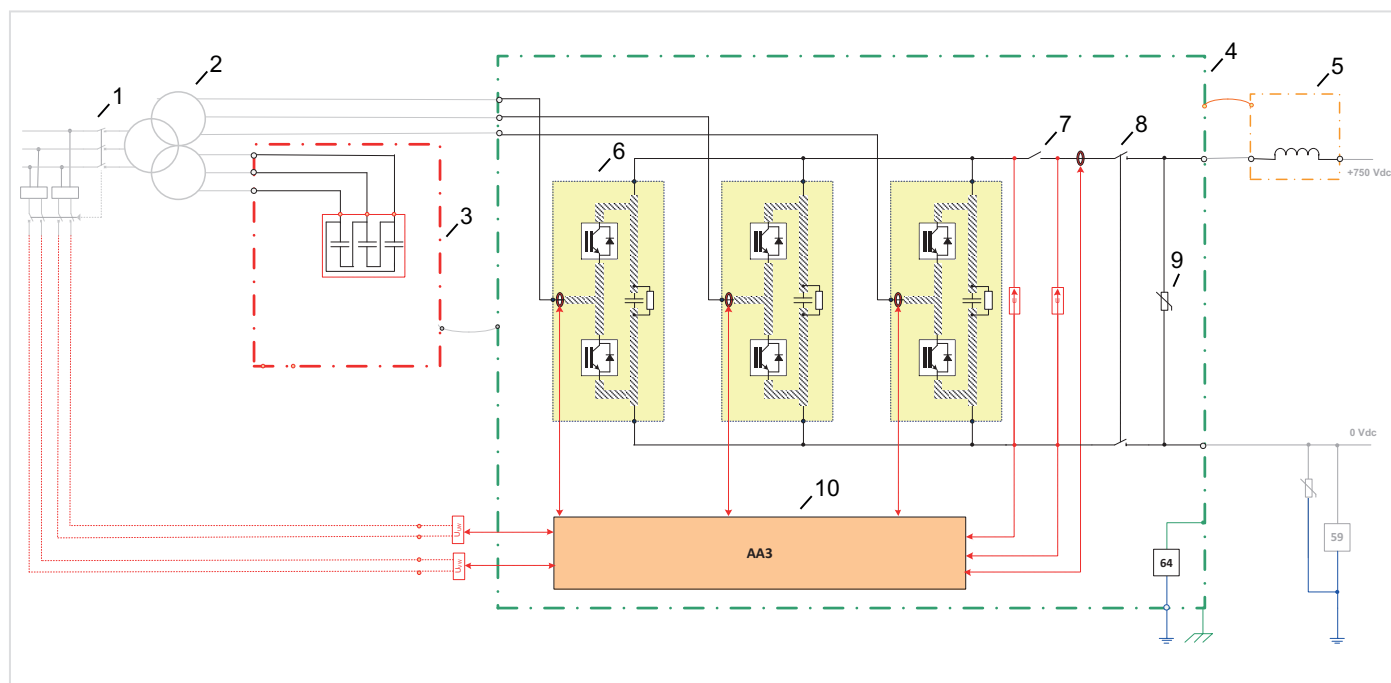


Bild 1:

Hauptstromkreis am Beispiel von *Hesop 750 HP*.

- | | | | | | |
|---|-----------------------------|---|--|----|--|
| 1 | Mittelspannungsschaltanlage | 5 | Ausgangsdrossel | 8 | zweipoliger Trenner für Wartungszwecke |
| 2 | Transformator | 6 | IGBT-Halbbrücke mit Zwischenkreiskondensator | 9 | Überspannungsschutz |
| 3 | Netzfiltermodul | 7 | einpoliger Kuppelschalter | 10 | Steuergerät |
| 4 | Stromrichter | | | | |



Bild 2:

Installation der *Hesop 750 LP* Stromrichterschranke.

- 1 DC-Ausgangsschrank mit Bedienhebel für den manuellen Trenner
- 2 Leistungsmodule (ein Schrank pro Phase)
- 3 Steuerschrank mit Bedienelementen und Display

Status- und Fehlermeldungen, Messwerte und die Energiebilanz über eine *modbus TCP/IP*-Schnittstelle zu übertragen. Das *Hesop*-System kommuniziert über Steuerleitungen mit der übrigen Ausrüstung im Unterwerk, namentlich dem Mittelspannungsschalter, der Gleichspannungsschaltanlage und dem Not-Aus-System, soweit vorhanden. Um den Geräteschutz und die elektrische Sicherheit zu gewährleisten, können im Fehlerfall die Leistungsschalter sowohl auf der Eingangs- als auch der Ausgangsseite ausgelöst werden.

2.2 Montageanforderungen

Betrachtet man die mechanische Integration in ein Unterwerk, so hängt die Größe des Transformators im Wesentlichen von der Mittelspannungsebene und der Leistung ab. Üblicherweise kann er an derselben Stelle installiert werden wie ein klassischer Transformator. Der Netzfilter muss in maximal 5 m Entfernung zum Transformator aufgestellt werden, um die parasitäre Induktivität der Verkabelung klein zu halten. Dies ist zur Filterung von Oberschwingungen erforderlich.

Der *Hesop*-Stromrichter selbst besteht typischerweise aus fünf Schränken:

- ein Steuerschrank
(600 mm x 800 mm x 2500 mm)
- drei Schränke mit Leistungsmodulen
(1200 mm x 800 mm x 2500 mm)
- ein DC-Ausgangsschrank
(600 mm x 800 mm x 2500 mm)

Diese Schränke müssen nebeneinander aufgestellt werden, wie in Bild 2 für das Beispiel des Stromrichters *Hesop 750 LP* dargestellt. Die Leistungsklasse

Hesop 750 HP weist die gleiche Baugröße auf, mit Ausnahme des DC-Ausgangsschranks, der 1000 mm breit ist. Für die 1500 V-Lösung werden drei weitere Schränke mit Leistungsmodulen benötigt (siehe 5.2). Zur Vereinfachung von Installation und Wartung wird empfohlen, auf der Vorderseite einen Raum von 1300 mm freizuhalten. 200–400 mm auf der Rückseite stellen eine gute Belüftung der IGBT-Kühlkörper sicher. Nötigenfalls muss für die Drossel ein Aufstellplatz von etwa 1 m x 1 m gefunden werden, wobei keine weiteren Installationsanforderungen bestehen.

2.3 Produktvalidierung

Hesop wurde im belgischen Charleroi basierend auf den langjährigen Erfahrungen mit Antriebs- und Bordnetzumrichtern für Schienenfahrzeuge entwickelt. Vor der Installation des ersten Seriengerätes in London (siehe 5.1) sind die Komponenten im Prüffeld einem ausführlichen Typtest unterzogen worden (Bild 2). Auf dem Prüfstand steht einerseits eine ohmsche Last bis zu einer Leistung von 5,4 MW zur Verfügung, um den Stromrichter in seinem gesamten Arbeitsbereich betreiben zu können. Andererseits wurden Gleichrichter eingesetzt, um die Rückspeisefähigkeit in das 11-kV-Werksnetz überprüfen zu können.

Dank eines solchen Systemprüffeldes sind alle Versuche entsprechend der Normen EN 50328 [2] und EN 50327 [3] durchgeführt worden, einschließlich der thermisch kritischen Überlastzyklen für Klasse VI oder VII sowie der Kurzschlussstest. EMV-Tests haben die Übereinstimmung mit den Anforderungen aus der EN 50121-5 [4] bestätigt. Schließlich wurde der gleiche Aufbau um weitere Lastwiderstände ergänzt, damit auch die Ausführung *Hesop 750 HP* mit 6 MW Überlast für das Projekt in Sydney validiert werden konnte. Weiterhin wurden spezielle funktionale Tests in diesem Umfeld durchgeführt. Aufgrund der parallelen Fertigung von Antriebsstromrichtern bestand die Chance, damit einen kombinierten Versuch durchzuführen. Vom *Hesop*-System versorgt und mit Lastmaschinen an den Fahrmotoren, konnte eine komplette Streckenfahrt des Zuges simuliert werden.

Später wurden zur Validierung des *bi-group*-Arrangements für das Projekt in Riad zwei Stromrichter ausgangsseitig parallelgeschaltet. Damit ließen sich die Ein- und Ausschaltprozeduren verifizieren sowie die Lastaufteilung in beiden Energieflussrichtungen optimieren (Bild 3). Diese Prüfumgebung hat Alstom gestattet, die Produktplattform über ihren gesamten Betriebsbereich zu validieren, sogar darüber hinaus zu testen und Fehler zu beheben, die ansonsten erst während der Installation und Inbetriebnahme am Einsatzort aufgefallen wären.

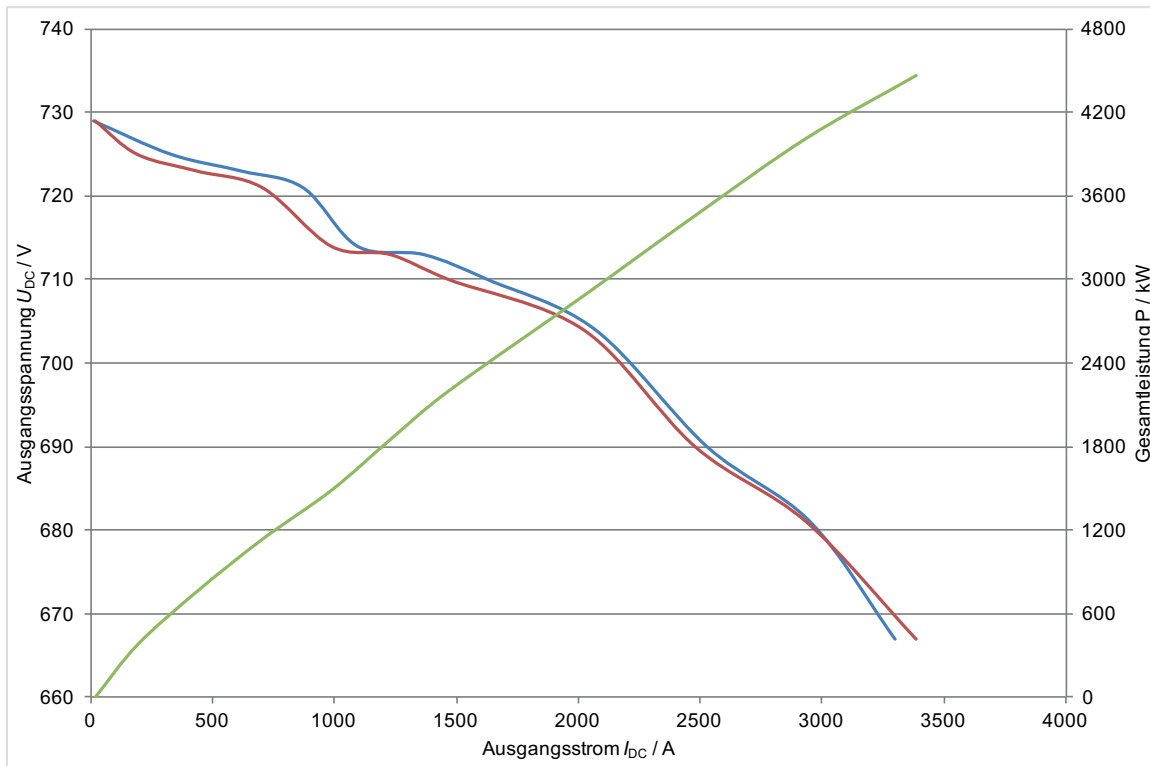


Bild 3:
Hesop 750 LP bi-group
– Lastaufteilung
zwischen zwei
Stromrichtern in
Parallelschaltung.
blau Hesop 1
rot Hesop 2
grün Gesamtleistung

3 Alternative Lösungen

3.1 Stationäre Energiespeicher

Verschiedene Nahverkehrsbetriebe in Deutschland haben schon ihre Erfahrungen mit Schwungradspeichern gemacht, die typischerweise weit außerhalb der Stadtzentren installiert wurden, wo die Zugdichte niedriger ist und mehr Energie in den Bremswiderständen der Fahrzeuge in Wärme umgewandelt wurde. Das Grundkonzept wird in [5] gut beschrieben, wie kinetische Energie zwischen einem fahrenden Zug und einer rotierenden Schwungradmasse mithilfe von Stromrichtern und der Fahrleitung ausgetauscht wird. Ein weiterer positiver Effekt ist die Stabilisierung der Fahrleitungsspannung, vorausgesetzt der Speicher ist nicht in der Nähe eines Unterwerkes aufgestellt worden. Während die Städte Hamburg, Hannover, Köln und Freiburg ein System gewählt haben, das von einem industriellen Notstromaggregat abgeleitet wurde, haben sich Bremen und Zwickau für eine innovativere Lösung mit einem Kohlefaser-Schwungrad entschieden. Derartige Systeme sind eigentlich für mobile Anwendungen entwickelt worden. Es zeigte sich allerdings, dass die mechatronische Komplexität nicht einfach zu beherrschen ist [6]. Bild 4 illustriert den Aufbau.

Aus rein energetischer Sicht haben sich die Schwungradspeicher gut bewährt. Sie können zudem die Einspeisung in das Bahnenergienetz ver gleichmäßigen und machen Verhandlungen mit dem Stromversorger und Netzbetreiber entbehrlich, weil keine Rückspeisung in die Mittelspannungsebene er-

folgt. Jedoch handelt es sich im Gegensatz zu Hesop um Einheiten, die zusätzlich zur bestehenden Infrastruktur errichtet und unterhalten werden müssen, konstruktionsbedingt eine beschränkte Kapazität aufweisen und eine höhere Ausfallwahrscheinlichkeit haben. Folglich sind Schwungradspeicher nur bedingt geeignet, mit der betrieblich erforderlichen Zuverlässigkeit höhere Verkehrsdichten (siehe 4.2) oder Streckenverlängerungen zu ermöglichen (siehe 4.3).

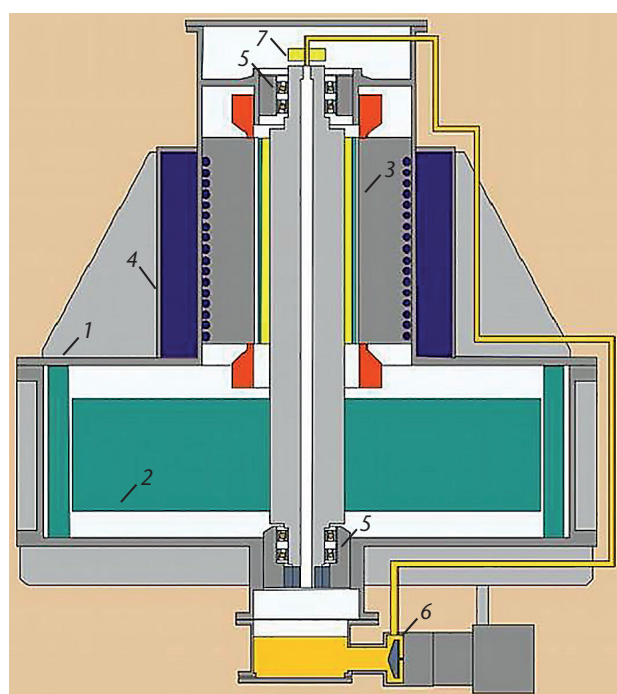


Bild 4:
Querschnitt durch das Gehäuse eines Schwungradspeichers. (Grafik: Rosseta)
1 Gehäuse
2 Schwungrad
3 Motor/Generator
4 Wasserkühlung
5 Lagerung
6 Ölschmierung
7 Dauermagnet (zur axialen Entlastung der Lager)

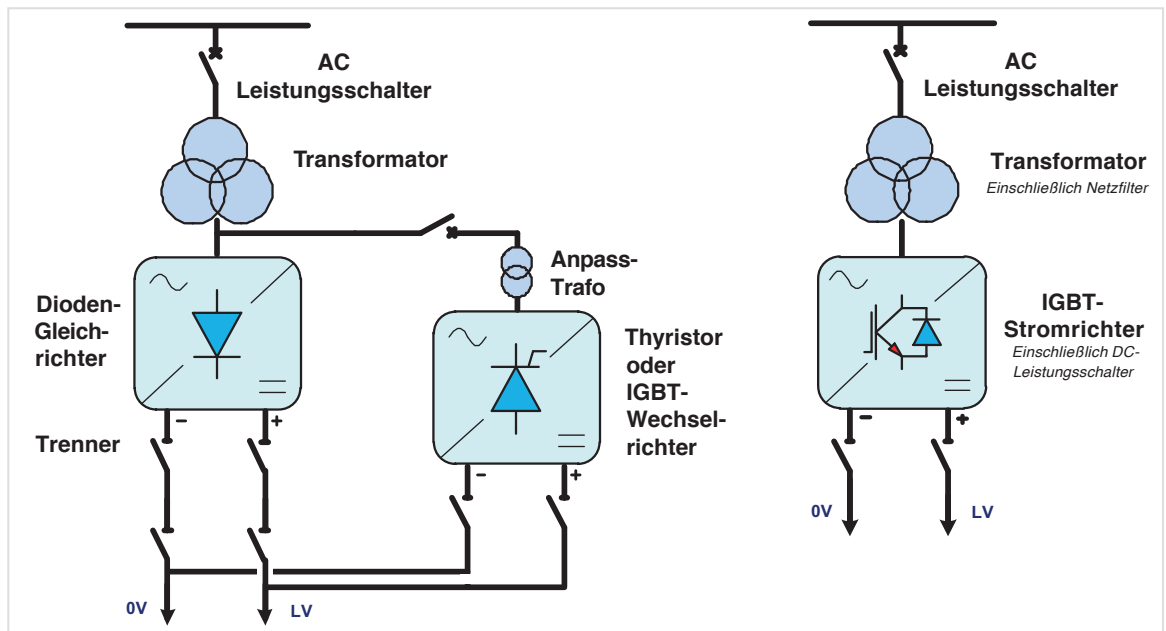


Bild 5: Unterschiedliche Architekturen bidirektionaler Unterwerke.
 links klassischer 12-pulsiger Gleichrichter mit antiparallelem Wechselrichter
 rechts Hesop Vierquadrantensteller „aus einem Guss“

3.2 Antiparallele Wechselrichter

Ein weiterer Ansatz, Bremsenergie zu rekuperieren, basiert auf einem dreiphasigen Wechselrichter, der entsprechend Bild 5 antiparallel zum Gleichrichter installiert wird. Diese Architektur erfordert einen zusätzlichen Anpasstransformator an das Spannungsniveau der Sekundärseite im Hauptstrang. Alternativ kann der Wechselrichter genutzt werden, ein AC-Inselnetz zu speisen, das wiederum Bahnhöfe und Werkstätten entlang der Strecke versorgt. Dies ist vom Nahverkehrs Betreiber in Wien umgesetzt worden [7], weil die Rückspeisung ins Landesnetz derzeit nicht zulässig ist.

Die Lösung mit Gleichrichter plus Wechselrichter ist offensichtlich sehr aufwändig, weil sie zwei Stromrichter, zwei Transformatoren und zusätzliche Schalter enthält. Dies ist bezüglich Zuverlässigkeit und Instandhaltung ein klarer Nachteil und erscheint nur dann gerechtfertigt, wenn

- die Antriebsleistung deutlich höher ist als die Bremsleistung,
- die Rückspeisung ins Mittelspannungsnetz unerwünscht ist und der lokale Leistungsbedarf zu niedrig, oder
- die existierenden Diodengleichrichter noch eine lange Lebensdauer vor sich haben.

Das Hesop-System hingegen bietet auf der Ebene des gesamten Unterwerks die gleiche Verfügbarkeit wie eine klassische Lösung: Da der aktive Stromrichter mehr Einzelkomponenten enthält als ein klassischer Diodengleichrichter, ist seine Ausfallrate MTBF (*mean time between failure*) mit einem Wert von 18000 h naturgemäß geringer. Um diesen Effekt zu kompensieren, ist viel in das Thema Instandhaltungsfreundlichkeit investiert worden, mit einer Begrenzung der

MTTR (*mean time to repair*) auf maximal 2 h im Fehlerfall. Dies wird dadurch erreicht, dass das AA3-Steuergerät als einfach tauschbarer Einschub ausgeführt ist, und indem defekte IGBT-Leistungsmodule mithilfe eines Sonderwerkzeuges schnell aus dem Geschränk entfernt werden können. Mit den angegebenen Werten MTBF und MTTR ergibt sich eine Verfügbarkeit von 99,99 %. Weil diese Zielwerte momentan noch auf dem Erfahrungsrückfluss aus anderen Anwendungen derselben Bauteile basieren, müssen sie bestätigt werden, sobald das Hesop-System demnächst in größerer Stückzahl im Einsatz ist.

Prinzipbedingt kann ein Diodengleichrichter weder die Ausgangsspannung regeln, noch kann ein solches System die Netzrückwirkungen auf der Mittelspannungsseite kompensieren. Dies wird auch nicht in jeder Anwendung erforderlich sein, aber im Bedarfsfall bietet das Hesop-System eine zielführende Lösung. Mittels einer Kombination aus aktiver Unterdrückung (Pulsmuster des Vierquadrantenstellers) und passiver Filterung (siehe 2.1) wird die harmonische Verzerrung des Primärstroms auf einen Wert unter 5 % begrenzt.

4 Leistungsfähigkeit

4.1 Mehrstufige Energierückgewinnung

Moderne Fahrzeuge mit Drehstromantrieb erzeugen beim Bremsen elektrische Energie, die zunächst für die bordeigenen Hilfsbetriebe verwendet wird. Der Überschuss wird in die Oberleitung rückgespeist und steht für andere Fahrzeuge im gleichen Speiseabschnitt zur Verfügung. Auch Fahrzeuge in einem anderen Abschnitt können erreicht werden, sofern die-

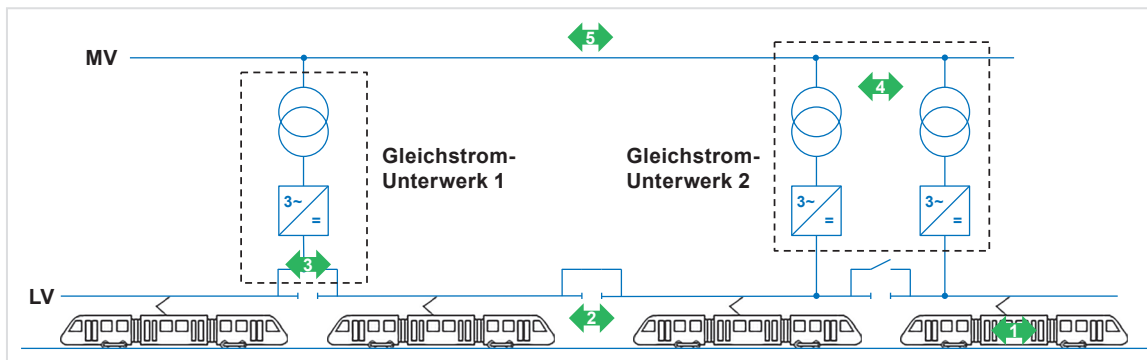


Bild 6:

Mehrstufiger Energieaustausch in einem Stadtbahnsystem, abhängig von der Netzstruktur und Speisearchitektur. Der Austausch erfolgt:

- 1 über den Hauptstromkreis im Fahrzeug, unabhängig von der Fahrleitungsspannung
- 2 über die Oberleitung im Speiseabschnitt, abhängig von der Netzimpedanz
- 3 über die DC-Sammelschiene im Unterwerk, abhängig von den Systemspannungen
- 4 über die AC-Sammelschiene im UW-Gebäude, ohne Verteilnetzbelastung
- 5 über das AC-Verteilnetz, ohne Energieverkauf im Falle von Pooling

ser von der gleichen Sammelschiene im Unterwerk gespeist wird. Neben diesen drei Mechanismen visualisiert Bild 6 zwei weitere Stufen, die nur mit rückspeisefähigen Systemen wie *Hesop* erreichbar sind.

Die vierte Stufe ist dadurch gekennzeichnet, dass zwischen mehreren separaten Strängen eines Unterwerkes Energieaustausch erfolgen kann, ohne „nach außen“ zu gelangen. Dies kann die Akzeptanz seitens des Verteilnetzbetreibers erleichtern. Lediglich in der fünften Stufe fließt Energie über das Verteilnetz, aber es lässt sich gegenüber dem Stromversorger argumentieren, dass negative Leistungsspitzen kurz sind und der summierte Energiebedarf (Viertelstundenwert) eines Pools an Unterwerken immer positiv ist. Somit handelt es sich nicht um eine Erzeugungsanlage im energiewirtschaftlichen Sinne.

Die Gleichstrom-Unterwerke sind in der Darstellung auf ihre Kernkomponenten Transformator und Stromrichter reduziert und transferieren Energie zwischen der Mittelspannungsebene (MV) und der Niederspannung (LV). Die beiden mittleren Fahrzeuge

befinden sich in einem zweiseitig gespeisten Abschnitt und die beiden äußeren in einseitig gespeisten Abschnitten, wobei der linke über die Unterwerks-Sammelschiene mit dem mittleren verbunden ist. An dieser Stelle sei nochmals daran erinnert, dass *Hesop* dank seiner in weiten einstellbaren U/I -Kennlinie sicherstellt, den Energieaustausch primär auf den unteren Ebenen 1-3 abzuwickeln und nur bei

TABELLE 1

Differenzierbarkeit zwischen $I_{k,min}$ und $I_{B,max}$ nach VDV 520 [8] für das Beispiel in Bild 7.

| Parameter | Klassischer Diodengleichrichter | <i>Hesop</i> |
|--|---------------------------------|--------------------------------------|
| Leerlaufspannung U_o | 680 V | 700 V |
| Innenwiderstand R_i | 10 mΩ | Ausgangsspannung 800 V bei Nennstrom |
| Minimaler Kurzschlussstrom $I_{k,min}$ | 3,1 kA | 3,7 kA |
| Einstellwert Streckenschutz | 2,8 kA | 3,35 kA |
| Maximaler Betriebsstrom $I_{B,max}$ | 2,5 kA | 3 kA |

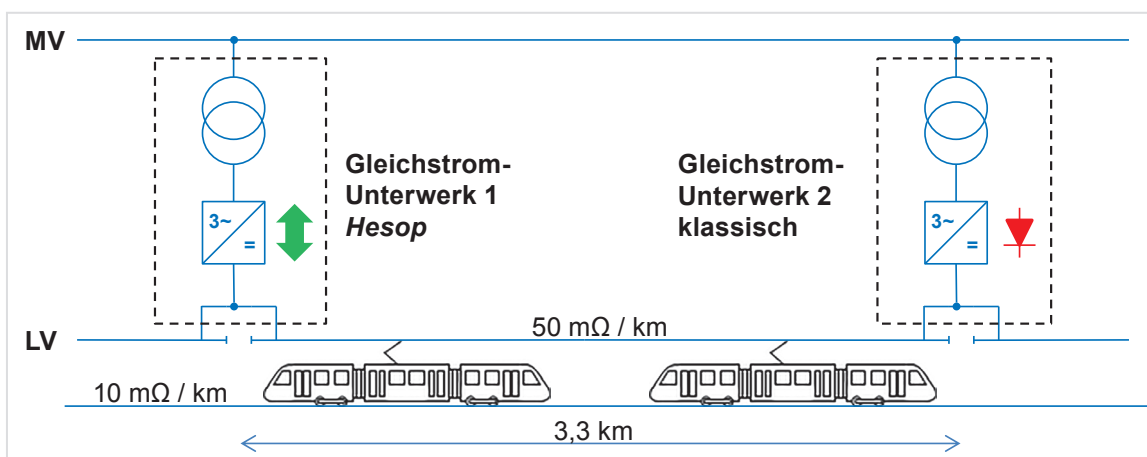


Bild 7:

Einsatz von *Hesop* zur Erhöhung von $I_{k,min}$ in langen Speiseabschnitten.

fehlenden Verbrauchern auf die Mittelspannungsebene „ausweicht“ [1]. Somit wird die Energieeffizienz im System maximiert.

4.2 Erhöhung der Verkehrsdichte

4.2.1 Kurzschlussfall

Für eine Erhöhung des maximalen Betriebsstroms I_{Bmax} in Stadtbahnnetzen kann es vielfältige Gründe geben: kürzere Taktzeiten, längere Zugverbände, stärker motorisierte oder klimatisierte Fahrzeuge. Dabei ist die Leistungsfähigkeit der Bahnstromversorgung oft nicht der begrenzende Faktor, sondern die mögliche Auslösung des Streckenschutzes. Dieser ist nach VDV 520 [8] so einzustellen, dass der minimale Kurzschlussstrom I_{Kmin} sicher detektiert wird. Er tritt bei maximaler Entfernung vom Unterwerk auf, also sind lange Speiseabschnitte der Flaschenhals im Netz. Eine Erhöhung von I_{Kmin} lässt sich mit klassischer Technologie nur durch die Reduktion der Streckenimpedanz erreichen: Entweder mittels zusätzlicher Verstärkungs- oder Speiseleitungen, oder durch eine Verkürzung der Abschnittslänge. Hierzu muss ein zusätzliches Unterwerk errichtet werden, was der kostenintensivste Ansatz ist. Eine dauerhafte Erhöhung der Leerlaufspannung U_0 am speisenden Unterwerk kommt nur in Einzelfällen in Betracht.

Mit der dynamischen Spannungsregelung [1] kann der gleiche Effekt erzielt werden, ohne das Rollmaterial modifizieren zu müssen. Bild 7 zeigt beispielhaft einen solchen Fall, der von einem realen Szenario abgeleitet ist. Der Vergleich zwischen einem klassischen Diodengleichrichter und dem *Hesop*-System ist in Tabelle 1 dargestellt. Mit vergleichsweise geringem Investitionsaufwand lässt sich

der Betriebsstrom I_B um 20 % erhöhen, und das Energiesparpotenzial erhöht die Wirtschaftlichkeit der Installation zusätzlich.

4.2.2 Lastaufteilung zwischen verschiedenen GUV-Typen

Nun ergibt sich die Frage, ob bei einer derartigen asymmetrischen Speisung eine vernünftige Lastaufteilung zwischen den beiden Unterwerken gewährleistet ist. Hierzu wurde ein einfaches Simulationsmodell erstellt, indem die neue Höchstlast I_{Bmax} von 3 kA in einem Punkt konzentriert und dann über den gesamten Speiseabschnitt bewegt wurde. Das Ergebnis ist in Bild 8 dargestellt. Nahe dem *Hesop*-Unterwerk speist dieses den gesamten Laststrom in die Fahrleitung. Erst ab einer gewissen Entfernung findet die gewohnte Lastaufteilung statt. Dieser Knickpunkt liegt dort, wo der Spannungsfall an der Strecke die höhere Speisepotential von *Hesop* kompensiert. Der Ort gleichmäßiger Aufteilung verschiebt sich aus der geographischen Mitte um etwa 500 m in Richtung des klassischen Unterwerkes. Auch im theoretischen Fall einer Lastkonzentration direkt am klassischen Unterwerk löst dessen Streckenschutz nicht aus, obwohl der Wert ja weiterhin nur auf 2,8 kA eingestellt werden darf. Somit ist nachgewiesen, dass schon ein partieller Einsatz eines *Hesop*-Systems die gewünschten Effekte bringt.

4.3 Streckenverlängerung

Ein weiteres, typisches Szenario in deutschen Verkehrsbetrieben ist die abschnittsweise Verlängerung bestehender Linien, um neue Stadtteile zu erschließen oder Vororte und Städte im Umland besser anzubinden. Meist liegen die Streckenlängen im Bereich einiger weniger Kilometer, was die Investitionen über einen längeren Zeitraum vergleichmäßig. Aus Sicht der Bahnstromversorgung ist dieses Vorgehen jedoch nachteilig, weil Ort und Anzahl der Unterwerke schwer optimiert werden können: Bild 9 illustriert beispielhaft die Verlängerung einer Linie um 1,5 km. Das letzte Unterwerk steht am bisherigen Streckenende und speist einseitig zwei Abschnitte.

Eine Versorgung des Neubauabschnitts aus dem bestehenden Unterwerk ist mit klassischen Gleichrichtern nicht machbar, wie Tabelle 2 zeigt: Dabei ist weder der Normalbetrieb problematisch, noch der Kurzschlussfall nach Kapitel 4.2.1, sondern der Ausfall des linken Streckenfeldes. Dann muss der Neubauabschnitt über den Kuppelschalter mit seinem Nachbarn verbunden werden, was die Streckenimpedanz erhöht. Folglich kann bei hoher Last die Fahrleitungsspannung auf einen unzulässig tiefen Wert sinken, denn die Untergrenze U_{min2} nach EN 50163 [9] beträgt 400 V.

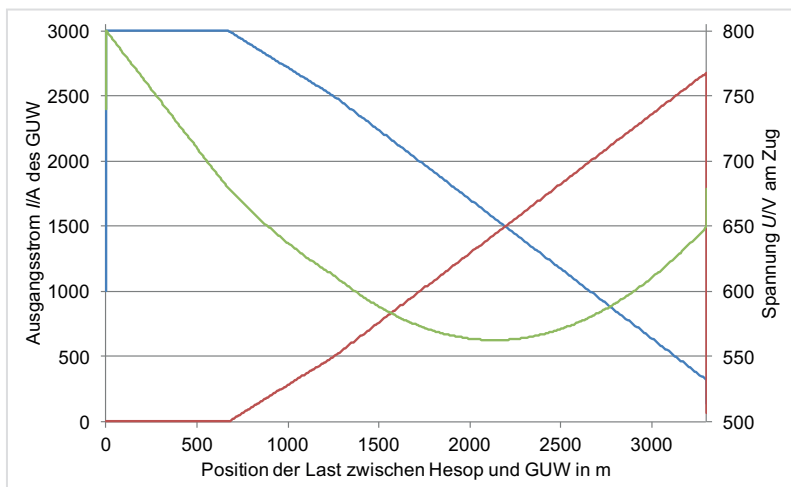


Bild 8: Lastaufteilung bei asymmetrischer Speisung eines Abschnittes.
 blau Ausgangsstrom des *Hesop*-GUV1
 rot Ausgangsstrom des klassischen GUV 2
 grün Fahrleitungsspannung am Zug

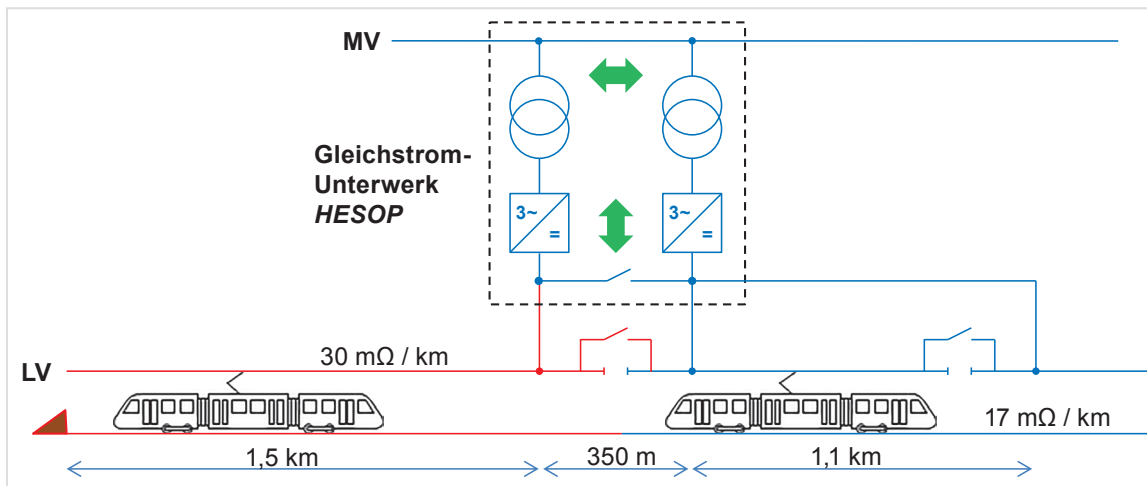


Bild 9: Streckenverlängerung ohne zusätzliches Unterwerk dank HESOP. blau bestehende Stadtbahnlinie mit einem Unterwerk am Ende rot Linienverlängerung um 1,5 km

Auch hier schaffen regelbare Stromrichter Abhilfe: Modernisiert man das Unterwerk mit zwei HESOP-Gruppen, ergeben sich folgende Vorteile:

- Die Fahrleitungsspannung bleibt auch im ungünstigsten Betriebsfall oberhalb von U_{min2} .
- Der minimale Kurzschlussstrom I_{kmin} erhöht sich um 16 %, das bedeutet mehr Reserve.
- Über die AC-Sammelschiene im Unterwerk kann Bremsenergie ausgetauscht werden.

Für eine Ausläuferstrecke mit einseitiger Speisung ist der letztgenannte Aspekt von hoher Bedeutung, weil mit erheblicher Energieeinsparung zu rechnen ist.

| TABELLE 2 | | |
|---|---------------------------------|--------------------------------------|
| Einhaltung der Spannungsgrenze U_{min2} nach EN 50163 [9] für das Beispiel in Bild 9. | | |
| Parameter | Klassischer Diodengleichrichter | Hesop |
| Leerlaufspannung U_0 | 720 V | 720 V |
| Innenwiderstand R_i (beide Stränge) | 5 mΩ | Ausgangsspannung 799 V bei Nennstrom |
| Betriebsstrom I_b (im linken Abschnitt) | 3,6 kA | 3,6 kA |
| Oberspannung U am Streckenende | 294 V | 404 V |
| Minimaler Kurzschlussstrom I_{kmin} | 6,2 kA | 7,2 kA |

5 Referenzprojekte

5.1 London

Im Jahre 2013 hat der Betreiber der Londoner U-Bahn die Installation eines Wechselrichters in einem bestehenden Unterwerk ausgeschrieben. Die Motivation des Kunden beruhte auf der Notwendigkeit, die Rückgewinnung von Bremsenergie zu maximieren und somit den Wärmeeintrag in die engen Tunnelröhren zu reduzieren. Das HESOP-System wurde installiert und zunächst auf die Funktion als Wechselrichter beschränkt, weil das betreffende Unterwerk bereits mit drei 2,5 MW-Gleichrichtergruppen bestückt war, die eine Nennspannung von 630 V liefern – zwischen einer Stromschiene auf einem Potenzial von 420 V und einer vierten Schiene auf einem Potenzial von -210 V.

Auf der 11 kV-Wechselspannungsseite wird der HESOP-Transformator über einen Reserve-Mittelspannungsschalter versorgt. Auf der Gleichspannungsseite sind vier Leistungsschalter installiert worden, je 2 am positiven und negativen Ausgang, um dem speziellen Vierschienensystem in London Rechnung zu tragen. Damit wird die Sammelschiene, die bislang

von einem bestehenden Gleichrichter versorgt wurde, um den HESOP-Stromrichter ergänzt. Das Abgangsfeld mit je einem Streckentrenner für Plus und Minus blieb unverändert. Die Regelung des Wechselrichters ist auf die damalige Bremsspannung der Fahrzeuge von 774 V abgestimmt worden. Sowohl während der nächtlichen Inbetriebnahme, als auch im normalen Fahrgastbetrieb sind Leistungsspitzen

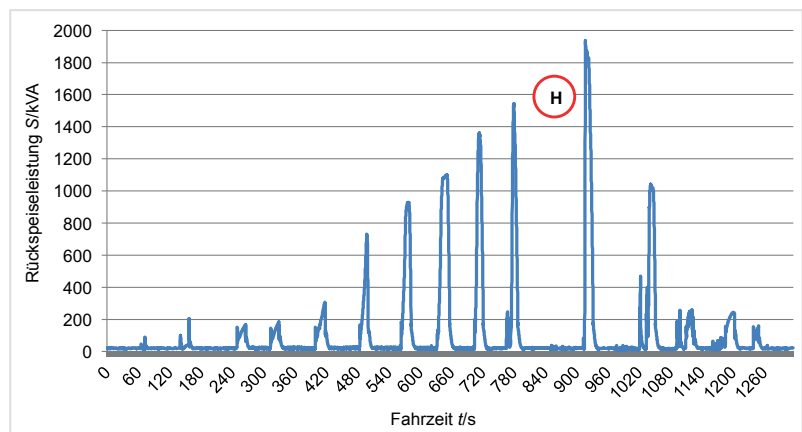


Bild 10: HESOP-Reichweite auf der Victoria Line in London. rot „Position“ des HESOP-Systems im Unterwerk Cloudesley Road

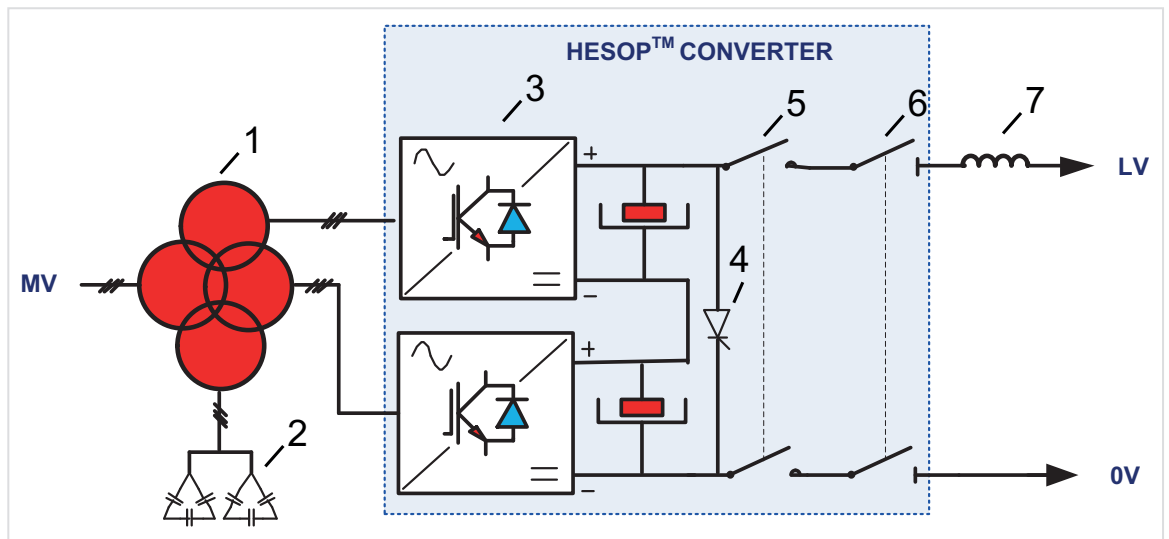


Bild 11:

Hauptstromkreis des *Hesop 1500*.

- | | | |
|------------------------------|--|---------------------------------|
| 1 Transformator | 4 Thyristor als Überspannungsschutz | 6 Trenner für Wartungszwecke |
| 2 Netzfilter | 5 Kuppelschalter | 7 Ausgangsdrossel |
| 3 IGBT-Vierquadrantensteller | | |

bis 4 MW Rückspeisung aufgetreten. Dies übertraf sogar die normale Überlastfähigkeit der Einheit, die im Falle eines bidirektionalen Einsatzes 3,5 MW betragen würde.

Es ist bemerkenswert, über welche Distanzen das *Hesop*-System eine Rückgewinnung von Bremsenergie ermöglicht. Am Beispiel einer Einfahrt von Brixton in nördlicher Richtung bis in die Abstellanlage Northumberland Park zeigt Bild 10 die Rückspeiseleistung am Unterwerk: Während ein gewisser Anteil an Energie entlang der gesamten Strecke von etwa 20 km rückgespeist wird, steigt die Leistung signifikant an, sobald der Zug sich dem Unterwerk nähert und der Spannungsabfall in den Stromschiene sinkt. In einem Radius von 2 km übersteigen die Spitzen 1 MW, und nahe am Unterwerk werden fast 2 MW erreicht.

Vor kurzem hat der Betreiber die Bremsspannung der Fahrzeuge auf 890 V erhöht. Dies erforderte lediglich eine neue Parametrierung des Stromrichters, der technisch bereits für diese Modifikation vorge-rüstet war. Weitere Inbetriebnahmephase zielten auf das Zusammenspiel der Regelung mit der neuen Bremscharakteristik der Fahrzeuge, sowie auf die Leistungsfähigkeit des Wechselrichters. Schließlich hat ein dreitägiges Testprogramm Ende Juli 2017 die Einsatzfähigkeit im kommerziellen Betrieb bestätigt.

5.2 Mailand

Im Unterwerk Rogoredo auf der Linie 3 der Metro Mailand ist im Frühjahr 2017 das erste *Hesop*-System für 1 500 V Nennspannung mit Unterstützung durch das Europäische LIFE+-Programm in Betrieb genom-

men worden. Am Stadtrand gelegen, ist sein Haupt-zweck die Rückspeisung überschüssiger Energie. Im Gegensatz zu der Anwendung in London liefert dieser *Hesop*-Stromrichter auch die Traktionsenergie für die Metro, wobei die existierenden Gleichrichter-Stränge als Reserve erhalten bleiben.

Um Synergien mit der standardmäßigen Produkt-reihe *Hesop 750* zu maximieren, besteht der Vier-quadrantensteller des *Hesop 1500* faktisch aus zwei Stromrichtern *Hesop 750 HP*, wie Bild 11 zeigt. Während diese in quasi-Parallelschaltung vom Eingangstransformator gespeist werden, werden ihre Gleichspannungsausgänge in Reihe geschaltet, um die Spannung zu verdoppeln. Folglich ist die elektrische Leistungsfähigkeit ebenfalls mit bis zu 12 MW in Überlast (Klasse VI) zweimal so hoch. Diese Architek-tur würde es dem Betreiber sogar erlauben, ein *Hesop 750 HP bi-group*, was die parallele Installation zweier 2 MW-Einheiten bezeichnet, zu einem späteren Zeit-punkt auf 1 500 V umzugruppieren. Aufgrund der damit verbundenen Komplexität auf Seiten von Roll-material und Infrastruktur bleibt ein solches Szenario vermutlich selten, aber es könnte langandauernde Diskussionen zu einem guten Ende führen, wo existierende Bahnenergieversorgungsanlagen das Ende ihrer Leistungsfähigkeit erreicht haben [10].

Zu beachten bleibt, dass der Transformator eine spezielle Vierwicklungs-konstruktion ist: Primärseite, Tertiäranschluss für den Netzfilter und zwei Sekundär-wicklungen zur Versorgung der *Hesop*-Stromrichter. Eine wichtige Komponente auf der Gleichspannungs-seite ist ein Thyristor, der in bestimmten Fehlerfällen die Spannung begrenzt. Ansonsten bestünde ein Risiko, die IGBTs zu beschädigen, falls sie einem Wert von 1 500 V und mehr ausgesetzt würden.

6 Fazit

Bei aller Begeisterung für technische Innovationen bleibt die Frage nach der Wirtschaftlichkeit entscheidend:

Für Neubaustrecken oder Ausbaumaßnahmen kann bei vergleichbarem oder sogar geringerem Investitionsvolumen (CAPEX) gegenüber einer klassischen Lösung auch *Hesop* eingesetzt werden, wenn dadurch die Anzahl der benötigten Unterwerke sinkt. In einem solchen Fall sind die zusätzlichen Freiheitsgrade und Funktionalitäten ohne Mehrkosten zu haben, und führen zu einer Reduktion der Betriebskosten (OPEX). Deren Höhe hängt stark von den Gegebenheiten des Netzes ab, beispielsweise dem bisherigen Rückspeisegrad der Fahrzeuge.

Verbindet man die ohnehin erforderliche Modernisierung eines Bestands-Unterwerkes mit einer *Hesop*-Installation, so wird zunächst eine höhere Investitionssumme fällig, die insbesondere durch geringeren Energiebedarf amortisiert werden muss. Andere Vorteile (CO₂, Netzdienlichkeit, flexible Spannungsregelung) können oft nicht monetär bewertet werden. Solche „weichen Faktoren“ sollten aber zumindest den ebenso wenig belastbaren Bedenken entgegengehalten werden, das System sei für den Einsatz in der Bahnenergieversorgung zu voluminös oder zu kompliziert aufgebaut.

In bestimmten Fällen lohnt sich sogar das alleinige „Abschöpfen“ überschüssiger Bremsenergie, wie das Beispiel London zeigt. Andererseits gibt es bereits Konzepte für intelligente Unterwerke, die weit über die bislang gezeigte Funktionalität hinausgehen [11]. In Kombination mit einem Speicher ergeben sich neue Amortisationspfade für die Modernisierung bestehender DC-Bahnenergieversorgung, indem sowohl die Gelegenheitsladung für Elektrofahrzeuge als auch Regelleistung für das Netz angeboten werden können.

Literatur

- [1] *Gralla, Ch.; Söffker, C.*: „Smarte“ Bahnenergieversorgung für den Nahverkehr dank *Hesop*. In: *Elektrische Bahnen* 114 (2016), H. 6, S. 309–315.
- [2] EN 50328:2003: *Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Leistungselektronische Stromrichter für Unterwerke.*
- [3] EN 50327:2006: *Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Harmonisierung der Bemessungswerte von Stromrichtergruppen und Prüfungen von Stromrichtergruppen.*
- [4] EN 50121-5:2016: *Bahnanwendungen – Elektromagnetische Verträglichkeit – Teil 5: Störaussendungen und Störfestigkeit von ortsfesten Anlagen und Einrichtungen der Bahnenergieversorgung.*
- [5] *Flösch, M.*: *Projekt Stationärer Energiespeicher Landwasser. Abschlussbericht (2014).* https://www.badenova.de/mediapool/media/dokumente/unternehmensbereiche_1/stab_1/innovationsfonds/abschlussberichte/2012_13/2012-06_AB_Energiespeicher_Landwasser.pdf, aufgerufen am 16. November 2017.

- [6] *Täubner, F.*: *Schwungradspeicher in Vision und Realität.* <http://www.rosseta.de/archiv2/Vortrag-Schwungrad-Energiespeicher.pdf>, aufgerufen am 15. November 2017.
- [7] *Wiener Linien*: *Pilotprojekt: Bremsenergie beleuchtet U-Bahn-Stationen.* <https://www.wienerlinien.at/eportal3/ep/contentView.do?pageTypeld=66526&channelld=-47186&programld=74577&contentld=1800243&contentTypeld=1001>, aufgerufen am 15. November 2017.
- [8] *VDV 520*: *Kurzschluss- und Überlastschutz von Fahrstromanlagen für Gleichstrom- Nahverkehrsbahnen.* 2015.
- [9] EN 50163:2004: *Bahnanwendungen; Speisespannung von Bahnnetzen.*
- [10] *Bock, P.*: *Mit der S-Bahn in die Pirschheide? Der geplante 1 500-V-Versuchsbetrieb im Raum Potsdam.* In: *Verkehrsgeschichtliche Blätter (2010)*, H. 2, S. 30–32.
- [11] *Klausner, S.*: *Gemeinsame Energieversorgung für E-Busse und ÖPNV-Bahnen als gesamtheitliche Aufgabe eines zukünftigen Nahverkehrskonzeptes.* In: *ETG-Fachtagung „Intelligenter elektrischer ÖPNV 4.0“*, Frankfurt (2017).

AUTORENDATEN



Dr.-Ing. **Carsten Söffker** (44), 1993 – 1998 Studium des Maschinenbaus mit Fachrichtung Elektrotechnik an der Technischen Universität Clausthal; 1998 – 2007 Aufbau einer Fachgruppe für die Integration elektrischer Antriebe bei der ALSTOM LHB GmbH in Salzgitter, 2007 – 2016 Abteilungsleiter Validierung und Zulassung, seit 2016 Technischer Experte für Energiemanagement; 2005 berufsbegleitende Promotion an der Technischen Universität Clausthal, seit 2006 Leitung des Fachbereichs „Bahnen mit elektrischen Antrieben“ der ETG im VDE.

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



Nicolas Nevot (30), 2004 – 2009 Engineer specialized in electrical systems from ECAM-EPML: a French private school of general engineering located in Cergy Pontoise. 2009 – 2010 electrical studies for onboard energy storage system on tramway, 2010 – 2011 electrical substation design studies for various tenders and projects, 2011 – 2015 *Hesop* technical manager in charge of the technical studies for the *Hesop* solutions development, since 2015 power supply innovation technical manager within the infrastructure department of Alstom to participate to innovations programs on inverter, storage solution and SRS electric bus chargers while keeping an activity on *Hesop* supporting the product improvement and the projects.

Adresse: Alstom Transport, 48 Rue Albert Dhalenne, 93400 Saint Ouen, France; Fon: +33 157069140; E-Mail: nicolas.nevot@alstomgroup.com