



**Elektrische
Bahnen**

Elektrotechnik
im Verkehrswesen



Musterbeiträge

Betriebsaufnahme von *Hesop* bei der Hamburger Hochbahn AG

Ingo Jonassen, Hamburg; François Maurin, Paris (FR); Carsten Söffker, Salzgitter

Alstoms bidirektionaler Stromrichter versorgt seit März 2020 zuverlässig die U-Bahn-Linien U2 und U4 der Hamburger Hochbahn AG und reкупeriert dabei überschüssige Bremsenergie ins vorgelagerte Mittelspannungsnetz. Bei der Integration des innovativen Systems in eine bestehende Bahnenergieversorgung müssen vielfältige elektrische und mechanische Schnittstellen beachtet werden. Schließlich sorgt die richtige Parametrierung für eine optimale Nutzung der energetischen Potenziale.

Hesop starts operation at Hamburger Hochbahn AG

Since March 2020, Alstom's bi-directional power converter supplies reliably the metro lines U2 and U4 of Hamburger Hochbahn AG and recuperates excessive brake energy into the medium voltage grid. Numerous electrical and mechanical interfaces must be respected when integrating such an innovative system into an existing rail power supply. Finally, the correct parameterization ensures an optimal use of the energetic potential.

Mise en service d'*Hesop* au Hamburger Hochbahn SA

Le convertisseur bidirectionnel d'Alstom alimente avec fiabilité les lignes U2 et U4 du métro d'Hambourg Hochbahn SA depuis mars 2020, en récupérant l'énergie de freinage excédentaire pour la transmettre au réseau moyenne tension. Lors de l'intégration d'un système aussi innovant dans une alimentation électrique ferroviaire existante, il convient de porter attention aux nombreuses interfaces électriques et mécaniques. Enfin, un paramétrage précis sur site garantit une utilisation optimale du potentiel énergétique.

1 Einführung

Die klassische Bahnenergieversorgung für den städtischen Nahverkehr besteht aus Gleichspannungs-Unterwerken auf der Basis von Transformatoren und Diodenschaltungen. Diese Technologie ist bewährt und robust, beschränkt aber den Energiefluss auf eine Richtung. Moderne Stromrichter bieten statt-

dessen mehr Freiheitsgrade, und genau darauf basiert das System *Hesop* von Alstom. Die wesentlichen Vorteile sind

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



Bild 1: U-Bahn-Triebzug des Typs DT5 der Hochbahn (Foto: Hamburger Hochbahn).

Zusammen mit Transformator- und Filtermodulen verschiedener Leistungsklassen ist somit eine neue Produktplattform verfügbar [1].

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 dann oftmals nur die Modernisierung bestehender Anlagen, und man kann auf neue Unterwerke verzichten [2]. Dann sinken sowohl die notwendigen Investitionen als auch die Betriebskosten, indem *Hesop* sämtliche Bremsenergie nutzbar macht.

In Bezug auf Wirtschaftlichkeit hatten Neubauprojekte bislang die Nase vorn, weil ohnehin ein großes Investitionsbudget vorhanden ist und viele Sys-

temvorteile direkt zum Tragen kommen können. Ein solches Beispiel ist die Beauftragung des Alstom-Konsortiums durch die *Secretaria del Metro de Panama* für die Planung und den Bau eines integrierten Systems für die Linie 2: Eine 21 km lange Linie mit 16 Stationen, die von 21 fünfteiligen *Metropolis*TM-Zügen betrieben wird (siehe Abschnitt 5.2).

2 Hesop-Pilotprojekt bei der Hamburger Hochbahn

2.1 Motivation

Für die Hamburger Hochbahn AG (Hochbahn), als führender Anbieter von Verkehrsleistungen im Straßen- und schienengebundenen Öffentlichen Personennahverkehr der Metropolregion Hamburg (Bild 1), sind Umweltschutz und Nachhaltigkeit wichtige Bestandteile der Unternehmensstrategie.

Die Energieeffizienz der Hochbahn wird unter anderem durch eine möglichst effektive Nutzung von Bremsenergie der U-Bahn-Fahrzeuge im Bahnenergieversorgungsnetz gesteigert. Unter diesem Aspekt wurden bereits vor über einer Dekade Energiespeicher an zwei Unterwerksstandorten installiert. Mit der Technologie der rotierenden Schwungmassenspeicher sind hier umfangreiche Betriebserfahrungen gesammelt worden.

In der Weiterführung der damaligen Pilotprojekte wurde im U-Bahn-Netz nach weiteren Möglichkeiten für die verbesserte Nutzung von Bremsenergie gesucht und diese untersucht.

2.2 Erwartungshaltung

Die direkte Rückspeisung der Bremsenergie in das 10-kV-Mittelspannungsnetz mittels der *Hesop*-Konvertertechnologie sollte in einem Pilotprojekt am U-Bahn-Netz der Hochbahn erprobt und verifiziert werden. Einen hohen Stellenwert nimmt dabei der Nachweis der Praxistauglichkeit des *Hesop*-Systems

zur Sicherstellung des U-Bahn-Betriebes ein, unter Nutzung der Optimierungspotenziale für die Rekuperationsenergie.

Durch wiederholte Messfahrten im U-Bahn-Netz der Hochbahn wurde im Bereich zwischen den Haltestellen Berliner Tor und Billstedt ein hohes ungenutztes Bremsenergiepotenzial lokalisiert. In diesem Bereich fahren die U-Bahnen der Linien U2 und U4 in einer kurzen Taktfolge und mit hohem Fahrgastaufkommen.

Die Standortwahl für die Installation der *Hesop*-Technologie fiel auf das oberirdische Bestandsunterwerk Rauhes Haus, aus dem die Bahnenergieversorgung des Bereiches erfolgt. Wesentliche Kriterien waren die günstigen Platzverhältnisse und die Erhöhung des Eigenbedarfes durch den elektrischen Anschluss der neuen, ortsnahen Linienwerkstatt Billstedt (Bbi) an das 10-kV-Mittelspannungsnetz und die Abnahmemöglichkeit rekuperierter Bremsenergie. Bild 2 zeigt, dass auch alle Haltestellen von Berliner Tor (BT) bis Legienstraße (LE) über den 10-kV-Abgang im Unterwerk Rauhes Haus (RH) versorgt werden.

Vertraglich vereinbart wurde, dass in der Projektentwicklung Alstom für die Lieferung des *Hesop*-Systems verantwortlich ist. Die Hochbahn war für die baulichen Vorleistungen, die Aufstellung des Systems und die Integration von *Hesop* in die Bestandsanlagen des Unterwerkes verantwortlich.

Gemeinsam wurde die neue Technik mit zwei U-Bahn-Testfahrzeugen in drei nächtlichen Betriebspausen in Betrieb genommen.

3 Integration in das Unterwerk Rauhes Haus

3.1 Netzanschluss

Noch vor Beginn der Projektumsetzung wurde beim zuständigen Verteilnetzbetreiber (VNB) der Anschluss von *Hesop* an das Mittelspannungsnetz angefragt. Es folgten daraufhin umfangreiche Klärungen

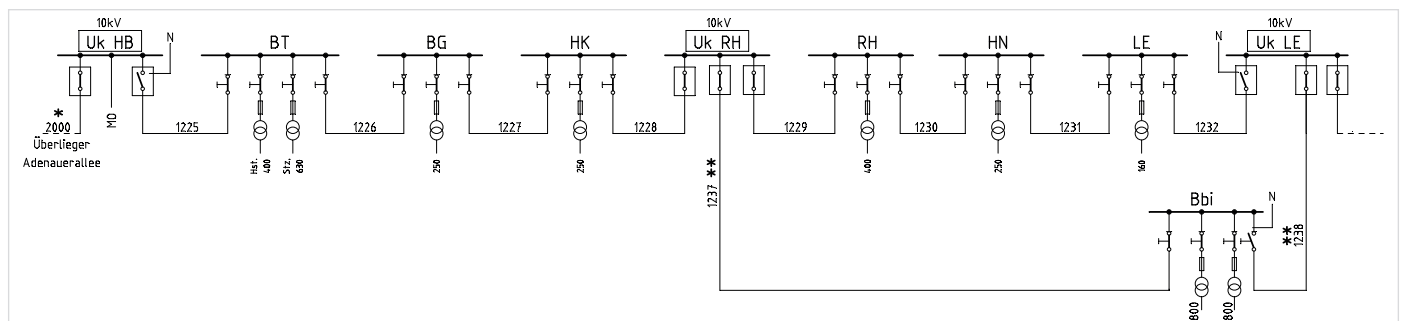


Bild 2: 10-kV-Leitung zur Versorgung von Haltestellen und Werkstätten entlang der U-Bahn-Linie 2, Abschnitt Hauptbahnhof (Uk HB) – Rauhes Haus (Uk RH) – Legienstraße (Uk LE) (Grafik: Hamburger Hochbahn).

der Projektpartner Hochbahn und Alstom mit dem VNB für die technische Anschlusszusage auf Grundlage der Mittelspannungsrichtlinie des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW) [3] und der vom Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE) konsolidierten *Technischen Anschlussregeln Mittelspannung* [4]. Für den Nachweis der Netzverträglichkeit hat Alstom eine Simulation der Oberschwingungen und ein Abgleich mit den Netzvorgaben des VNB durchgeführt. Man erkennt in Bild 3, dass dank der aktiven und passiven Unterdrückung von Oberschwingungen ein hinreichend großer Abstand zu den Grenzwerten der oben genannten Norm besteht.

Entsprechend der technischen Netzanschlusszusage wurden ein zusätzlicher 10-kV-Schutz realisiert und eine weitere Verrechnungsmessung für *Hesop* im Unterwerk installiert.

3.2 Elektrische Einbindung

Das Unterwerk Rauhes Haus verfügte über drei klassische Dioden-Gleichrichtersätze. Der Gleichrichtersatz 3 einschließlich Gleichrichtertransformator wurde rückgebaut und an dessen Stelle das *Hesop*-System im Unterwerk installiert. Die Integration erfolgte – soweit möglich – unter Beibehaltung des Anlagen- und Bedienkonzeptes eines Hochbahn-Unterwerks.

Im 10-kV-Schaltfeld wurden die Ausrüstung, Steuerung und der Schutz entsprechend einer Schnittstellenabstimmung umgebaut und der neue Transformator angeschlossen. Der Anschluss an das Fahrleitungsnetz wurde über die vorhandenen Plus- und Minustrenner realisiert. Die *Hesop*-Steuerung wurde

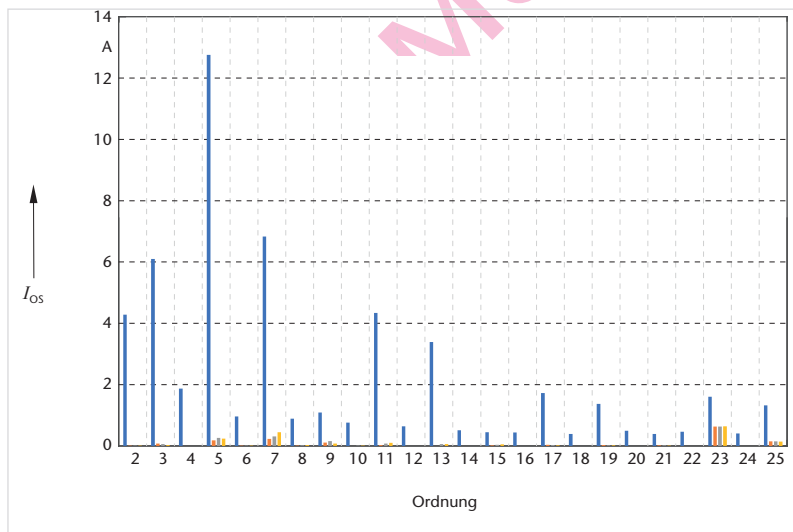


Bild 3:

Netzrückwirkungen des *Hesop*-Systems (Grafik: Alstom, bearb. eb).
blau – Grenzwerte für Oberschwingungen bis zur 25. Ordnung nach VDE-AR-N 4110, bezogen auf eine Netzkurzschlussleistung von 166 MVA; *orange/grau/gelb* – Oberschwingungsgehalt des *Hesop*-Systems auf der Primärseite, simuliert je Phase bei Nennleistung (2 MVA)

in die bestehende Ortsmelde- und Fernsteueranlage des Unterwerkes eingebunden. Das interne Gerüstschlussrelais der neuen Anlage wurde nicht genutzt. Diese Schutzfunktion wurde in das vorhandene Unterwerksgerüstschlusschutzsystem integriert.

3.3 Mechanische Installation

3.3.1 Umsetzung der Einbauvorgaben

Das Bestandsgebäude des Unterwerkes Rauhes Haus weist an seiner Nordseite drei einzelne Transformatorkammern auf, die wegen ihrer Bestückung mit Öltransformatoren als separate Brandabschnitte ausgewiesen und somit vom Schaltanlagenraum abgeschottet sind. Nach Demontage des klassischen Bahnstromtransformators für den Reserve-Gleichrichter konnte der *Hesop*-Systemtransformator ohne bauliche Modifikationen in die entsprechende Kammer eingebracht werden (siehe Bild 4).

Während die Diodengleichrichter im Schaltanlagenraum des Unterwerkes stehen, wurde für den Stromrichter ein separater, nicht mehr genutzter Raum hergerichtet und mit einem Doppelboden versehen. Dieses ist in modernen Unterwerken üblich und vereinfacht die Verlegung der Leistungskabel. Der Raum ist unmittelbar neben der Kammer des *Hesop*-Systemtransformators angeordnet und er-



Bild 4:

Hesop-Systemtransformator nach der Einbringung (Foto: Hamburger Hochbahn).
links – 10-kV-Mittelspannungskabel;
rechts – Anschluss- und Erdungspunkte Primärseite

möglicht somit kurze Leitungslängen zu dessen Sekundärseite. Gleichzeitig bietet er Platz für die Gleichstromdrossel am Ausgang und den Netzfilter-schrank, der besonders nah am Systemtransformator aufgestellt werden muss. Die geforderte Reduktion der Netzurückwirkungen ist so gewährleistet. Zu beachten war darüber hinaus die weitgehend gebündelte Verlegung der Drehstromkabel, damit elektromagnetische Felder bestmöglich kompensiert werden.

3.3.2 Belüftungskonzept

Die Transformatorkammern des Unterwerks sind für natürliche Belüftung ausgelegt. Eine thermodynamische Betrachtung hat ergeben, dass dieses auch dann für den Betrieb des Systemtransformators ausreichend wäre, wenn er bei 40°C Außentemperatur im Dauerbetrieb unter Vollast betrieben würde (Wärmeabgabe rund 25 kW). Die Jalousie am Luftaustritt unter dem Dach ist thermostatgesteuert.

Der *Hesop*-Stromrichter der Leistungsklasse *High Power* (HP) benötigt jedoch eine erzwungene Konvektionskühlung. Die unten und im vorderen Bereich der Leistungsmodul-Schränke (siehe Bild 5) installierten Lüfter erzeugen einen Volumenstrom von 3 300 m³/h. Die Frischluft strömt dabei, analog zu den Transformatorkammern, aus dem Keller unter den Doppelboden, während die erwärmte Abluft nach oben entweicht. Zusätzliche Lüftungsgitter im Doppelboden sollen verhindern, dass es an anderen Stellen des Raumes zu Wärmestau oder unerwünschten Verwirbelungen kommt. Messungen aus dem Sommerbetrieb haben ergeben, dass die Innentemperatur um etwa 10 K bis 15 K steigt. Verglichen mit dem Einsatz der gleichen Leistungs- und Steuerelektronik auf dem Dach beziehungsweise im Unterflurbereich von Triebzügen ist dieses als völlig unkritisch zu bewerten.

3.3.3 Akustische Dämmung

Aufgrund der Lage des Unterwerks in einem Wohngebiet kommt der Maschinenakustik besondere Bedeutung zu. Wie von Lokomotiven und Triebzügen bekannt, erzeugen moderne IGBT-Stromrichter hörbare Frequenzen im Bereich von 1 bis 2 kHz. Dabei emittiert neben den Geräteschränken selbst insbesondere der Stromrichtertransformator den potenziell störenden Schall. Eine Voruntersuchung in 2018, durchgeführt von Alstoms akkreditierter Prüfstelle mit einer speziellen Kugelschallquelle, hat die Notwendigkeit ergeben, die Innenwände und Türen beziehungsweise Tore beider Räume mit einem speziellen Absorptionsmaterial zu bestücken. Die Wahl fiel auf einen geschlossenzelligen Polyethylschaum



Bild 5:

Elemente des *Hesop* 750HP-Stromrichters (Foto: Alstom).
links – ein Steuerschrank (600 mm x 800 mm x 2 500 mm);
Mitte – drei Schränke mit Leistungsmodulen (1 200 mm x 800 mm x 2 500 mm);
rechts – ein DC-Ausgangsschrank (1 000 mm x 800 mm x 2 500 mm)

der Firma Cellofoam, welcher leicht zu verarbeiten ist und eine sehr geringe Dichte aufweist. Somit konnten zusätzlich verschiebbare Kulissen gestaltet werden, die im Bereich von Luftansaugung und -austritt eine Schallreflexion nach außen wirksam verhindern.

Das schalltechnische Gutachten vom Dezember 2020 weist nach, dass der Betrieb von *Hesop* im Unterwerk Rauhes Haus die Anforderungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes erfüllt. Auch mit einem Tonhaltigkeitszuschlag von 3 dB wird der für diesen Standort ausgewiesene nächtliche Richtwert von 40 dB(A) eingehalten.

4 Inbetriebnahme im Netz der U-Bahn

4.1 Leistungsfähigkeit

4.1.1 Lastaufteilung

Für die Sicherstellung der gewünschten Lastflüsse im Gleichspannungsnetz muss die dynamische Spannungsregelung von *Hesop* geeignet parametrieren werden. Entscheidenden Einfluss haben hierbei die Leerlaufspannung U_0 und der Innenwiderstand R_i der klassischen Gleichrichter sowie die Einsetzspannung U_{BrSt} der Bremssteller auf den U-Bahn-Fahrzeugen.

Bei der Hochbahn speisen typischerweise zwei Gleichrichtergruppen parallel auf die Sammelschiene, und dieses Verhalten soll auch mit der neuen An-

lage im Parallelbetrieb mit einem Gleichrichter nachgebildet werden. Folglich gilt für die Traktionskennlinie in Abhängigkeit des Laststroms I_{Hesop}

$$U_{Tr}(I) = U_{Tr,0} - R_{Tr} \cdot I_{Hesop} \quad (1)$$

mit $R_{Tr} = R_i$ sowie $U_{Tr,0} = U_0$.

Weil U_0 proportional zur speisenden Mittelspannung ist, berücksichtigt $U_{Tr,0}$ ebenfalls deren mögliche Schwankungen. Auf diese Weise wird eine gleichmäßige Lastaufteilung zwischen dem passiven Dioden-

gleichrichter und dem aktiven Stromrichter erreicht, wie Bild 6 im linken Bereich zeigt:

$$I_{Glr1} \approx I_{Hesop} \quad (2)$$

Die Messung entstammt der nächtlichen Erstinbetriebnahme im März 2020, als in jedem Speiseabschnitt des Unterwerkes (RH1 und RH2) jeweils ein U-Bahn-Fahrzeug unterwegs war. Mit steigender Last sinkt auch die Sammelschienenspannung U_{SS} ; hinzu kommt der Spannungsfall an Stromschiene und Rückleiter.

Betreibt man den Stromrichter ohne parallelen Diodengleichrichter, kann die dynamische Spannungsregelung freizügiger eingesetzt werden. Damit lassen sich die Spannungshaltung entlang der Strecke verbessern und Übertragungsverluste minimieren. Bezüglich der Lastaufteilung mit benachbarten Unterwerken sei auf das entsprechende Beispiel in [2] verwiesen.

4.1.2 Lastspitzen

Ein weiterer Test im Rahmen der Erstinbetriebnahme diente dem Nachweis, dass das *Hesop*-System auch hohe Momentanleistungen ins vorgelagerte Mittelspannungsnetz zurückspeisen kann. Hierzu wurden die beiden U-Bahn-Testfahrzeuge in der Haltestelle nahe dem Unterwerk synchron abgebremst. Da keine weiteren Verbraucher in der Nähe waren, ergab sich ein Leistungsüberschuss von rund 5 MW (Bild 7), was jenseits der nominellen Überlastgrenze liegt (Klasse VI nach EN 50328 [5]). Man erkennt ein stabiles Systemverhalten im Bereich der Stromspitze von $I_{Hesop} < -7$ kA. Die hier rekurperierte Energiemenge beträgt rund 14 kWh.

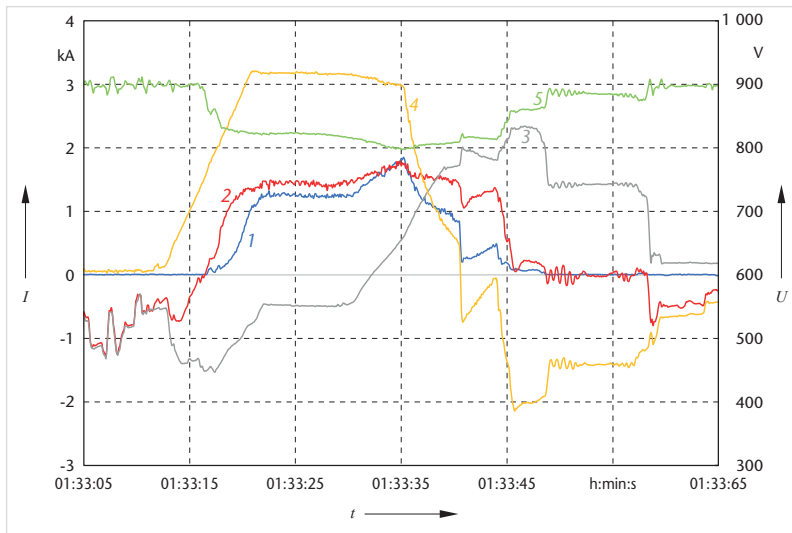


Bild 6: Lastaufteilung im Parallelbetrieb des Stromrichters mit dem Diodengleichrichter (Grafik: Alstom, bearb. eb).

1 – Laststrom Gleichrichter I_{Glr1} ; 2 – Laststrom Stromrichter I_{Hesop} ; 3 – Abgangsstrom stadtauswärts I_{RH1} ; 4 – Abgangsstrom stadteinwärts I_{RH2} ; 5 – Sammelschienenspannung U_S

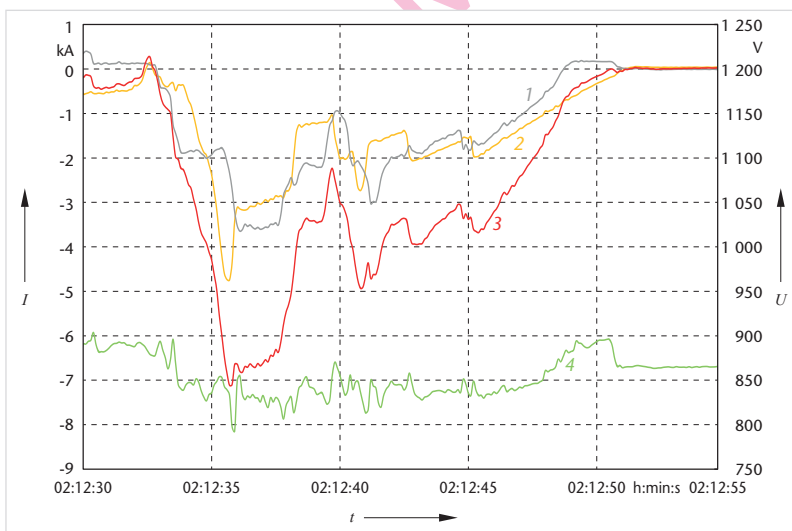


Bild 7: Lastspitze im Rückspeisebetrieb (Grafik: Alstom, bearb. eb).

1 – Abgangsstrom stadtauswärts I_{RH1} ; 2 – Abgangsstrom stadteinwärts I_{RH2} ; 3 – Laststrom Stromrichter I_{Hesop} ; 4 – Sammelschienenspannung U_S

4.2 Energieeffizienz

4.2.1 Priorisierung des Energieaustauschs zwischen U-Bahn-Fahrzeugen

In den meisten Fällen ist es effizienter, rekurperierte Bremsenergie im Gleichspannungsnetz zu verteilen, sofern ein aufnahmefähiger Verbraucher in Reichweite ist. Also soll das *Hesop*-System zunächst „abwarten“, ob sich ein direkter Energieaustausch einstellt. Dieses wird dadurch erreicht, dass die Rückspeise-Einsatzspannung $U_{Br,0}$ des Stromrichters weiter in Richtung der Bremssteller-Einsatzspannung U_{BrSt} angehoben wird. Somit ergibt sich an der Sammelschiene ein Totband ΔU , innerhalb dessen kein Energiefluss vom oder zum Mittelspannungsnetz stattfindet:

$$\Delta U = U_{Br,0} - U_{Tr,0} \quad (3)$$

Die rechte Seite von Bild 6 illustriert dieses Systemverhalten: Während das U-Bahn-Testfahrzeug DT4 in die Haltestelle Burgstraße einfährt und bremst, speist es über die Streckenabgänge RH2 und RH1 das U-Bahn-Testfahrzeug DT5, das zeitgleich in der 2,8 km entfernten Haltestelle Horner Rennbahn anfährt. Die Sammelschienenspannung im Unterwerk beträgt rund 880 V; sowohl der Diodengleichrichter als auch der Stromrichter bleiben passiv.

4.2.2 Rückspeisegrad

Weiterhin soll die Frage beantwortet werden, wie effizient das System insgesamt arbeitet. Alstom trifft gelegentlich die werbliche Aussage, „dank Hesop könnten 99% der Bremsenergie genutzt werden“. Richtiger wäre die mathematische Umkehrung, dass dank des Hesop-Systems weniger als 1% der Bremsenergie im Bremswiderstand in Wärme umgewandelt würden. Weitere Energieverluste entstehen durch die Wandlung und Übertragung von Energie (Bild 8).

Die Effekte links der gestrichelten Trennlinie sind unvermeidlich und reduzieren die Bewegungsenergie des Fahrzeuges W_{kin} auf einen Betrag, der dem Gleichspannungsnetz zur Verfügung gestellt werden kann. Die Übertragungsverluste W_v sind vom längenabhängigen Schleifenwiderstand $R(s)$ (mit der Entfernung s zwischen Zug und Unterwerk) sowie dem Strom I_{Hesop} abhängig. Hinzu kommt die Problematik, dass der Spannungsfall über der Strecke nicht größer werden darf als die Differenz zwischen der Rückspeisespannung U_{Br} an der Unterwerks-Sammelschiene und der Einsetzspannung des Bremsstellers U_{BrSt} , um dessen Aktivierung (W_{Br}) zu verhindern:

$$R(s) \cdot |I_{Hesop}| < U_{BrSt} - U_{Br} \quad (4)$$

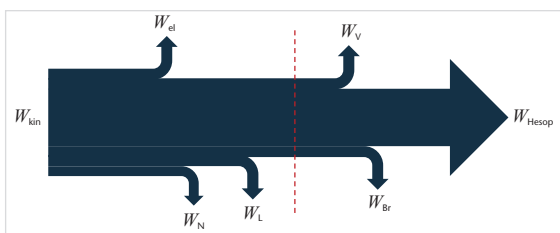


Bild 8:

Verlustmechanismen zwischen Rad und Unterwerk (Grafik: Alstom, bearb. eb)

- W_{kin} – kinetische Energie des Fahrzeuges;
- W_{el} – Umwandlungsverluste im Antriebsstrang;
- W_N – Nebenverbraucher des Fahrzeuges;
- W_L – (unvermeidliche) Verluste über den Bremswiderstand in der Stromschienenlücke;
- W_v – Stromwärmeverluste im Gleichspannungsnetz;
- W_{Br} – Verluste über den Bremswiderstand infolge Überschreitung der Spannungsgrenze;
- W_{Hesop} – Rückspeiseenergie am Unterwerk

Deshalb wird die Rückspeisespannung von $Hesop$ mit steigender Rückspeisung bewusst abgesenkt ($R_{Br} < 0$):

$$U_{Br}(I) = U_{Br,0} - R_{Br} \cdot I_{Hesop} \quad (5)$$

Dieser Spannungsabsenkung ist im Parallelbetrieb mit einem Diodengleichrichter jedoch eine physikalische Grenze gesetzt, weil es unterhalb von U_0 bereits zu einem unerwünschten Kreisstrom im Unterwerk käme. Ohne parallelen Gleichrichter besteht mehr Freiheit, so dass auch von weiter entfernten Haltestellen höhere Bremsströme ins Unterwerk übertragbar sind.

Tabelle 1 zeigt die Ermittlung des Rückspeisegrads η für verschiedene Betriebsfälle in der Umgebung des Unterwerks Rauhes Haus, wobei η als das Verhältnis aus am Unterwerk angekommener zu vom Fahrzeug bereitgestellter Energie definiert ist:

$$\eta = W_{Hesop} / (W_{Hesop} + W_v + W_{Br}) \quad (5)$$

An der Haltestelle Rauhes Haus in unmittelbarer Nähe des Unterwerks beträgt der Rückspeisegrad nahe 100%, weil der Schleifenwiderstand und somit der Spannungsfall und die Übertragungsverluste W_v vernachlässigbar sind. Der Rückspeisegrad sinkt um rund 10% je km, so dass in einer Entfernung von zwei Haltestellen immer noch 70% bis 85% der angebotenen Energie genutzt werden.

4.3 Rekuperierte Bremsenergie

Auf der Basis einer bisherigen Verfügbarkeit von 100% und dem positiven Schallgutachten (siehe Abschnitt 3.3.3) hat die Hochbahn entschieden, im Unterwerk Rauhes Haus ab Dezember 2020 nur noch das Hesop-System für die Bahnenergieversorgung einzusetzen und die Diodengleichrichter abzuschal-

Tabelle 1						
Rückspeisegrad in Abhängigkeit von Position und Bremsverhalten.						
Haltestelle (Bild 3)	Entfernung km	Ausgangsgeschwindigkeit km/h	Bremsdauer s	I_{max} (RHx) A	W_{kin} kWh	Rückspeisegrad %
LE	2,427	67,9	39,0	-870	7,6	69
LE	2,427	51,8	34,0	-1 094	4,4	74
HN	1,196	79,3	35,0	-2 236	9,8	84
HN	1,196	67,0	20,0	-2 409	6,7	89
HK	0,645	72,0	28,0	-2 406	8,5	97
HK	0,645	75,1	23,0	-2 866	9,3	97
BG	1,594	76,1	34,0	-2 947	9,5	81
BG	1,594	74,4	32,0	-2 102	7,7	82
BG	1,594	71,6	35,0	-2 297	8,5	87

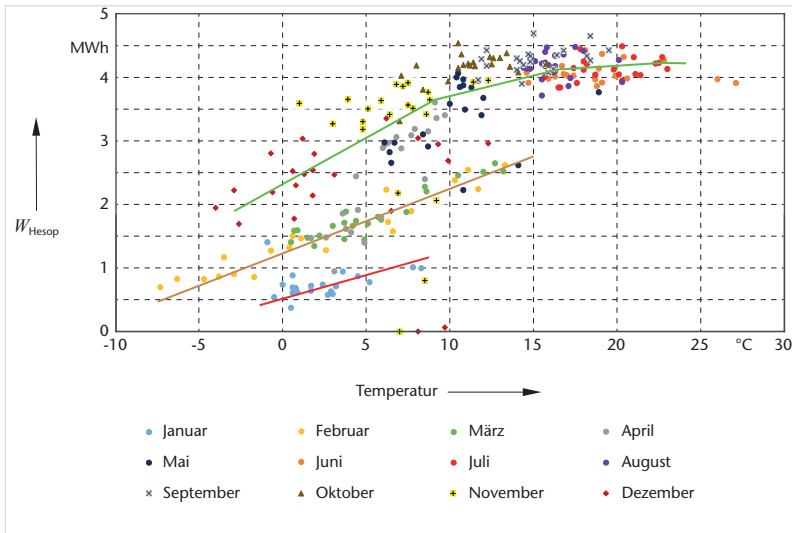


Bild 9: Netzurückspeisung mittels *Hesop* an Werktagen (Kalenderjahr 2021) (Quelle: Hamburger Hochbahn, bearb. eb).

ten. Diese verbleiben als Betriebsreserve. Dies ermöglicht eine vollständige Evaluierung der in das 10-kV-Netz rückgespeisten Energieüberschüsse als Funktion der Außentemperatur, die von Beginn an als relevante Einflussgröße bekannt war: Bei niedrigen Temperaturen erhöht die Heizung den Eigenbedarf aller Züge, wodurch sowohl das Angebot an überschüssiger Bremsenergie sinkt als auch deren Verteilbarkeit im Speiseabschnitt steigt. Die Konsequenz ist eine überproportionale Abhängigkeit der ermittelten Tagesenergiewerte von der mittleren Temperatur in Hamburg (Bild 9).

Eine genauere Betrachtung ergibt jedoch noch weitere Abhängigkeiten, die durch folgende Betriebsumstände gut plausibilisiert werden:

- Während die rote Trendlinie den Grundzustand von Netz und Betrieb zu Jahresbeginn zeigt, weist die gelbe Trendlinie eine deutliche Erhöhung der Netzurückspeisung aus und zwar im Zusammenhang mit einer langfristigen Streckensperrung in der Innenstadt. Augenscheinlich führt die behinderte Energieabnahme zu einer Spannungsanhebung im benachbarten Speiseabschnitt, welche trotz der deutlichen Entfernung von *Hesop* registriert wird.
- Die grüne Trendlinie resultiert schließlich aus einer Optimierung des Regelverhaltens von *Hesop* basierend auf den im ersten Betriebsjahr gesammelten Erfahrungen. Oberhalb einer gewissen Tagesmitteltemperatur sind die Werte weitgehend stabil, weil der Eigenbedarf der Züge nicht weiter sinken kann und somit maximales Rückspeisepotenzial vorliegt.

Für das Kalenderjahr 2021 wurde eine Energierückgewinnung von insgesamt 1 024 MWh gemessen, wovon etwa ein Drittel in die stationären Anlagen der Hochbahn geflossen ist und zwei Drittel in das öffentliche Netz.

5 Weitere Anwendungen

5.1 GUV+ in Hannover

Das *Hesop*-System ist ein Kernelement des innovativen Gleichspannungs-Unterwerks *GUW+*, das im Rahmen eines vom Bundesverkehrsministerium geförderten Forschungsprojektes entwickelt und ab 2021 bei der ÜSTRA (Hannoversche Verkehrsbetrie-

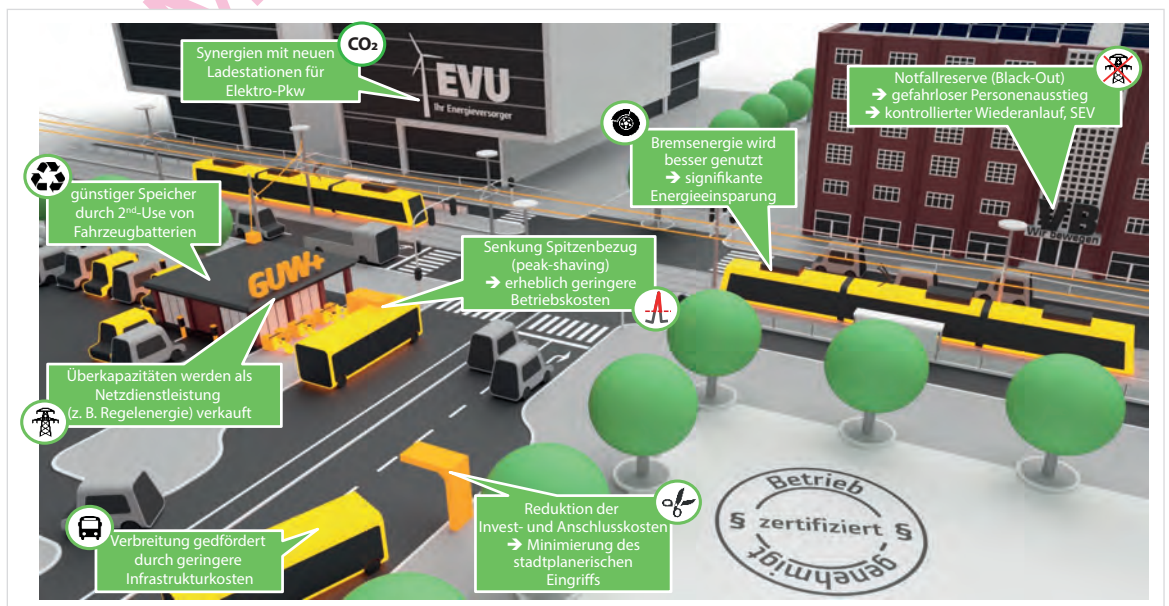


Bild 10: Vorteile und Amortisationspfade in Verbindung mit dem Konzept *GUW+* (Grafik: Alstom).

be) errichtet und inbetriebgenommen wurde. GÜW+ dient primär der räumlichen und funktionalen Integration der Energieversorgung für Stadtbahnen und Elektrobusse [6]. Die Kombination aus *Hesop* und einem stationären Energiespeicher, der bereits aus *second-life*-Busbatterien aufgebaut worden ist, ermöglicht sogar das Erbringen von Systemdienstleistungen. Bild 10 illustriert die verschiedenen Nutzenkategorien für den Betreiber.

5.2 International

Zusätzlich zu den beiden in diesem Aufsatz beschriebenen deutschen Projekten ist seit 2015 ein *Hesop*-System auf der *Victoria Line* der Londoner U-Bahn in Betrieb, um die Temperatur in den U-Bahn-Tunneln zu senken. Im Jahr 2017 ist im Rahmen des europäischen *LIFE+*-Programms ein *Hesop*-System in Mailand installiert worden, um die CO₂-Emissionen der U-Bahn zu reduzieren. Die Stadtbahnlinie von Sydney, die zu 100% mit *Hesop*-Unterwerken ausgestattet ist, hat Ende 2019 den kommerziellen Betrieb aufgenommen. Im Juli 2020 wurde von Dubais Straßen- und Verkehrsbehörde die Erweiterung und Modernisierung der roten und grünen U-Bahn-Linien eingeweiht. Dubai hat sich für *Hesop* entschieden, um die in den Unterwerken installierten Bremswiderstände zu entfernen und die Verkehrsdichte auf beiden Linien zu erhöhen.

Die Linie 2 in Panama ist mit der funkbasierten Zugsicherungstechnik (*Communication Based Train Control*, CBTC) *Urbalis* von Alstom und als erste Metrolinie der Welt zu 100% mit *Hesop* ausgestattet, und zwar in der Variante mit DC 1500V und 4MW (Bild 11). Dank der Traktionsspannungsregelfunktion des Systems konnte man den Spannungsfall in den Unterwerken kompensieren und so die Anzahl der erforderlichen Unterwerke von acht auf sieben reduzieren. Dabei wurden die Leistungsfähigkeit der Strecke beibehalten und einige relevante Aspekte sogar verbessert: Aufgrund niedrigerer Fahrzeugströme sinkt bei gleicher Leistung die Spannung zwischen Gleis und Erde. Die vollständige Betriebsaufnahme erfolgte im April 2019. Nach sechs Monaten wurde ermittelt, dass auf der Linie über 16% der aufgenommenen Energie in das Mittelspannungsnetz zurückgespeist wurden. Dies wäre mit klassischen Diodengleichrichtern nicht möglich gewesen.

Darüber hinaus wurden auch die Linien 4, 5 und 6 der U-Bahn von Riad vollständig mit *Hesop*-Unterwerken ausgestattet. Die Aufnahme des Fahrplanbetriebs ist bis Ende 2021 erfolgt. Eine neue U-Bahnlinie für Athen befindet sich derzeit in der Planungsphase und soll 2028 in Betrieb genommen werden. Diese Linie wird ebenfalls vollständig mit *Hesop*-Unterwerken ausgestattet sein.



Bild 11: Alstoms fünfteiliger *Metropolis™*-Triebzug für die Linie 2 in Panama (Foto: Alstom).

Die breite Palette an Vorteilen, die *Hesop* bietet, macht es zu einer einzigartigen Lösung, in der Stadtverkehrsbetreiber eine Antwort auf ihre ganz eigenen Bedürfnisse finden können. Bis heute wurden 123 *Hesop*-Einheiten für zehn Netze in neun Ländern verkauft, wobei die größten fünf eine Gesamtleistung von 185 MW aufweisen (siehe Tabelle 2).

6 Fazit

Wie in den anderen weltweiten Anwendungen hat das *Hesop*-System auch in Hamburg seine Betriebs-tauglichkeit unter Beweis gestellt. Im Rahmen der Pilotierung wurde über einen längeren Zeitraum ausgewertet, welche energetischen Einsparungen erzielbar sind. Derzeit werden diese immer noch durch niedrigere Fahrgastzahlen infolge der Corona-Pandemie beeinflusst. Dies wird sich in einer Metropole

Tabelle 2

ÖPNV-Linien mit flächendeckender Versorgung durch *Hesop*.

Projekt	Betreiber (Land)	Anzahl und Typ	Betriebsaufnahme
Sydney CBD & South-East Light Rail	Transport for New South Wales (Australien)	9 x 750 V/1,2MW + 3 x 750V/2MW	2019
Panama Metro Line 2	SMP (Panama)	8 x 1500V/4MW	2019
Dubai 2020 Extension	RTA (Vereinigte Arabische Emirate)	15 x 750V/2MW	2020
Riyadh Metro Lines 4, 5 und 6	ADA (Saudi-Arabien)	72 x 750V/1,2MW	2021
Athens Metro Line 4	Attiko Metro (Griechenland)	10 x 750V/2MW	2028

Autoren



Dipl.-Ing. (FH) Ingo Jonassen (50), 1994 bis 1998 Studium der Elektrotechnik mit Fachrichtung Energietechnik an der Hochschule Wismar; seit 2001 Hamburger Hochbahn AG, Abteilung Energieanlagen – Leiter Bau- und Instandhaltung im Fachbereich Energieversorgung.

Adresse: Hamburger Hochbahn AG, Abteilung Energieanlagen, Heilwigstraße 119, 20249 Hamburg, Deutschland;
Fon: +49 40 3288-4941;
E-Mail: ingo.jonassen@hochbahn.de



François Maurin Msc. (40), 2000 bis 2006 Studium in Elektronik, Elektrotechnik und Automation an der Universität Claude Bernard in Lyon; 2006 bis 2009 Software-Teamleiter für das automatische Management Wasserkraftanlagen für internationale Kunden in China, Indien, Sudan, Albanien, Türkei; bis 2013 technischer Projektleiter für die Leittechnik zweier Wasserkraftwerke in Sudan und Chile; bis 2017 *Hesop*-Programm-Manager, verantwortlich für *Hesop*-Entwicklung; seit 2017 *Hesop* Solution Manager in der Infrastruktur-Abteilung von Alstom, verantwortlich für Entwicklung, Vertrieb und Umsetzung von *Hesop*-Projekten weltweit.

Adresse: Alstom Transport, 48 Rue Albert Dhalenne, 93400 Saint Ouen, France;
Fon: +33 157061564;
E-Mail: francois.maurin@alstomgroup.com



Dr.-Ing. Carsten Söffker (48), 1993 bis 1998 Studium des Maschinenbaus mit Fachrichtung Elektrotechnik an der Technischen Universität Clausthal; 1998 bis 2007 Aufbau einer Fachgruppe für die Integration elektrischer Antriebe bei der ALSTOM LHB GmbH in Salzgitter; 2007 bis 2016 Abteilungsleiter Validierung und Zulassung, 2016 bis 2020 Technischer Experte für Energiemanagement; seit 2020 Manager Infrastruktur; 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

wie Hamburg jedoch früher oder später wieder ändern.

Mit den Ergebnissen der Pilotierung des *Hesop*-Systems im Unterwerk Rauhes Haus kann der potenzielle Einsatz an weiteren Standorten im U-Bahn-Netz oder Erweiterungsprojekten geprüft und bewertet werden.

Rückblickend kann man konstatieren, dass die Herausforderungen bei der Integration einer neuen Technik zwar vielfältig, aber beherrschbar sind, wenn Systemlieferant und Verkehrsbetrieb Hand in Hand arbeiten.

Literatur

- [1] Gralla, Ch.; Söffker, C.: „Smarte“ Bahnenergieversorgung für den Nahverkehr dank *Hesop*. In: Elektrische Bahnen 114 (2016), H. 6, S. 309–315.
- [2] Nevot, N.; Söffker, C.: Modernisierung bestehender DC-Bahnstromversorgung mittels *Hesop*. In: Elektrische Bahnen 115 (2017), H. 11-12, S. 632–641.
- [3] Technische Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2008.
- [4] VDE-AR-N 4110: Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2018.
- [5] EN 50328:2003: Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Leistungselektronische Stromrichter für Unterwerke.
- [6] Hofstädter, R.; Jehle, C.; Klausner, S.; Söffker, C.; Thiede, J.: Energieversorgung für Bahn und Bus – GUV+ nutzt Bestandsinfrastruktur für Elektromobilität. In: Der Nahverkehr (2018), H. 1-2, S. 46–52.



Elektrische
Bahnen

Elektrotechnik
im Verkehrswesen

Die eb DIGITAL ...

- ePaper
- Inhaltsverzeichnis
- Langzeitarchiv
- Autorendaten
- Nachrichten
- Branchentermine
- Abonnement
- u. v. m.

eb-info.eu



DC charging for the Coventry Very Light Rail Project

Noel Dolphin, Rob Daffern and Mariusz Sledz, London (UK)

Furrer+Frey has been investing in and developing ultra-rapid charging technology for public transport for over ten years, with technology already deployed in Spain, Sweden, Netherlands, Canada and Switzerland. In 2019, a unique opportunity was presented for the first UK implementation of the Furrer+Frey All-in-One Charger in the Coventry Very Light Rail (VLR) Project. Seeing this first deployment for VLR was a milestone in achieving zero net emission in public transport in the UK and one of the first rapid rail vehicle battery chargers deployed worldwide.

Gleichstromladung für das Coventry Very Light Rail-Projekt

Furrer+Frey investiert seit über zehn Jahren in die Entwicklung von ultraschnellen Ladetechnologien für den öffentlichen Verkehr und hat diese bereits in Spanien, Schweden, den Niederlanden, Kanada und der Schweiz eingesetzt. 2019 bot sich die einmalige Gelegenheit, das Furrer+Frey All-in-One-Ladegerät erstmals im Vereinigten Königreich im Very Light Rail (VLR)-Projekt von Coventry einzusetzen. Dieser erste Einsatz für VLR war ein Meilenstein auf dem Weg zu einem emissionsfreien öffentlichen Verkehr in Großbritannien und eines der ersten Schnellladegeräte für Schienenfahrzeuge weltweit.

Chargement en courant continu pour le projet de *métro très léger* de Coventry

Furrer+Frey a investi et développé une technologie de charge ultra-rapide pour les transports publics depuis plus de dix ans, avec une technologie déjà déployée en Espagne, en Suède, aux Pays-Bas, au Canada et en Suisse. En 2019, une opportunité unique s'est présentée pour la première mise en œuvre au Royaume-Uni du chargeur tout-en-un de Furrer+Frey dans le projet de *métro très léger* (VLR) de Coventry. Le fait de réaliser ce premier déploiement pour le VLR a été une étape importante dans l'atteinte de l'émission nette zéro dans les transports publics au Royaume-Uni et l'un des premiers chargeurs rapides de batteries de véhicules ferroviaires déployés dans le monde.

1 Introduction

Between 1912 and 1940, Coventry Corporation Tramways operated a tramway service in Coventry, England. During the Second World War, the heavy bombing caused too much damage to the remaining system to be repaired, and the system was abandoned. Bus operations became the primary public transport providers; however, they can no longer meet the demand of future expansion.

In 2016, the Warwick Manufacturing Group, part of the University of Warwick, released a proposal for a new light rail network to support Coventry City's green ambitions as the Coventry Very Light Rail project. In traditional light rail, the electricity needed for traction power is supplied directly from the grid via an overhead line. However, conventional light rail systems can cost 50 million GBP per kilometre, with a 1,7 km extension of a Birmingham tram line costing 160 million GBP. Providing several medium-sized cities with a light rail network is simply unaffordable at these prices in the UK.

2 Background

The VLR Project is a research and development project using the latest automotive battery expertise developed in the midlands region to deliver an innovative and affordable light rail system at the target cost of 10 million GBP per kilometre. The project is managed by Warwick Manufacturing Group (WVG), part of Warwick University and the vehicle is being designed and built by Transport Design International (TDI). Furrer+Frey delivered both the charging technology infrastructure, an inverted infrastructure mounted pantograph, and vehicle-mounted conducting strips.

The VLR system has a lighter weight, smaller capacity and consequently lower cost vehicles, powered 100% electrically. The lighter weight vehicle allows for a reduced trackform depth, that can be laid over existing utility services without needing to relocate them. It is thanks to this that the project becomes affordable. Additionally, VLR does not have any tailpipe emissions or non-particle emissions from brake pads and tires that buses have.

These are part of the reasons that attracted Furrer+Frey to the project, as it fits the company's vision of low-cost, sustainable transportation systems. A key goal was to create a charging system interoperable with future battery buses in Coventry. Repositioning public transport in a bid to make it a valid alternative to the car and helping to reduce congestion and improve air quality would prove to be a game-changer.

3 Coventry's Green Ambition

Coventry has begun developing a mass transport system that will provide access from Coventry railway station to the University Hospital Coventry and Warwickshire via the city. In the long term, the city council plans to construct a total of four routes as shown in Figure 1. These are intended to connect the major residential, industrial and commercial areas across the city, as well as to provide a direct connection to the HS2 station near Birmingham Airport via Kenpas Highway and (possibly) Allesley.

4 Supporting vehicle and Dudley test site with infrastructure

The Black Country Innovative Manufacturing Organisation (BCIMO) is the holding company created to oversee the build, launch and operation of a new Very Light Rail National Innovation Centre (VLRNIC), currently being built in Dudley. The centre uses an old disused railway line with approximately 5 km of track to showcase this new technology. The aim is to work with Local Authorities to create jobs by developing a VLR supply chain. Its purpose is not just to test the VLR system but to create a whole new industry.

The Black Country is the nickname given to the region due to the historic manufacturing industries based in the area and the local smoke emissions. BCIMO is a local government-funded body aiming to develop local manufacturing based on sustainable technology.

Furrer+Frey has been working closely with Warwickshire Manufacturing Group and TDI to provide rapid charging technology for the VLR vehicle. The All-In-One (AIO) Charger can charge the vehicle in a short time by delivering high power through its patented technology. In spring 2021, a fast-charging station was installed for the first test track of Coventry VLR. The charger is based on an opportunity charging station design, with an infrastructure-mounted DC pantograph and an automatic connection system for charging.

5 VLR System Specification

5.1 Components of the VLR System

The Coventry VLR project focuses on three main areas of development:

- innovative modular track design,
- lightweight vehicle and
- rapid opportunity charging technology.

5.2 Track

With the on-street infrastructure development, being about 60 to 70 % of capital expenditure (CAPEX) of the light rail project, engineers at WMG, in cooperation with INGEROP and Rendel, developed a novel, urban embedded trackform concept to reduce that cost.

The modern track could be delivered for as little as 2 to 3 million GBP per kilometre. It consists of 6 m to 8 m long sections manufactured off-site. 300 mm system height allows for minimal laying disruptions, rapid removal and easy reinstatement (Figure 2). The ultimate purpose is to remove the need to relocate utilities, as this is a substantial part of traditional tramway costs.

5.3 Vehicle

The vehicle is made from steel, aluminium, and composites, with a carbon/polyethylene bumper and carbon/Kevlar cab ends. The polycarbonate windows meet the regulator's requirements following a tram accident in Croydon in 2016. With a maximum



Figure 1: VLR Network Development Plan (Graphic: BCIMO [1]).

Engineering Projects

Figure 2:
VLR Track Concept
Drawing
(Graphic: WMG).

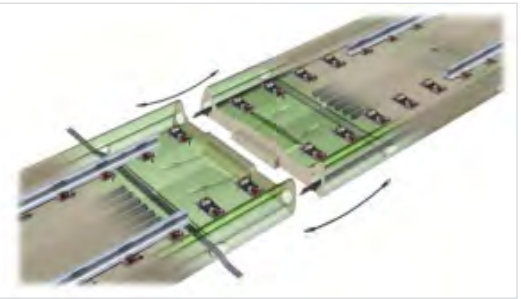
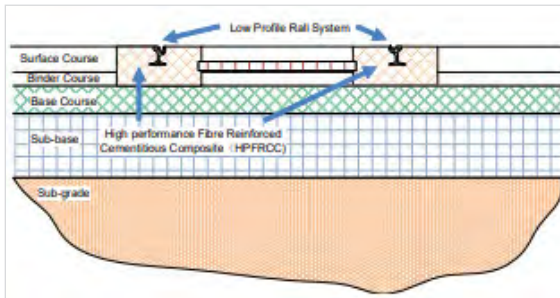


Figure 3:
VLR Vehicle with Furrer+Frey All-in-One (AIO) opportunity charging station
(Graphic: TDI).



Figure 4:
VLR Connection (Graphic: TDI).

speed of 70km/h, it can tackle a 5% gradient. All axles are driven, and an innovative bogie enables the network to have 15-metre radius curves.

The production vehicles weigh 11 t, are expected to cost around 750 000 GBP each and would usually carry 50 passengers or 70 in crush conditions when their weight would be 16,5t, giving them a maximum four-tonne axle weight.

Vehicles carrying 50 passengers with a typical four-minute headway would transport 750 people per hour. In comparison, this is about a third of the Edinburgh tram system, which carries 250 people at seven-minute headways. The operational concept is frequent vehicles of small size rather than larger, more infrequent ones.

The vehicle carries a relatively small 60kWh Lithium Titanate (LTO) battery to reduce vehicle weight compared to a typical battery electric multiple unit (BEMU). Frequent, rapid charging is needed to allow an operational service with such a small battery. LTO batteries are ideally suited to these applications as they enable rapid charging and long cycle life.

5.4 Charging Technology

The new charging infrastructure aims to provide a reliable, safe, affordable mode of traction power that supplements existing electrification systems. Furrer+Frey provided rapid opportunity charging (OppCharge) technology for Coventry VLR (Figure 3). The AIO Charger is based on bus charging but with additional security and communication protocols and it can charge the vehicle in a short time by delivering high power through its patented technology.

With a rapid charger at the route end, LTO equipped VLR vehicles can run on electric power, and the fast charger fills the batteries through DC conductive charging each time the vehicle reaches the end of the route. The amount of power that can be transferred is very high, making charging times shorter. For example, for the first route of approximately 20 km, the 450kW charger can top up the battery at the end of the route in about 3,5 minutes.

6 All-in-One Technical Specifications

6.1 Opportunity Charging

Interoperable charging between buses and VLR was essential for Coventry. The AIO charging system is based on the OppCharge standard, which is quite

common in buses, and many OEMs make Opp-Charge compatible vehicles within the bus world. OppCharge has several other vital factors that Coventry was keen to incorporate:

- The contact strips and onboard equipment are light (Figure 4).
- There are only few points of failure on the vehicle.
- There are no plugs nor trip hazards nor is people intervention required (Figure 5).

It was also necessary for the VLR project that the charging is fully autonomous. Thus, the charger can detect the vehicle automatically. The VLR vehicle and charger communicate through a secure Wi-Fi network, and once the vehicle is in the correct position, it commences charging. The vehicle acts as a client to the charger and continues charging until the vehicle starts moving away or the charging is complete.

A key feature of Furrer+Frey AIO technology is the integrated electronics, which means no separate rectifier unit or charger box is needed, simplifying on-street installations. Other advantages include modular build, fast installation, a small footprint of only 0,72m², plug-and-play technology, with easily replaceable power modules for scalability. The modular design allows for variable output ranges from 60kW to 450kW. It is also fully interoperable with different OEMs.

6.2 Power Supply

The charger utilises a 3-phase AC input power supply and converts it into DC output for charging. Since the batteries on the vehicle are also DC, the electricity can flow directly into the batteries through a copper conductive connection. As a result, the designed efficiency for power transfer is 95%, and the power factor $\cos \varphi$ is more than 0,99.

The 450kW charging power is received from 30 rectifier units connected in parallel, each with a rated DC power output of 15 kW. This allows smart charging where less power is transmitted if needed by the vehicle or to avoid high power charging when there is a high electrical demand from the grid. Additionally, in the case of a failure of one or several rectifiers the charger can still provide current.

Figure 6 shows a simplified schematic of the AIO charger. The generator connects to the Residual Current Detector, which then connects to the rectifiers through the isolator switch. There is also a control unit that provides a 12V pilot. The complete charge commences only when the 12V connection to the vehicle is proved, and it can be stopped immediately via external shutdown switches (physically or remotely).

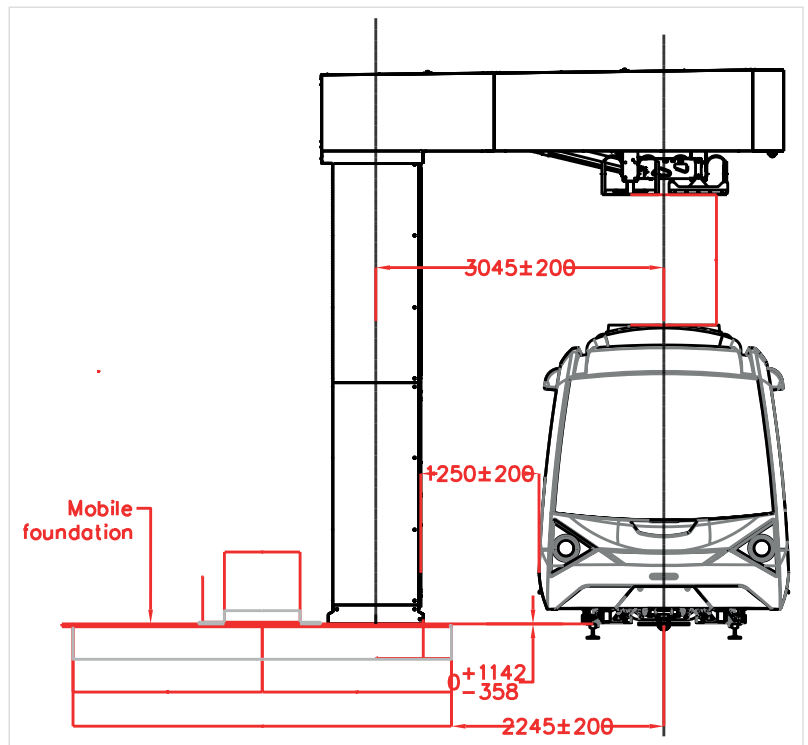


Figure 5: All-In-One (AIO) Charge Station (Graphic: Furrer + Frey).

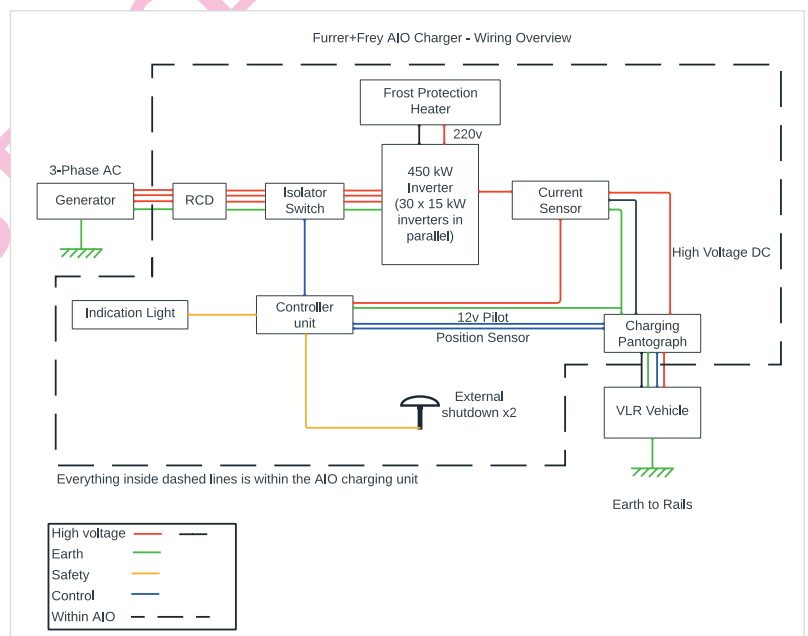


Figure 6: All-In-One (AIO) Charge Station Wiring Overview (Graphic: Furrer + Frey).

6.3 Pantograph

The AIO inverted pantograph allows for easy engagement with the vehicle and is compatible with different OEMs, which means that the charger can support both VLR and bus networks at the same location. The pantograph uses reliable 3-phase electric motor and stainless-steel construction with long-life

bearings. A 5,03m system height satisfies the UK normal minimum clearance under a highway bridge and makes the charger the only one that can be installed on UK highways.

The pantograph is also designed to deal with the vehicle's lateral roll when people get on board. This is more important to a very light rail vehicle than a standard rail vehicle because of the lower vehicle mass. Considering a large group of people with heavy luggage getting on board the vehicle at Coventry station, it would cause the vehicle to tilt to one side. The pantograph's contact with the vehicle needs to maintain constant charging.

6.4 Control

Though all electronics are housed inside the charger structure, control circuits are physically separated from AC input and DC output circuits. Therefore, the control circuit remains functional even when AC/DC conversion circuits are shut down. If the control circuit becomes non-functional for any reason, charging is stopped, and the pantograph is automatically raised.

The vehicle and the charging station exchange information and commands through a secured Wi-Fi connection. The charging station verifies the current parking position of the vehicle. This automatic positioning system is based on a real-time positioning system (RTLX) operating at broadband radio frequency (UWB – Ultra-Wideband Technology). This system is highly stable and hardly reacts to external influences like interfering signals, snow, and ice.

6.5 Remote Monitoring

The AIO Charger is compatible with a number of various remote monitoring software, i.e., Viriciti, Init Mobile Charge or other Smart Charging software through an Open Charge Point Protocol (OCPP) connection. It connects through a 3G network, and the centralised connection for each charge point allows taking advantage of the time of use and demand-response electricity rates

6.6 Safety

An Insulation Monitoring Device (IMD) continuously measures the resistance between different contacts and ensures that no current flows off to insulated components. If any fault current is detected, it immediately triggers an emergency stop and the pantograph returns to its raised position. The pantograph is also designed to contact the earth first and last when retracting, which ensures the safe connec-

tion is always maintained between the charger and the VLR vehicle.

6.7 Charger Installation

The charger is pre-built in a factory in two parts and transported to the site. Therefore, it is possible to conduct the installation in one day, as it only requires connecting the two parts on-site and providing the electrical section. Dudley installation, however, took place at a live construction site and a live test site as the construction of the innovation centre was delayed by COVID, which created several unique challenges.

7 Lessons Learned

7.1 Do not underestimate the complexity of having multiple stakeholders involved

BCIMO funded the project, but a broad group of governmental bodies provided their funding. The European Union, the regional development council – the Midlands Engine, the local development council, the Black Country Local Enterprise Partnership, Dudley town council, West Midlands Combined Authority, Coventry City Council & Coventry & Warwickshire County Council. A broad group of governmental stakeholders is good for commitment to future deployment. However, the single most chal-

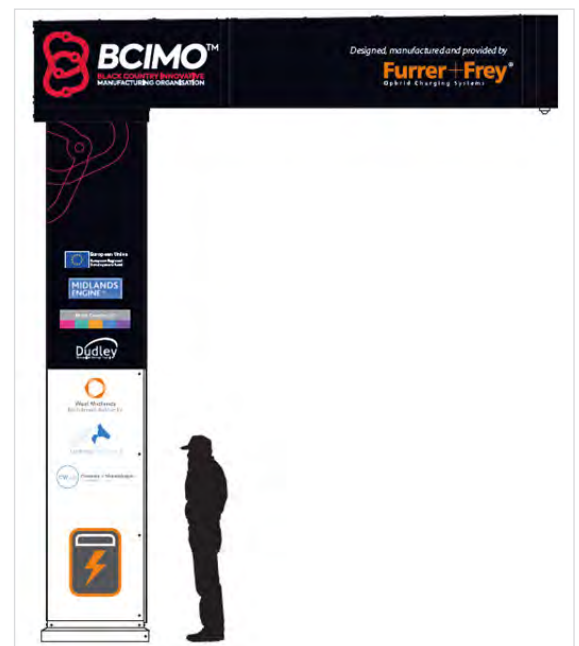


Figure 7: All-In-One (AIO) Charge Station – LOGO Design (Graphic: Furrer+Frey).

lenging part of the project was managing input from so many different governing bodies (Figure 7).

7.2 Do not underestimate the complexity of installing in an existing railway environment

Typically, a concrete side-bearing foundation would be installed for this type of structure. However, a ground investigation revealed a network of drainage, pipes, and cables. The gravity pad foundation had to be installed instead (Figure 8).

7.3 The overhead line has flexibility – chargers do not

Traditionally in electrification, the track is used as the reference for the construction of the overhead structure. However, the charger had to be installed prior to the track installation (Figure 9). The stagger of the traditional overhead line equipment is adjustable, and one can even move the cantilever to make final amendments, but this was not possible because the charger is a fixed structure. Combined with a tight location for the foundation, it led to an added layer of complexity with the track designer.



Figure 9: Initial Track location prior to the charger installation (Photo: Furrer+Frej).



Figure 8: Charger installation with gravity pad (Photo: Furrer+Frej).

7.4 For chargers, the grid connection is the ultimate constraint

For Overhead contact Line Equipment (OLE), the feed from the grid can be connected at the most convenient point as it acts as its conductor. However, a charger is a point load – it needs to be connected at one specific location. In this case, the local grid was located on the other side of the Innovation centre (behind the white construction fence in Figure 10). When construction of this was delayed by a year, there was no way to connect to the grid, and a temporary generator had to be used.

The use of a temporary generator created several issues itself. Firstly, a significant point load required the use of a large generator. Secondly, there was no road access until the innovation centre was built.



Figure 10: Charger location (Photo: Furrer+Frej).

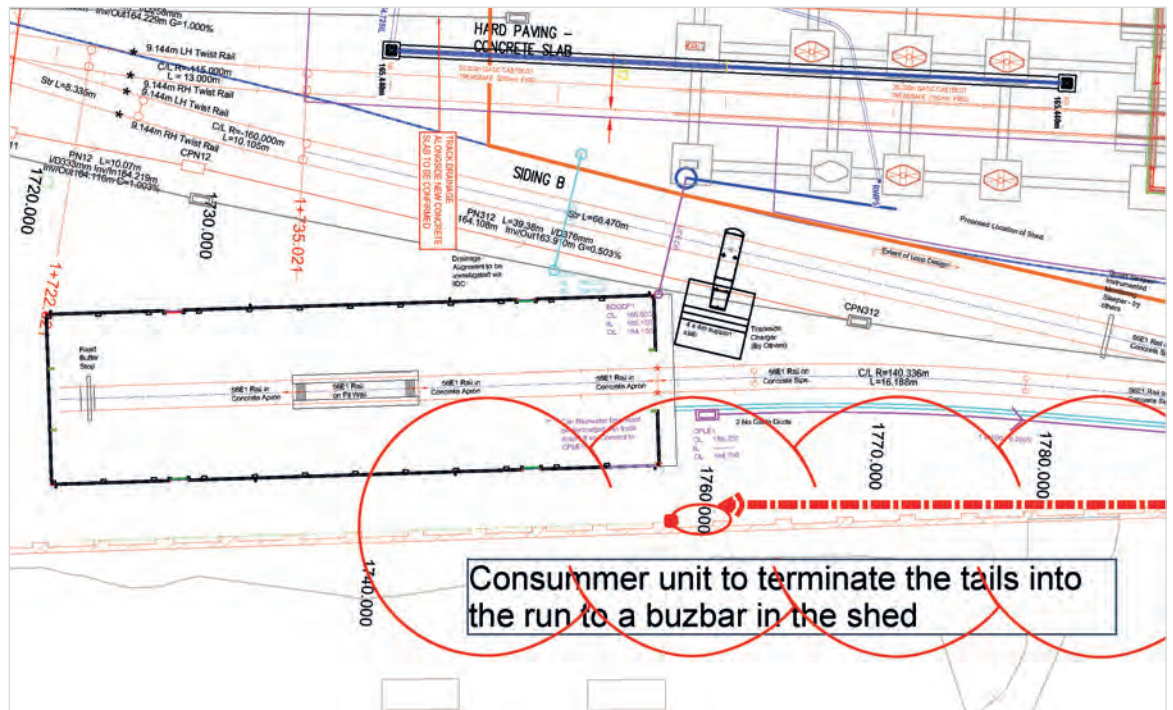


Figure 11: Grid connection point (Graphic: D. Meakin, Trackwork).

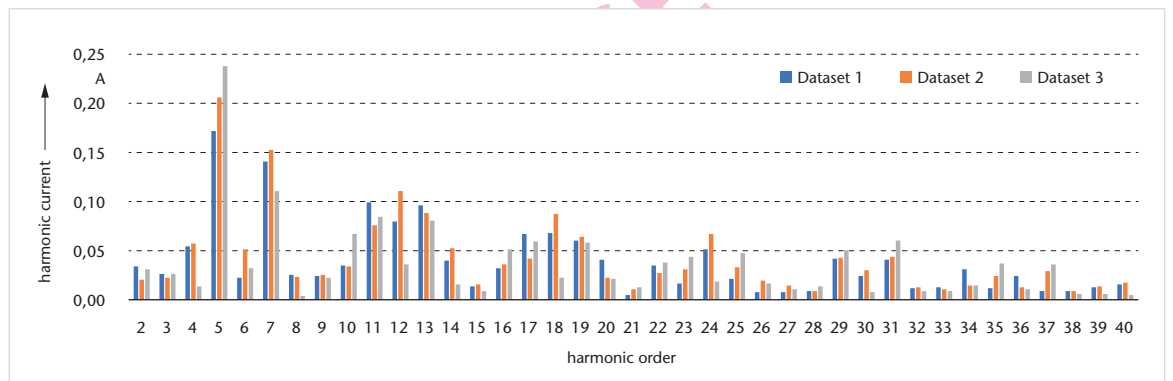


Figure 12: Harmonics current analysis output, produced as a part of a wider harmonics study; included for illustrative purposes only (Graphic: Furrer+ Frey).

This needed the generator to be sited some distance from the charger, which can cause a voltage drop. Now that the Innovation Centre is finished, the connection will be moved to the local grid (Figure 11).

7.5 Know your harmonics!

The final lesson learnt is harmonics. Harmonic analysis helps identify the potential risks and causes of problems, which can be avoided early in the design process and reduce the possibility of undesirable effects occurring. It can cause numerous issues when installing a large point load if not adequately managed.

In the UK, a national grid operator operates a grid of 400kV to 275kV. Then there are 9 local Distribu-

tion Network Operators (DNO) who operate 132kV down to domestic house supply. As the charger was connecting to the regional DNO with a large load, they were very interested in the harmonics of the system, as they wanted to ensure the harmonics did not affect the entire system. The harmonics analysis is used as pass or fail criteria to obtain a grid connection in these cases.

The amount of the impressed harmonics of the entire train system, charger, and output should have been declared before the connection to the grid. This is extremely difficult to fulfil for a new system that does not yet exist. Therefore, a lot of modelling was required. The original focus was on the charger, but the lesson learned is obvious: you need to focus on the whole system, not a particular part (Figure 12).

8 Conclusion

The charger installation was a massive success despite numerous challenges. Many technical solutions were offered to issues and problems, but the most crucial factor was collaboration. In a goal-oriented way, rather than focusing on commercial interests, the teams kept communication open, meeting regularly and discussing solutions.

The journey to Net-zero will require a great deal more cooperation between companies. Despite only being a small part of it, Furrer+Frey is proud to support Coventry's green ambition for net-zero public transport and looks forward to future collaborations.

9 Future Plans for VLR

Future visions include autonomous driving, which could reduce operating costs and boost load factors. In the future, artificial intelligence and autonomous systems could allow for a remote operator to monitor multiple vehicles and intervene when alerted to problems. While it is unlikely that this concept would be approved for use in Coventry before 2025, when Coventry is expected to introduce its VLR system, — VLRNIC will be actively involved in developing it.

References

- [1] <https://bcimo.co.uk/coventry-very-light-rail/>
- [2] <https://transportdesigninternational.com/portfolio/coventry-vlr/>
- [3] <https://www.coventry.gov.uk/regeneration-1/light-rail>

Authors



Noel Dolphin (45), from 2000 London Underground, managing operational performance on several lines; from 2007 to 2012 Network Rail, mainline electrification renewals, whilst at Network Rail studies in business leadership at the University of Warwick; since 2012 with Furrer + Frey, managing the UK offices and projects; Noel has recently been made a Fellow of the Permanent Way Institute in the UK and sits on the Electrification Membership Committee of the Permanent Way Institute.

Address: Furrer + Frey GB Ltd, 11 Cur-sitor Street, EC4A 1LL London, United Kingdom;
phone:: +44 7967667805;
e-mail:ndolphin@furrerfrey.co.uk



Robert Daffern (45), from 2000 50 2004 with Balfour Beatty, overhead line equipment maintenance; from 2004 to 2013 with Network Rai as senior maintenance engineer and senior project engineer; since 2013 with Furrer+Frey GB as principal engineer, development of Series1, development of DC electrification for Tyne and Wear Metro; rail and road charging systems.

Address: see above;
phone:: +44 7967667805;
e-mail:rdaffern@furrerfrey.co.uk



Mariusz Sledz (25), Master's at University College London, Bachelor's at University of Derby, simulation and mathematical modelling of vertical axis wind turbines; topology optimisation of additive manufactured metal matrix composites for space applications; since 2021 with Furrer + Frey as engineer, feasibility study for the first UK electric road system, rail lidar survey with machine learning and AI.

Address: see above;
phone:: +44 7397395151;
e-mail:msledz@furrerfrey.co.uk