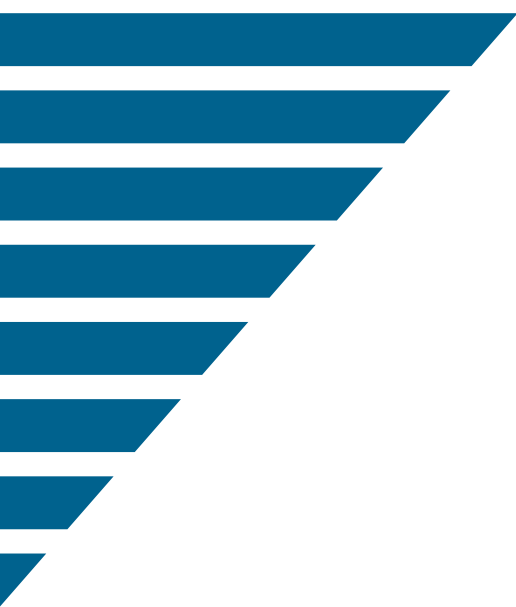


# 50-HZ-LADESTATIONEN KONZEPT FÜR AKKUMULATORTRIEBZÜGE MIT SYMMETRIERUMRICHTER

---

Deutsch



Autoren:  
Lars Lindenmüller und Marcus Müller (Dohna);  
Jens Northe und Steffen Röhlig (Offenbach am Main)

# Konzept für 50-Hz-Ladestationen für Akkumulatortriebzüge mit Symmetrierumrichter

Lars Lindenmüller und Marcus Müller (Dohna);  
Jens Northe und Steffen Röhlig (Offenbach am Main)

Der Einsatz von Akkumulatortriebzügen auf nicht elektrifizierten Strecken ist eine Möglichkeit, den Anteil der elektrischen Traktion zu erhöhen. Sie werden unter Fahrleitung fahrend oder an Ladestationen im Stand geladen und können Abschnitte bis etwa 100 km Länge fahrleitungsfrei durchfahren. Der Verzicht auf eine Frequenzwandlung ermöglicht die Speisung mit Netzfrequenz 50 Hz. Dabei vermeidet ein Symmetrierumrichter eine Schiefast im speisenden Netz.

**Concept for 50Hz charging stations for battery electric multiple units with balancing converter**  
The use of battery electric multiple units on non-electrified lines is one way of increasing the share of electrical traction. They are charged while driving under overhead contact lines or at charging stations while stopping and can drive through sections of up to 100 km without an overhead contact line. The omission of a frequency conversion enables the supply at a line frequency of 50 Hz. A balancing converter avoids an unbalanced load in the feeding supply system.

**Concept de stations de charge à 50 Hz avec compensateur de déséquilibre pour trains à batterie.**  
L'utilisation d'automotrices électriques à batterie sur portions de lignes non électrifiées constitue une opportunité d'augmenter la part de la traction électrique. Leur charge est effectuée sous caténaire ou bien à l'arrêt au moyen de station de charge. Elles peuvent effectuer des parcours jusque 100 km sans ligne aérienne de contact. Le fait d'éviter le recours à une fréquence de conversion permet l'alimentation par la fréquence du réseau à 50 Hz. Un compensateur de déséquilibre évite alors une charge déséquilibrée dans le réseau d'alimentation.

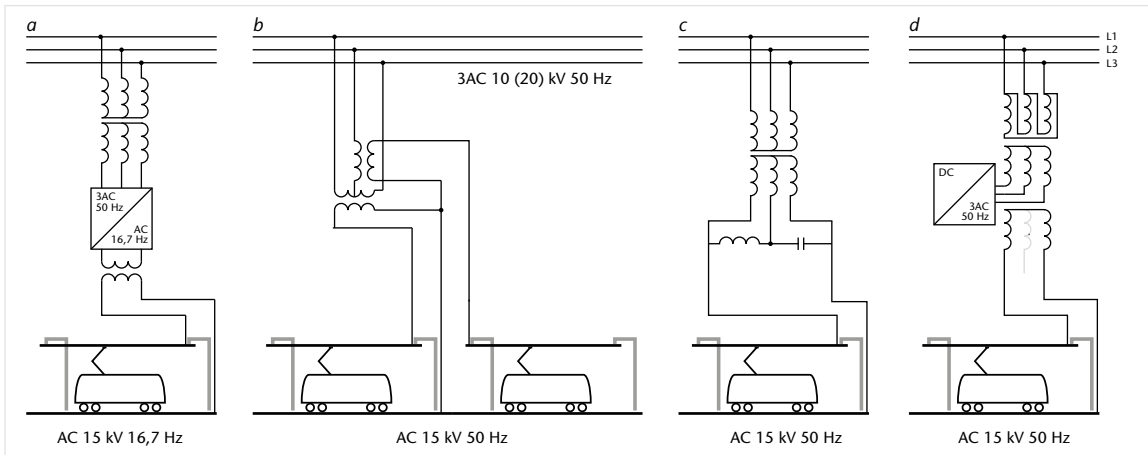
## 1 Einleitung

Die deutsche Bundesregierung plant, im Rahmen des Klimaschutzplans 2050 die elektrische Traktion des Schienenpersonennahverkehrs (SPNV) bis 2025 auf 95% der Transportleistung zu erhöhen. Dafür muss der Einsatz der Dieseltraktion stark reduziert werden.

Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass eine komplette Elektrifizierung mit Oberleitungen weder ökonomisch sinnvoll noch kurzfristig realisierbar ist. Daher muss auf hybridelektrische Antriebe zurückgegriffen werden. Eine Studie des VDE [1] unterstreicht, dass der Einsatz von Akkumulatortriebzügen (ETA; engl.: *Battery Electric Multiple Units*, BEMU) ökonomisch und ökologisch sinnvoll ist. Deshalb planen Verkehrsverbünde zunehmend, neben dem Einsatz von Wasserstofftriebzügen, den Einsatz von ETA im Linienbetrieb.

Die Technik der ETA ist nicht neu. Erste Fahrzeuge wurden bereits am Anfang der Entwicklung elektrischer Bahnen entworfen und eingesetzt, einzelne Fahrzeuge sogar bis heute. Diese Fahrzeuge wurden zumeist über Kabel geladen. Aufgrund

- ihrer durch die Bauart der Akkumulatoren bedingten hohen Fahrzeugmasse mit daraus resultierenden
    - begrenzten Reichweiten und
    - betrieblichen Beschränkungen,
  - der zunehmend leistungsfähigeren Dieseltraktion und
  - der fortschreitenden Elektrifizierung
- verlor diese Technologie zunehmend an Bedeutung. Moderne ETA können über Stromabnehmer während der Fahrt oder im Stand einfach, schnell und sicher geladen werden. Auf den für den Betrieb mit ETA vorgesehenen Strecken sind häufig nur an einem Ende elektrifizierte Strecken, so dass am anderen Ende Bahnhöfe mit einer Ladestation und Fahrleitung zum Nachladen im Stand ausgerüstet werden müssen. Wird die Fahrleitung zusätzlich über den Bahnsteigbereich hinaus erweitert, entstehen sogenannte Oberleitungsinseln, in denen die Züge in der Brems- und Beschleunigungsphase und, bei entsprechender Länge, darüber hinaus unter einer Fahrleitung fahren. Hierdurch erhöht sich die mögliche Zeit für die Energieübertragung beispielsweise für das Laden und die Akkumulatoren behalten eine



**Bild 1:** Prinzipschaltbilder für Möglichkeiten der Versorgung von Ladestationen (Bilder 1 bis 5: RPS, bearb. eb).  
 a – Vollumrichter für 16,7 Hz  
 b – 50 Hz mit Scott-Transformator  
 c – 50 Hz mit Steinmetz-Symmetrierschaltung  
 d – 50 Hz mit Symmetrierumrichter

höhere Energie für das Fahren ohne Oberleitung (siehe auch [2]).

Da an einem Streckenende bereits eine Fahrleitung mit der in Deutschland üblichen Speisespannung von AC 15 kV 16,7 Hz vorhanden ist, liegt es nahe, diese auch für Ladestationen zu nutzen. Hierfür ist eine Frequenzwandlung zwingend, welche durch ihren deutlichen technischen Aufwand als kleine dezentrale Umrichterwerke betrachtet werden können.

Demgegenüber stehen Überlegungen, die Speisung der Ladestationen direkt aus dem Landesnetz mit einer Frequenz von 50 Hz und mit Verzicht auf eine Frequenzumwandlung zu ermöglichen. Die nach EN 50163 [3] genormte Speisespannung AC 25 kV 50 Hz) erfordert jedoch die Auslegung der Fahrzeuge für diese deutlich höhere Spannung. Heute werden neue Fahrzeugtypen häufig nach einem Baukastenprinzip konzipiert und sind somit für alle gängigen Fahrleitungsspannungen mit entsprechenden Zusatzkosten lieferbar. Dabei ist aber zu beachten, dass auch neuere in der Auslieferung befindliche Fahrzeuge und Bestandsfahrzeuge nur für die Spannungsebene von 15 kV isoliert sind und somit, falls überhaupt möglich, umgerüstet werden müssten.

Dies führt zum Vorschlag, die derzeit nicht genormte Speisespannung von AC 15 kV 50 Hz zu verwenden. Denn als man sich für die Einführung der Spannung AC 15 kV  $16\frac{2}{3}$  Hz entschied [4], war diese einfach zweckmäßig und die Normenlage wurde im Nachgang angepasst.

Grundbedingung für den Einsatz von AC 15 kV 50 Hz ist allerdings, dass die Fahrzeuge diese Spannungsart nutzen können. Nachfragen bei der Fahrzeugindustrie haben ergeben, dass dies ohne gravierende Hardwareänderung möglich ist. Es ist vielmehr eine Frage der Anpassung der Steuerung (Software) und ein zusätzlich zu berücksichtigender Aspekt im Rahmen der Fahrzeugzulassung. Aus diesem Grund wird hier davon ausgegangen, dass moderne ETA mit vertretbarem Aufwand für die Spannung AC 15 kV 50 Hz geliefert werden können.

## 2 Lösungsansätze für 50-Hz-Ladestationen

Der große Vorteil der 50-Hz-Bahnenergieversorgung besteht darin, dass auf eine Frequenzumformung verzichtet werden kann und Transformatoren ausreichen, um die Spannung auf die des Fahrleitungsnetzes zu wandeln.

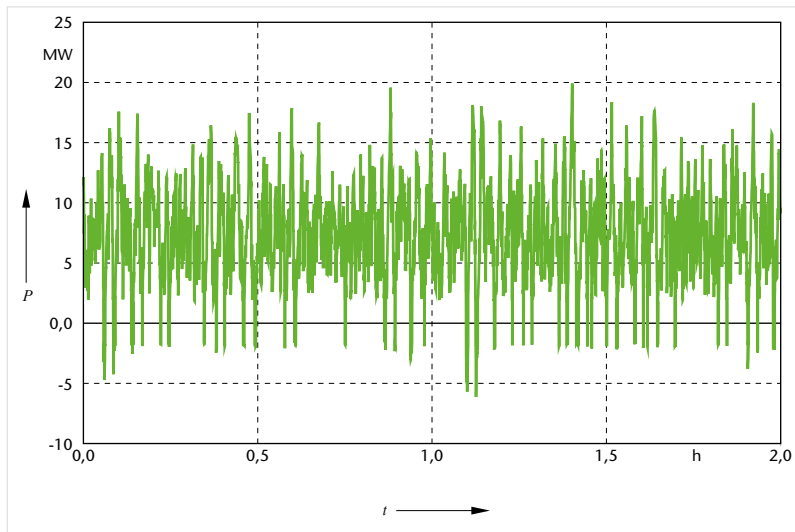
Die zweiphasige Lastentnahme aus einem Dreiphasennetz führt zu einer unsymmetrischen Belastung. Dieser wird bei mit 50 Hz elektrifizierten Strecken mit Speisung aus dem Hoch- oder Höchstspannungsnetz häufig durch zyklische Anschaltung der Unterwerke an das speisende Dreiphasennetz begegnet [5]. Bei einzelnen, aus dem Mittelspannungsnetz gespeisten Ladestation, ist dieser Ansatz nicht wählbar.

Eine Alternative dazu sind statische Frequenzumrichter, die ähnlich bei den dezentralen Umrichtern für das 16,7-Fahrleitungsnetz das Dreiphasennetz symmetrisch belasten. Für 50-Hz-Ladestationen sind sie irrelevant, da dann auch 16,7 Hz bereitgestellt werden könnten.

Unsymmetrien können durch die Nutzung von Sondertransformatoren begrenzt werden. Diese sind entweder für einen Arbeitspunkt ausgelegt oder erfordern gleichbelastete Teilsysteme, um die Last hinreichend zu symmetrieren. Der so genannte Scott-Transformator ist ein Beispiel mit gleichbelasteten Fahrleitungsabschnitten, welches für die symmetrische Belastung des Landesnetzes das parallele Laden zweier ETA mit gleicher Leistung erfordert. Ein derartiger Ansatz ist in [6] beschrieben.

Denkbar sind auch Symmetrierschaltungen nach Steinmetz oder Lastausgleichseinrichtungen im speisenden Drehstromnetz. All diese Ansätze werden aufgrund des Aufwandes und der eingeschränkten Symmetrierung für den Einsatz an einer Ladestation verworfen.

Stattdessen wird die Nutzung eines Symmetrierumrichters erwogen, dessen Funktionsweise im Abschnitt 4 beschrieben wird. Eine solche Lösung wur-



**Bild 2:**  
Typischer Lastgang eines AC-Unterwerks.

de für den Einsatz bei elektrifizierten Strecken entwickelt [7], wenn auch bisher nicht ausgeführt. Diese Lösung lässt eine flexible Lastabnahme zu und ist grundsätzlich auch für einen Fahrbetrieb unter Fahrleitung geeignet.

Bild 1 zeigt Prinzipschaltungen für mögliche Schaltungskonzepte von 50-Hz-Ladestationen verglichen mit einer Vollumrichterstation für 16,7 Hz.

## 3 Anforderungen

### 3.1 Allgemeines

Ladeeinrichtungen für ETA bestehen wie alle Bahnenergieversorgungssysteme aus einem Teil für die Energiebereitstellung und einem Teil für die Energieübertragung. Die Energiebereitstellung ist funktional mit einem Unterwerk vergleichbar, der Energieübertragung ein kurzes Stück Fahrleitung für das Laden im Stillstand oder ein Fahrleitungsabschnitt, der in der Beschleunigungs- oder Bremsphase des ETA räumlich begrenzt zur Verfügung steht. Hauptmerkmal einer Ladestation ist, dass sie unabhängig vom übrigen elektrifizierten Netz betrieben wird, das heißt im Inselbetrieb.

Die Energie bezieht das Unterwerk einer Ladestation aus dem örtlichen Energieverteilungsnetz mit einer Spannungsebene von zumeist 10 kV oder 20 kV. Da sich die Endpunkte der von ETA befahrenen Strecken zumeist in wirtschaftlich weniger ausgeprägten Regionen befinden, ist davon auszugehen, dass die Leistungsfähigkeit der Versorgungsnetze nicht der für eine Elektrifizierung erforderlichen entspricht. Die Leistungsfähigkeit der speisenden Netze ist schlichtweg geringer, als dies bei Bahn-Unterwerken,

die gewöhnlich aus 110-kV-Netzen (Bahnstromnetz oder Dreiphasen-Übertragungsnetz) gespeist werden, der Fall ist. Voruntersuchungen zeigen, dass an möglichen Standorten für Ladestationen eine Leistung deutlich größer 1 MW bereits problematisch sein kann und seitens des Energieversorgungsunternehmens mitunter erhebliche Vorkehrungen mit entsprechendem Investitionsaufwand dafür zu treffen sind. Aufwendungen für eine Doppelstich- oder Ringinspeisung zur Erhöhung der Verfügbarkeit fallen zusätzlich an.

### 3.2 Lastgang

Der Lastgang einer Ladestation unterscheidet sich signifikant von der eines gewöhnlichen Bahnunterwerks (Bild 2). Er ist durch den Fahrplan vorgegeben, wobei ein Stundentakt unterstellt wird. Ein weiteres wesentliches Kriterium ist der Fahrzeugeinsatz. Es ist davon auszugehen, dass auf einer bestimmten Strecke ETA gleicher Bauart zum Einsatz kommen. Offen ist, ob diese als Einzel- oder Doppelzug-Komposition verkehren oder zumindest die Möglichkeit dazu vorgesehen werden soll. Das hat unmittelbar Einfluss auf die erforderliche Leistung und die Ladezeit.

Bild 3 zeigt vereinfacht mögliche Lastgänge einer Ladestation. Grundlage dafür ist ein angenommener Stundentakt ab 06:00 Uhr, wobei der letzte Zug gegen 23:20 Uhr den Bahnhof verlässt. Die Leistungshöhe ergibt sich aus den zulässigen Strömen des Fahrdraht-Stromabnehmer-Kontakts. Bei einer möglichen Speisespannung von 17 kV ( $< U_{\max 1}$  nach EN 50163) ergibt sich bei zulässigen 80 A Kontaktstrom eine Leistung von 1,36 MW. Wenn ein ETA an einer Ladestation rund 350 kWh Energie aufnehmen will, benötigt er dazu knapp 16 min (Kurve 1). Die Akkumulatoren der derzeit in Fertigung befindlichen ETA werden über eine nutzbare Gesamtkapazität von 500 bis 700 kWh verfügen. Stünde an der Ladestation die doppelte Leistung zur Verfügung, würde sich die Ladezeit halbieren (Kurve 2), oder bei gleicher Zeit die Energie auf 700 kWh verdoppeln. Der Zug könnte dann gegebenenfalls nach einer kürzeren Halte- oder Wendezeit weiterfahren. Allerdings führt eine hohe Ladeleistung zu einer Lebensdauerreduzierung der Akkumulatoren. Ein Laden mit hoher Leistung ist daher nicht immer gewollt, stattdessen soll die Ladezeit optimal ausgenutzt werden. Zwischen den Ladeleistungen ist eine Grundlast für Eigenverbraucher wie Kühlung und Leittechnik zu erkennen.

In Bild 4 sind vergleichend die normierten zeitgewichteten Belastungsdauerkurven (ZBDK) für die Belastung eines normalen Bahn-Unterwerks und für die Lastgänge einer Ladestation nach Bild 3 dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Belastung der Ladestation

durch eine ausgeprägt lange Spitze gekennzeichnet ist, diese entspricht der Länge der Ladezeit. Danach fällt die Kurve bis zum Beginn des nächsten Ladevorgangs ab. Die stündlich wiederkehrenden Belastungen sind in der ZBDK zu erkennen, ebenso die Auswirkungen der unterschiedlichen Ladedauern und -leistungen. Da stündlich jeweils die gleiche Energie geladen wird, sind die Werte der Kurven 1 und 2 am Ende jeder Stunde gleich. Der Abfall am Ende der Kurve resultiert aus der nächtlichen Pause.

Bei den Belastungsdauerkurven der Effektivwerte wären die Werte für Kurve 2 im Vergleich zu Kurve 1 im Ergebnis deutlich höher und die thermischen Auswirkungen sichtbar.

Merkmal der Belastung einer Ladestation ist, dass anders als bei einem ständig belasteten Bahn-Unterwerk Leistung nur in bestimmten Zeitfenstern abgerufen wird. Zwischen diesen Zeitfenstern ist die Anlage nahezu lastfrei.

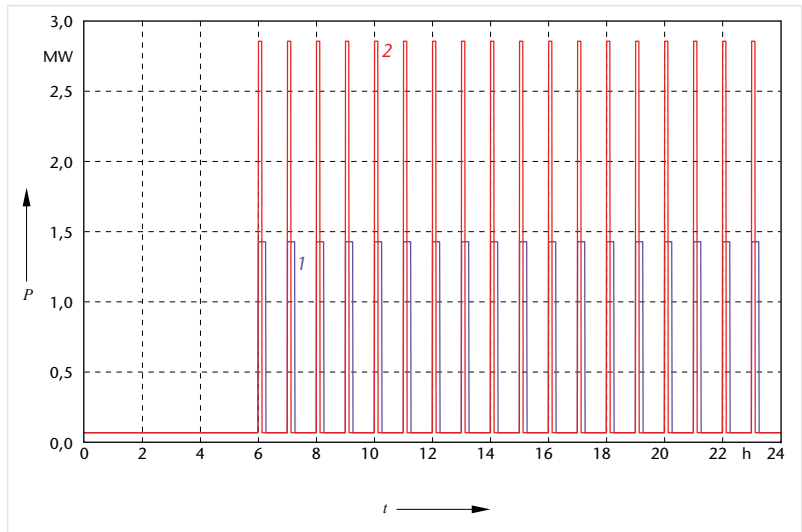
### 3.3 Verfügbarkeit

Ladestationen werden benötigt, um ETA für den nächsten Fahrtabschnitt mit ausreichend Energie zu versorgen. Die Ladestation muss daher auf Abruf sicher Energie bereitstellen können, da ansonsten der Betriebsablauf gestört wird. Das muss ausgeschlossen sein.

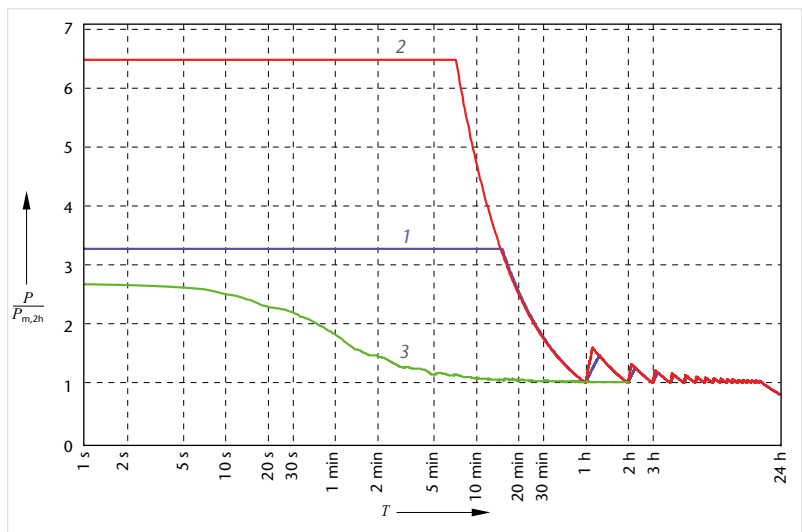
Bahnenergieversorgungsanlagen sind in der Regel hoch verfügbar. Sie erreichen Werte deutlich über 99%. Dazu ist die Anlage entsprechend redundant ausgelegt und strukturiert. Beispielsweise kann bei DC-Nahverkehrsbahnen mitunter der Ausfall ganzer Unterwerke vollständig durch die Nachbarunterwerke kompensiert werden.

Diese Möglichkeit besteht bei Ladestationen nicht. Sie sind nicht durch benachbarte Anlagen ersetzbar. Aus diesem Grund besteht grundsätzlich die Forderung nach einer hohen Verfügbarkeit ähnlich der sonstigen elektrischen Bahnenergieversorgungsanlagen. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass eine Ladestation mit oben genanntem Lastspiel (Fall 1) zu weniger als 20% der Tageszeit Leistung bereitstellen muss.

An dieser Stelle lohnt sich der Systemblick. Es ist offen, ob ein ETA mit so geringer Restenergie eine Ladestation erreicht, dass er nicht weiterfahren kann, um die nächste Ladestation oder einen elektrifizierten Streckenabschnitt erreichen zu können. Des Weiteren ist zu prüfen, ob in dem als selten anzunehmenden Ausfall einer Ladestation weitere Maßnahmen wie das Abschalten von Komfortleistungen oder das Reduzieren der Fahrgeschwindigkeit als akzeptable Reserve betrachtet werden können. Diese Frage wird an dieser Stelle bewusst gestellt, da eine hohe Redundanz bei der ohnehin gering in Anspruch genommenen elektrischen Ausrüstung den Aufwand



**Bild 3:** Vereinfachte Lastgänge einer Ladestation bei Ladung von 350 kWh je Ladevorgang. 1 – mit 80 A Ladestrom, 2 – mit 160 A Ladestrom



**Bild 4:** Auf  $T = 2$  h normierte zeitgewichtete Belastungsdauerkurven von Belastungen. 1 – Ladestation mit 80 A Ladestrom, 2 – Ladestation mit 160 A Ladestrom, 3 – Unterwerk mit 1,6 kA Maximalstrom.

für eine Ladestation extrem vergrößert und damit unwirtschaftlich werden lässt.

Die Verfügbarkeit sollte daher nicht für die Ladestation isoliert, sondern aus dem System heraus betrachtet und dabei betriebliche Aspekte und die Eigenschaften von Fahrzeugen und Infrastruktur gleichermaßen in Betracht gezogen werden.

### 3.5 Wirkungsgrad

Anlagen der Bahnenergieversorgung haben grundsätzlich einen sehr hohen Wirkungsgrad. Für dezentrale Umrichterwerke werden Wirkungsgrade über

97% erreicht. Bei Ladestationen mit einer gänzlich anderen Lastcharakteristik stellt sich die Frage etwas anders: Soll sie im Betriebspunkt, das heißt während des Ladevorgangs mit maximalem Wirkungsgrad arbeiten, oder sollen die Verluste, um die es schlussendlich geht, über den gesamten Tagesgang mit allen Betriebspausen insgesamt maßgeblich sein. Hier ist zwischen dem Wirkungsgrad im Arbeitspunkt und den Verlusten in den Lastpausen abzuwägen.

### 3.6 Fahrleitung

Die Energie wird auf die ETA über einen Fahrleistungsabschnitt übertragen. Wenn die Fahrzeuge im Stand geladen werden sollen, reicht ein kurzer Fahrleistungsabschnitt, der den Haltebereich der Fahrzeuge am Bahnsteig oder in Abstellanlagen und die möglichen Fahrzeugkonfigurationen berücksichtigt. Für diese Fälle bietet sich eine Stromschienenoberleitung an. Diese hat die Vorteile,

- dass sie keiner Abspannung bedarf,
- dass sie thermisch bessere Eigenschaften aufweist als eine Kettenwerksfahrleitung und
- dass die Erdungs- und Schutzmaßnahmen vereinfacht werden können, wenn kein Oberleitungsbereich angenommen werden muss (siehe EN 50122-1 [8]).

Alternativ sind so genannte Oberleitungsinseln möglich, die räumlich auf wenige Kilometer um den Bahnhof mit Ladestation begrenzt sind. Diese böten die Möglichkeit, dass sich die Ladezeit erhöht und insbesondere die Energie für die Anfahrt nicht aus den Akkumulatoren, sondern aus der Oberleitung entnommen werden kann. Ob der Aufwand gerechtfertigt ist, ist von mehreren Faktoren abhängig.

Während der Beschleunigungsphase des ETA ist davon auszugehen, dass die der Fahrleitung entnommene Energie vollständig für die Traktion und nicht für das Laden des Akkumulators genutzt wird. Ein Nahverkehrstriebzug benötigt für eine Beschleunigung bis 120 km/h fast 1 km und etwa 25 kWh Energie. Erst danach würde die Traktionsleistung sinken und ein Laden des Akkumulators möglich. Bei 120 km/h wird 1 km in 30 s zurückgelegt. Falls es die Fahrzeugausrüstung zulässt, der Fahrleitung während der Fahrt 2 MW zu entnehmen, würden während der Fahrt etwa 17 kWh/km abzüglich des Bedarfs für sonstige Bordverbraucher geladen werden können. Das heißt, 1 km Fahrleitung würde bei 120 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit einem Ladezeitäquivalent im Stand von knapp 45 s (bei 17 kV, 80 A) entsprechen. Um das überhaupt zu erreichen, sind einschließlich Beschleunigungslänge 2 km Fahrleitung erforderlich.

In der Bremsphase verhält es sich ähnlich. Während der Bremsphase wird die rekuperative Energie

direkt in den Akkumulator geleitet. Während dessen wird keine zusätzliche Energie aus der Fahrleitung aufgenommen. Darüber hinaus wird Fahrleitung für das An- und Ablegen des Stromabnehmers während der Fahrt benötigt. Hier ist auch Zeit für das Abschalten und in gegengesetzter Fahrtrichtung für das Umschalten der für das Fahren unter Fahrleitung nötigen Aggregate zu berücksichtigen. In Abhängigkeit der Streckengeschwindigkeit sind das mehrere hundert Meter, die ebenfalls ohne Lademöglichkeit zu befahren wären. Das führt schlussendlich dazu, dass bei knapp 3 km Fahrleitung etwa 60 kWh bis 70 kWh Energie bei Ein- und Ausfahrt nicht aus den Akkumulatoren entnommen werden muss. Das entspricht rund 2,5 min Ladezeit im Stand. Bei höheren Geschwindigkeiten verringert sich der Effekt aufgrund der kürzeren Fahrzeit unter Fahrleitung. Setzt man diese Zeit ins Verhältnis zu der Ladezeit im Stillstand, in der bis 500 kWh zu laden sind, ist dieser Zeitgewinn unter betrieblichen Aspekten möglicherweise vernachlässigbar.

Ein zu berücksichtigender Aspekt ist, dass die Ausrüstung der Ladestation dahingehend angepasst werden muss, dass sie zusätzlich zur Ladeleistung die Beschleunigungsleistung bereitstellen kann.

Die vorstehenden Ausführungen basieren auf fiktiven Fahrzeugdaten in Anlehnung an realisierte Nahverkehrstriebwagen. Die Frage, ob sich eine Oberleitungsinsel im Vergleich zu einer Lademöglichkeit im Stillstand lohnt, kann nur unter Beachtung von konkreter Fahrzeug-, Betriebs- und Infrastrukturdaten beantwortet werden.

### 3.7 Baugröße

Die Anlagen für Ladestationen müssen im Umfeld von Bahnhöfen errichtet werden. An diesen ist der zur Verfügung stehende Platz gegebenenfalls begrenzt. Um die Leitungslängen zu verkürzen und den Bauaufwand zu reduzieren, ist eine Errichtung unweit von Bahnsteigen, an denen die ETA zur Ladung stehen, anzustreben. Die Ladestationen sollen daher kompakt sein. Die Transportfähigkeit der Anlage auch zu Service- oder Tauschzwecken ist eine weitere Anforderung.

## 4 Anlagenkonzept

### 4.1 Grundlagen

Basis der Ladestation ist eine direkte Kopplung von Landes- und Bahnnetz über einen dreiphasigen Transformator. Zum Ausgleich der Schiefkast durch den einphasigen Bahnbetrieb wird ein Symmetrierumrichter an ein zusätzliches Wicklungssystem ange-

geschlossen (Bild 5). Dieser stellt die gleichmäßige Belastung der drei Phasen des Landesnetzes sicher und kompensiert somit die Schiefast vollständig. Zusätzlich kann der Umrichter die Oberschwingungen der Bahnlast reduzieren und Blindleistung aus dem Landesnetz kompensieren.

Durch die transformatorische Kopplung werden die Spannungstoleranzen des Landesnetzes annähernd direkt auf das Bahnnetz übertragen. Eine geringe Abweichung ergibt sich durch den Spannungsfall über die Streuinduktivität des Transformators und einer möglichen Spannungsstützung durch den Umrichter.

Im Regelfall wird nur ein Bahnspannungssystem erzeugt. An diesem können ein oder gleichzeitig mehrere Fahrzeuge bei vollem Ausgleich der Unsymmetrie geladen werden. Ladestationen mit Leistungen größer als der leistungsstärkste ETA lassen sich realisieren, indem unterschiedliche Oberleitungsabschnitte an Bahnspannungssysteme mit unterschiedlicher Phasenlage angeschlossen werden. In diesem Fall erfordert der Leistungszuwachs nur eine Erhöhung der Transformatorleistung, die Auslegung des Symmetrierumrichters bleibt auf die Leistung eines Bahnspannungssystems begrenzt.

Die Ladestation muss für die höchste Belastung bemessen sein, auch wenn diese nur für mehrere Minuten und mit längeren Pausen erforderlich ist. Der Transformator kann somit in Bezug auf seine hohe Wärmekapazität optimiert werden. Beim Symmetrierumrichter besteht hier nur wenig Spielraum, jedoch ist es grundsätzlich denkbar, den Umrichter für eine bestimmte, geringere Kompensationsleistung auszulegen. Überschreitet die angeforderte Ladeleistung diesen Wert, erfolgt nur eine Teilkompensation, die zulässige Größe der dann verbleibenden Schiefast muss mit dem Betreiber des Landesnetzes abgestimmt werden.

Ladestationen mit Symmetrierumrichtern haben den Vorteil, dass der Leistungsfluss und somit die Verluste durch die einfache transformatorische Übertragung geprägt werden. Der Betrieb des Symmetrierumrichters kann auf den reinen Ladevorgang begrenzt werden, so dass in der Bereitschaftszeit die Leerlaufverluste des Transformators dominieren. Davon unberührt bleibt die grundsätzliche Fragestellung, auf welchen Betriebspunkt oder für welchen Betriebsfahrplan der Wirkungsgrad optimiert wird.

Durch die direkte Kopplung des Bahnnetzes mit dem Landesnetz ergibt sich eine hohe Energieverfügbarkeit der Ladestation. Dabei kann angenommen werden, dass die ungeplante Nichtverfügbarkeit des Transformators deutlich kleiner ist als die des Landesnetzes mit seiner großflächigen Struktur. Durch die Anschaltung an eine separate Wicklung führt eine Nichtverfügbarkeit des Symmetrierumrichters zu keiner direkten Einschränkung der Energieverfügbarkeit. Für die Spannungsqualität des Lan-

desnetzes kann es jedoch erforderlich sein, die Übertragungsleistung des Ladepunktes bei Nichtverfügbarkeit des Symmetrierumrichters zeitlich oder leistungsmäßig zu begrenzen.

## 4.2 Komponenten

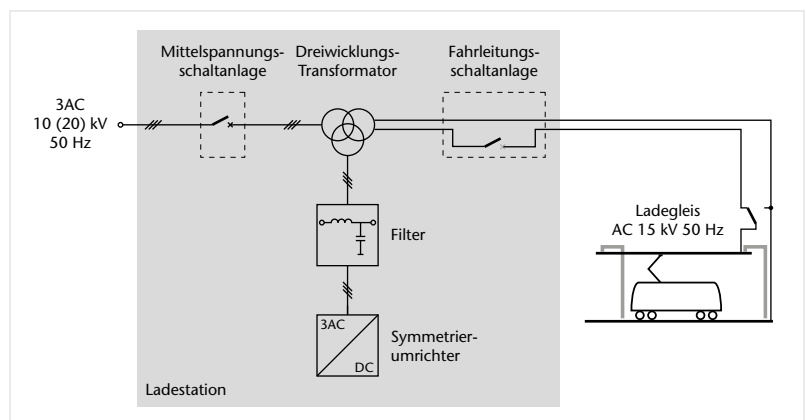
### 4.2.1 Transformator

Entsprechend des beschriebenen Anlagenkonzeptes wird ein Dreiwicklungstransformator benötigt. Dieser wird primärseitig an das 10-kV- oder 20-kV-Ortsnetz angeschlossen. Sekundärseitig wird einphasig das 15-kV-Bahnnetz, bei Bedarf mehrerer Fahrleitungsabschnitte auch zweifach angeschlossen.

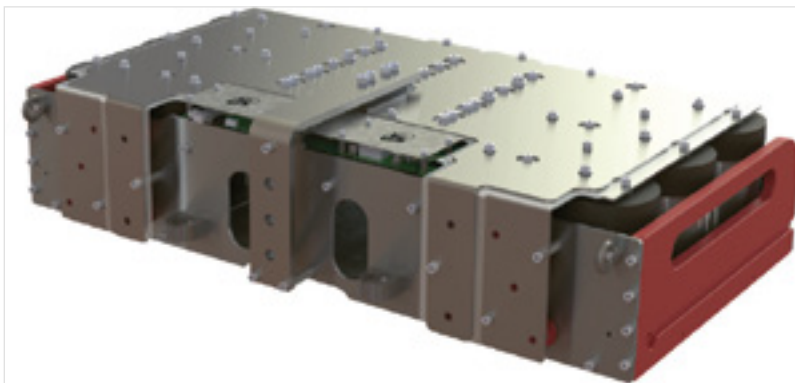
An die dritte Wicklung wird dreiphasig der Symmetrierumrichter angeschlossen. Wird der Spannungsbereich auf bis zu 1 kV begrenzt, kann der Umrichter aus Niederspannungskomponenten realisiert werden.

Für die Transformatorauslegung sind, neben Nennspannungen und -scheinleistung, die Kopplung der einzelnen Systeme und Impedanzen wesentlich. Entsprechend den Impedanzverhältnissen treten Oberschwingungen des Stromes, verursacht einerseits durch die Traktionsumrichter der ETA und andererseits durch den Umrichter selbst, als Rückwirkungen im speisenden Netz auf. Idealerweise sollen daher die Systeme Umrichter und Bahn sehr eng, die Systeme speisendes Netz und Bahn hingegen nur lose gekoppelt sein.

Aus diesen Forderungen wird direkt der konkrete Aufbau des Transformators abgeleitet. Die Anordnung der Wicklungssysteme ist für die Funktion der Ladestation entscheidend.



**Bild 5:** Hauptkomponenten der 50-Hz-Ladestation mit Symmetrierumrichter.



**Bild 6:** Stromrichtermodul TIBS®-PM2315 für Nennspannungen bis 1 000 V (Bilder 6 bis 11: F&S, bearb. eb).

### 4.2.2 Symmetrierumrichter

Der Symmetrierumrichter soll möglichst geringe Netzurückwirkungen verursachen, jedoch gleichzeitig über eine möglichst geringe Filterimpedanz an den Transformator angeschlossen werden. Hier ist eine Mehrpunkttopologie vorteilhaft, die bei vergleichbarer Schaltfrequenz der verwendeten Bauteile einen geringeren Oberschwingungsgehalt der Klemmenspannung im Vergleich zu einem klassischen Zweipunkt-Stromrichter aufweist. Es wird ein Drei-Punkt-Stromrichter der Niederspannungs-Stromrichterfamilie TIBS®-LC3 mit flüssigkeitsgekühlten Leistungsmodulen genutzt (Bild 6). Im Gegensatz zum Lösungsansatz nach [7] wird auf den Einsatz eines Saugkreises verzichtet, sondern der vorhandene Zwischenkreis über zusätzliche Kondensatoren erweitert.

Die Nutzung einer Wasserkühlung lässt sich vorteilhaft mit den Anforderungen des Lastprofils kombinieren. Ein ausreichend dimensioniertes Kühlmit-

telreservoir dient als thermisches Speicherelement, das während der Ladephase durch die Umrichterverluste zyklisch aufgeheizt, jedoch kontinuierlich abgekühlt wird. Die Auslegung des Rückkühlers auf die mittlere Verlustleistung erlaubt eine geräuschoptimierte Realisierung.

### 4.2.3 Filter

Der Symmetrierumrichter wird über eine Drossel und gedämpfte Filterkondensatoren an den Transformator angeschlossen. Deren Auslegung erfolgt unter mehreren Gesichtspunkten: Zunächst werden die Rückwirkungen des Symmetrierumrichters an sich gedämpft, so dass netzseitig die in der VDE-AR-N-4110 [9] vorgegebenen Grenzwerte eingehalten werden. Im nächsten Schritt werden die durch die ETA erzeugten Oberschwingungsanteile betrachtet. Die Impedanzen des Transformators bilden einen Stromteiler, das heißt die Oberschwingungsanteile des ETA teilen sich auf Netz und Umrichterseite auf. Bei günstigen Kopplungsverhältnissen reicht der an der Umrichterwicklung angeschlossene Filterkondensator als Oberschwingungssenke aus, beziehungsweise muss iterativ vergrößert werden. Reicht diese Maßnahme nicht mehr aus, so wird ein Filterkondensator auf der Bahnnetzseite erforderlich. Dieser sollte jedoch aus mehreren Gründen so gering wie möglich dimensioniert werden: Neben Kostengründen sind das insbesondere Blindleistung und die auftretende unsymmetrische Belastung. Beides kann durch den Symmetrierumrichter ausgeglichen werden, geht jedoch mit Zusatzverlusten einher. Idealerweise kann die Kombination aus Transformator, Filter und Symmetrierumrichter so ausgelegt werden, dass der Umrichter zwischen den Ladezyklen deaktiviert wird.

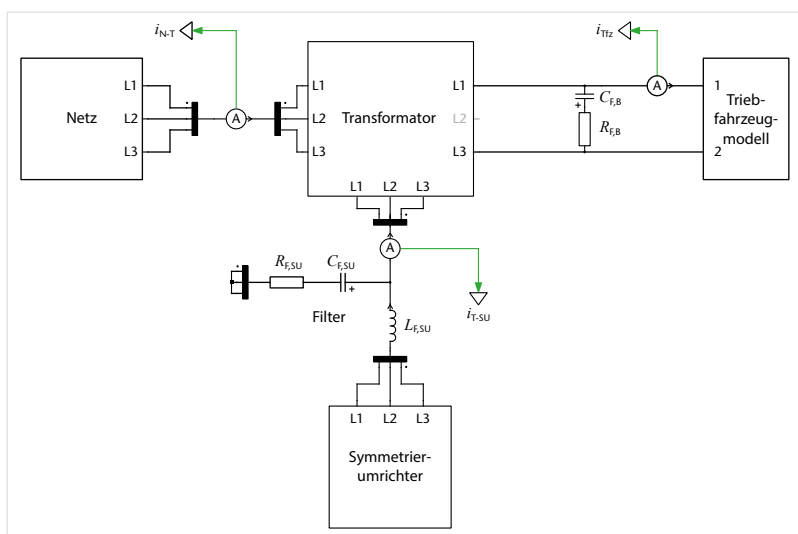
### 4.2.4 Sonstige Komponenten

Zur Ausrüstung der Ladestation zählen neben den Kernkomponenten

- Mittelspannungsschaltanlage,
- Eigenbedarfsanlage und -versorgung,
- Leittechnik einschließlich Fernwirkanbindung sowie
- Fahrleitungsschutztechnik.

Eine separate Fahrleitungsschaltanlage wird bei nur einem Streckenabgang als nicht zwingend angesehen, da eine Abschaltung über den in Reihe liegenden Leistungsschalter der Mittelspannungsschaltanlage möglich ist.

Die Speiseleitung wird über einen Oberleitungstrennschalter mit Erdkontakt auf die Fahrleitung geschaltet, welche als Stromschienenoberleitung ent-



**Bild 7:** Simulationsmodell.



sprechend der Länge der einzusetzenden Fahrzeugtypen und Zugkonfigurationen ausgeführt wird.

## 5 Beispielauslegung

Grundlage für die Beispielauslegung ist eine realistische Detailauslegung des Dreiwicklungstransformators, die in enger Abstimmung mit einem Transformatorhersteller durchgeführt wurde. Lastseitig wird ein fiktives Triebzugmodell angenommen. Das Triebzugmodell orientiert sich an Messungen eines realen Triebzuges, die an einem (Bahn-)Inselnetz mit kleiner Leistung durchgeführt wurden. Es umfasst

- die Impedanzmatrix des Traktionstransformators,
- ein Modell des Modulators der Vierquadrantensteller sowie
- das Sättigungsverhalten des Traktionstransformators,

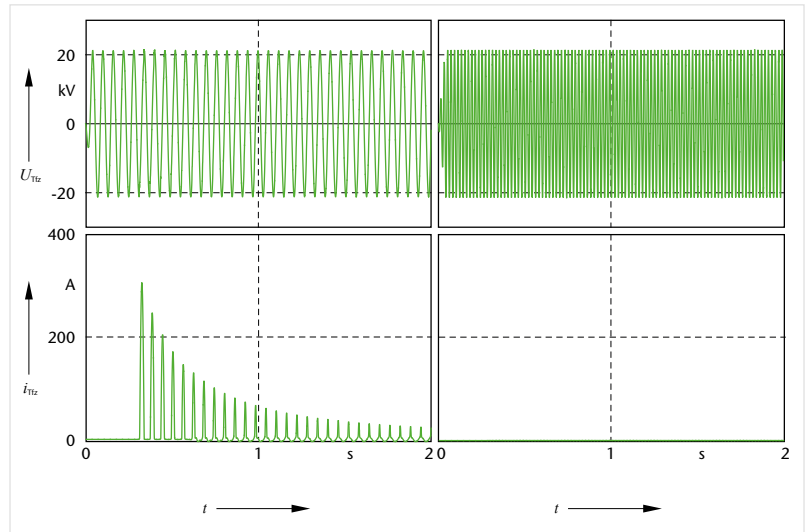
um Einschaltstoßströme nachzubilden. Umrichtermodulation und -regelung, umrichterseitiger Filter sowie bahnseitiger Filter wurden für diesen Triebzug ausgelegt. Netzseitig wurde ein schwaches Mittelspannungsnetz mit einer Netzkurzschlussleistung von 50 MVA angenommen, die VDE-AR-N-4110 soll eingehalten werden.

Die gezeigten Simulationen wurden mit der Simulationssoftware PLECS von Plexim durchgeführt, das zugrunde liegende Simulationsmodell ist in Bild 7 dargestellt. Der Dreiwicklungstransformator ist als Dyy-Typ modelliert, wobei für den Bahnanschluss die mittlere Wicklung (Anschluss L2) nicht verwendet wird.

Die Simulation des Einschaltstoßstromes ist in Bild 8 dargestellt und wurde für 16,7 Hz (*links*) und 50 Hz (*rechts*) durchgeführt, der Transformator wurde jeweils im Nulldurchgang bei etwa 0,3s zugeschaltet. Durch die erhöhte Frequenz von 50 Hz ist der Einschaltstrom des Traktionstransformators wesentlich reduziert. Verglichen mit Verläufen bei 16,7 Hz kann der Einschaltstoß, der nun im Bereich des Magnetisierungsstromes liegt, vernachlässigt werden.

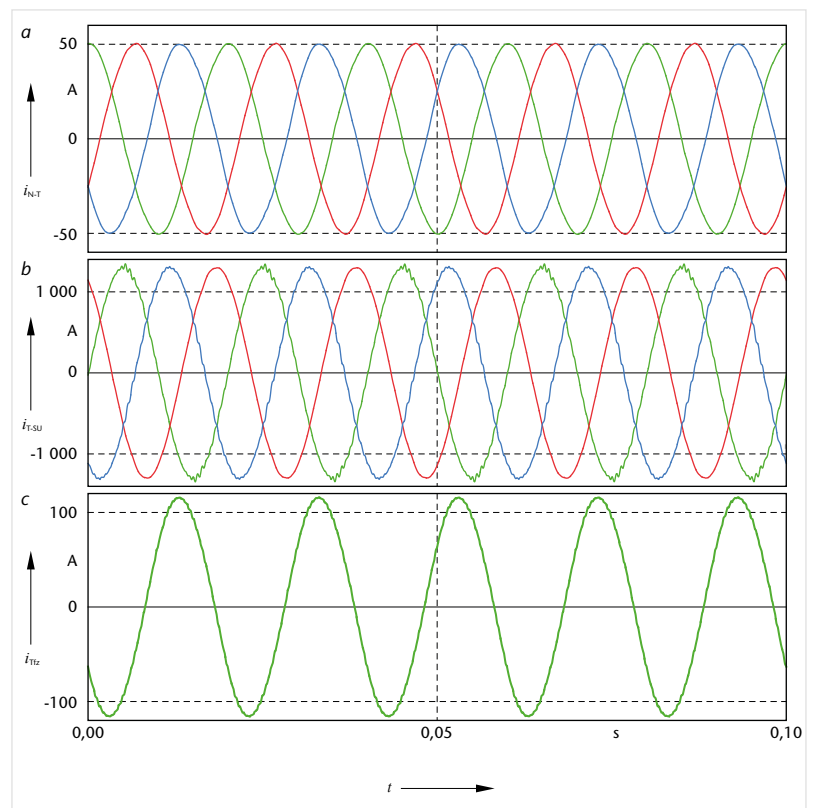
Während des Ladevorgangs ist die Funktionsweise des Symmetrierumrichters erkennbar, der in die entsprechende Transformatorwicklung ein Gegensystem einspeist, erkennbar am Vergleich zwischen Netz- und Symmetrierumrichterströmen. In Bild 9 ist die Phasenfolge L1 (*grün*), L2 (*rot*) L3 (*blau*) dargestellt.

Aufschluss über die Funktionsweise der Filter gibt weiterhin die schnelle Fourier-Transformation (engl.: *Fast Fourier Transformation*, FFT) der Ströme. In Bild 10 sind die in die einzelnen Frequenzanteile zerlegten Transformatorströme als relative Spitzenwerte, normiert auf die jeweilige Grundschwingung bei 50 Hz, dargestellt. Durch den Triebzug werden ins-

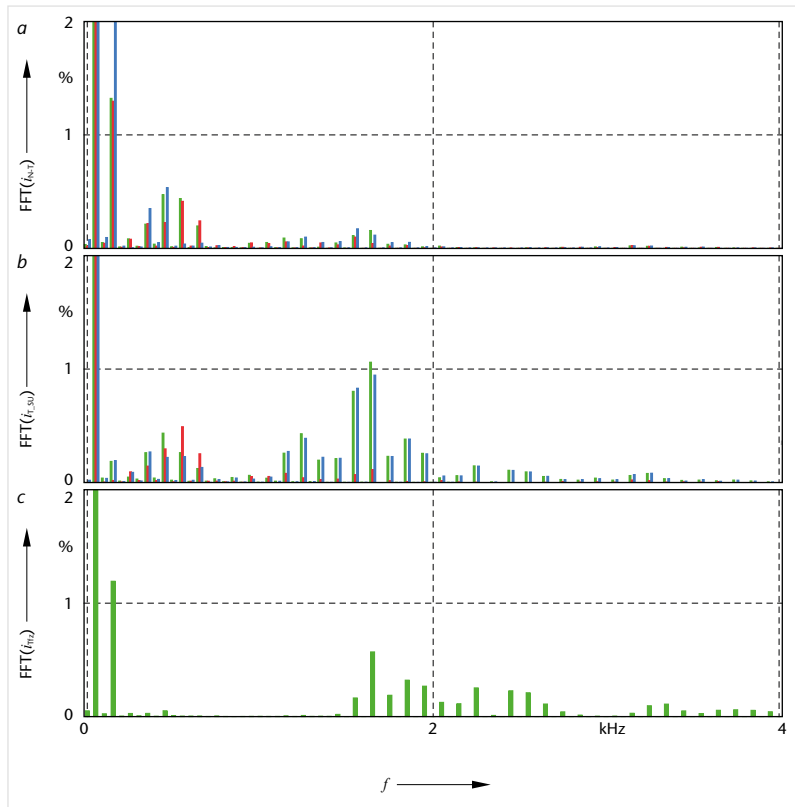


**Bild 8:** Simulierter Verlauf der Triebfahrzeugspannung und des Einschaltstroms. links – 16,7 Hz, rechts – 50 Hz

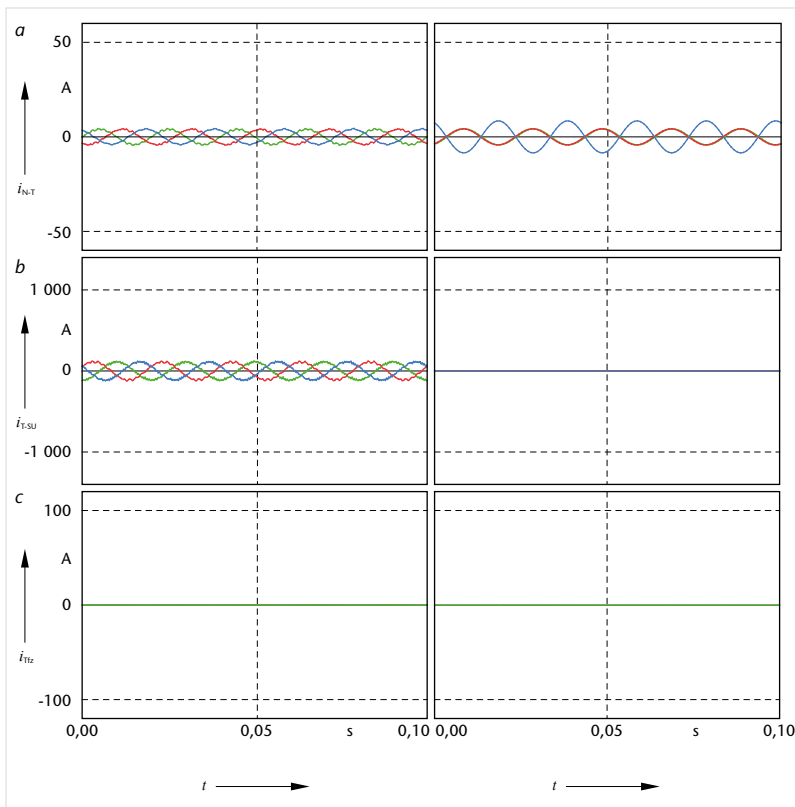
besondere im Bereich um 2 kHz Oberschwingungsanteile emittiert; diese finden sich im Netzstrom, zum größeren Anteil jedoch im Strom des Transformatorabganges der Symmetrierumrichterwicklung wieder. Die durch den Symmetrierumrichter selbst erzeugten Anteile liegen um 1,7 kHz und entsprechenden Vielfachen und sind bereits auf ein normativ zulässiges Maß reduziert.



**Bild 9:** Ströme während des Ladevorgangs. a – Netzstrom, b – Umrichterstrom, c – Triebfahrzeugstrom



**Bild 10:** Frequenzanteile der Ströme, normiert auf die Grundschwingung 50 Hz. a – Netzstrom, b – Umrichterstrom, c – Triebfahrzeugstrom



**Bild 11:** Ströme im Leerlauf, links mit und rechts ohne Symmetrierumrichter. a – Netzstrom, b – Umrichterstrom, c – Triebfahrzeugstrom

Im Leerlauf kompensiert der Symmetrierumrichter die einphasig anliegende Blindleistung des bahnsseitigen Filterkondensators (Bild 11, links). Als betriebliche Optimierungsmöglichkeit kann der Symmetrierumrichter im Leerlauf abgeschaltet werden, als Besonderheit kommt in diesem Fall noch hinzu, dass der Filterkondensator ebenfalls von der Umrichterwicklung des Dreiwicklungstransformators getrennt werden sollte (rechts). Der bahnsseitige Filterkondensator ist so dimensioniert, dass die auftretende unsymmetrische Belastung auch bei abgeschaltetem Umrichter innerhalb der Grenzen der VDE-ARN-4110 liegt. Eine Reaktivierung des Umrichters ist innerhalb weniger Millisekunden möglich und kann bei Erkennen einer entsprechenden Schiefast automatisch erfolgen.

Damit soll eine der Möglichkeiten aufgezeigt werden, die eine Gesamtsystemoptimierung bringen kann: Während durch die gewählte Auslegung eines minimalen bahnsseitigen Filterkondensators zwar ein größerer umrichterseitiger Filterkondensator und damit einhergehend höhere Filter- und Umrichterverluste während des Ladevorgangs gewählt wurden, können im Gegenzug durch das Abschalten des Filters und des Umrichters im Leerlauf über den gesamten Zyklus insgesamt Verluste reduziert werden. Für einen Vollumrichter, der für eine Versorgungsspannung von AC 15 kV 16,7 Hz erforderlich ist, ist diese Optimierung nicht ohne weiteres realisierbar.

Bei den gezeigten Verläufen handelt es sich um einen beispielhaften Anwendungsfall, der auf experimentell verifizierten Simulationsmodellen basiert. Im konkreten Einsatzfall müssen Simulationsmodelle und Komponentenauslegung den Gegebenheiten am Einsatzort angepasst werden.

## 6 Offene Fragestellungen

Künftig bleiben insbesondere Fragen des Betriebs von ETA an kleinen Netzen zu klären – unabhängig von der gewählten Frequenz 16,7 Hz oder 50 Hz. Die besondere Herausforderung ist dabei eine Koordination der Netzimpedanz, zulässiger Spannungsverzerrung, Rückwirkungen durch den ETA in Form von Oberschwingungen des Laststromes sowie Einschaltstoßströme. Werden ETA, die für den Betrieb am 16,7-Hz-Bahnnetz geeignet sind, an einer Ladestation mit AC 15 kV 50 Hz geladen, so sind aufgrund der höheren Frequenz Einschaltstoßströme unkritisch.

Aufgrund der geringen Leistung, die um ein Vielfaches geringer ist als für typische Umrichterwerke, ist die Netzimpedanz durch den verwendeten Transformator nach unten begrenzt. Einem Filter in Form eines Kondensators auf 15-kV-Seite ist eine zwischen Hersteller von ETA und Ladestation abgestimmte Lösung immer vorzuziehen, um zusätzlichen Blindleis-

tungsbedarf oder damit einhergehende Zusatzverluste zu vermeiden. Allgemein gültige Lösungen können hier über eine normativ zu klärende Schnittstelle geschaffen werden und bleiben eine künftige Aufgabe.

Schließlich bleibt die Frage der Bewertung der Energieeffizienz, auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Eine Ladestation sollte aufgrund des speziellen Ausstattungsbaus nicht allein über den Wirkungsgrad im Nennarbeitspunkt oder eine Wirkungsgradkurve bewertet werden, da gerade die Leerlaufverluste eine wesentliche Rolle spielen. Die beschriebenen Besonderheiten der 50-Hz-Ladestation können hier vorteilhaft zur Optimierung genutzt werden. Einen sinnvollen Bewertungsmaßstab zu finden, der für Hersteller beispielsweise auch eine Möglichkeit zur Optimierung zwischen Investitions- und Betriebskosten bietet, bleibt eine weitere offene Fragestellung.

## Literatur

- [1] VDE-Studie: Batteriesysteme für Schienenfahrzeuge – Emissionsfreier Antrieb mit Lithium-Ionen-Zellen. Verband der Elektrotechnik, Elektronik Informationstechnik e. V., Frankfurt am Main, 2018. <https://shop.vde.com/de/vde-studie-batteriesysteme-fuer-schiennentriebzuege>, aufgerufen am 01.03.2021.
- [2] Bruns, M.; Wittig, K.: Ladeinfrastruktur für Akkumulatortriebzüge. In: Elektrische Bahnen 119 (2021) H. 3, S. 73–79.
- [3] EN 50163:2004 + Ber. 1:2010 + Ber. 2:2014 + A1:2008 + A2:2020: Bahnanwendungen – Speisespannungen von Bahnnetzen.
- [4] Übereinkommen betreffen die Ausführung elektrischer Zugförderung (zwischen den preußisch-hessischen, bayerischen und badischen Staatseisenbahnen) von 1912.
- [5] Biesenack, H.; George, G.; Hofmann, G.; Schmieder, A.; u. a.: Energieversorgung elektrischer Bahnen. Wiesbaden: Teubner, 2006.
- [6] Dschung, F.: 50-Hz-Zugladestation für batterieelektrische Züge. In: Elektrische Bahnen 119 (2021) H. 3, S. 80–88.
- [7] Xie, J.: Symmetrierumrichter für 50-Hz-Bahnen. In: Elektrische Bahnen 97 (1999), H. 1-2, S. 49–55.
- [8] EN 50122-1:2011 + A1:2011 + AC:2012 + A2:2016 + A3:2016 + A4:2017: Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung.
- [9] Technische Anschlussregel Mittelspannung (VDE-AR-N 4110). VDE, 2018.

### Autoren



**Dr.-Ing. Lars Lindenmüller** (37), Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Dresden mit anschließender Promotion an der Professur Leistungselektronik; seit 2014 bei F&S PROZESSAUTOMATION GmbH, verantwortlich für den Fachbereich Projekte Leistungselektronik, sowie Systemdesign und den Entwurf von Leistungsmodulen.

Adresse: F&S PROZESSAUTOMATION GmbH, Gewerbering 35, 01809 Dohna, Deutschland;  
Fon: +49 3529 5667-501;  
E-mail: lars.lindenmueller@fs-aut.de



**Dipl.-Ing. Marcus Müller** (33), Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Dresden mit dem Schwerpunkt Leistungselektronik und Regelungstechnik; seit 2017 bei F&S PROZESSAUTOMATION GmbH; Arbeitsgebiete Systemdesign und stromrichternahe Regelung der Leistungselektronik.

Adresse: siehe oben;  
Fon: +49 3529 5667-###;  
E-mail: marcus.mueller@fs-aut.de



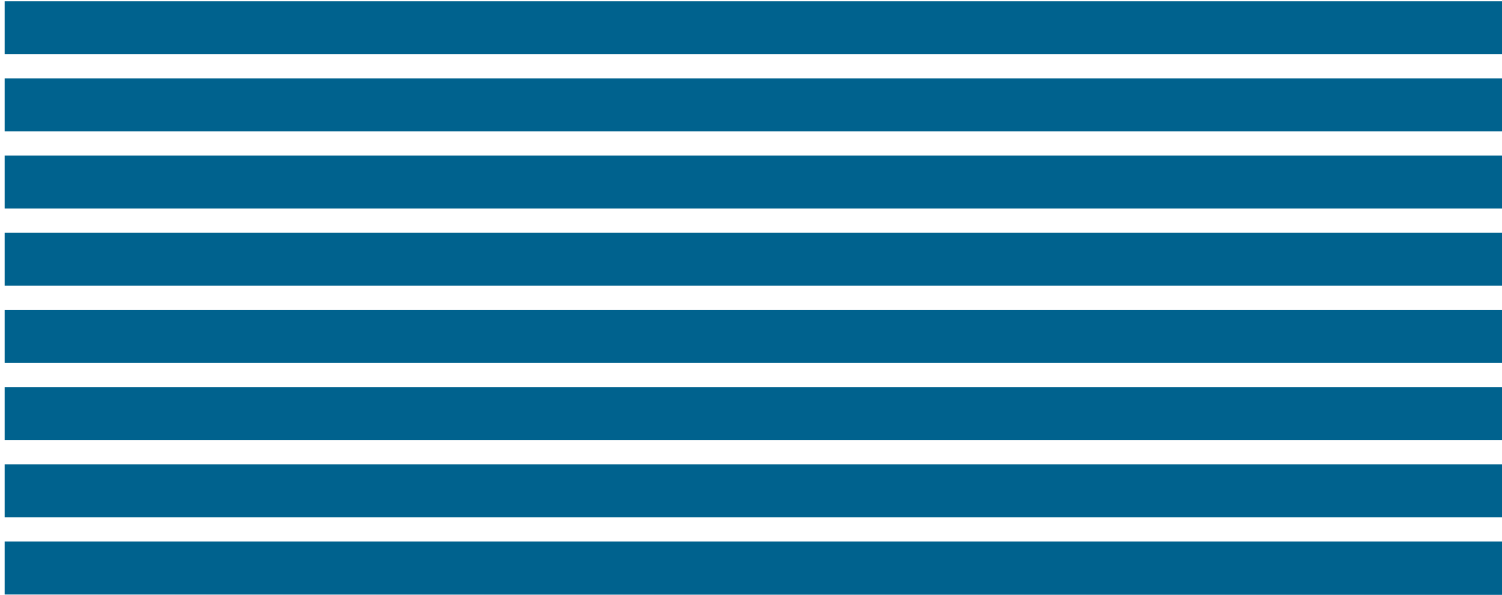
**Dipl.-Ing. Jens Northe** (58), Studium der Elektrischen Energietechnik an der Technischen Universität Darmstadt; seit 1989 bei Rail Power Systems GmbH und deren Vorgängern ABB, Adtranz, Balfour Beatty Rail; diverse Aufgaben und Funktionen im Bereich Bahnenergieversorgung; seit 2015 Senior Experte Bahnenergieversorgung in der Abteilung Systemdesign; Mitarbeit in deutschen, europäischen und internationalen Normungsgremien.

Adresse: Rail Power Systems GmbH, Frankfurter Straße 111, 63067 Offenbach am Main, Deutschland;  
Fon: +49 69 30859-535;  
E-mail: jens.northe@rail-ps.com



**Dr.-Ing. Steffen Röhlig** (58), Studium Elektrotechnik/Elektrische Bahnen und Promotion an der Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ Dresden; 1992 bis 2014 ELBAS Elektrische Bahnsysteme Ingenieur-Gesellschaft mbH, Geschäftsführer; seit 2014 Balfour Beatty Rail GmbH, jetzt Rail Power Systems GmbH, bis 2018 Geschäftsbereichsleiter Bahnenergieversorgung, seit 2019 Head of Business Development; Mitarbeit in deutschen und europäischen Normungsgremien.

Adresse: siehe oben;  
Fon: +49 69 30859-425;  
E-Mail: steffen.roehlig@rail-ps.com



© 2021. Alle Rechte sind der Rail Power Systems GmbH vorbehalten.

Die in diesem Dokument angegebenen Spezifikationen betreffen gängige Anwendungsbeispiele. Sie bilden nicht die Leistungsgrenzen ab. Im konkreten Anwendungsfall können daher abweichende Spezifikationen erreicht werden. Maßgeblich sind allein die im jeweiligen Angebot formulierten oder vertraglich vereinbarten Spezifikationen. Technische Änderungen bleiben vorbehalten. TracFeed® ist ein eingetragenes Warenzeichen der Rail Power Systems GmbH.