

Ein neuartiges Seriell-parallel-Hybridantriebssystem für Lokomotiven

Um den steigenden Anforderungen im Umweltschutz gerecht zu werden, wird bei der Deutschen Bahn AG ein neuer Hybridantrieb für bestehende Rangierlokomotiven mit Dieselmotor entwickelt. Mit dem neuen Antrieb wird eine signifikante Kraftstoff- und Schadstoffreduktion erreicht. Gleichzeitig können bestehende Lokomotiven auf den neuesten Stand der Technik gebracht und damit die Lebensdauer erheblich verlängert werden.

1. Einleitung

Bei Lokomotiven mit Dieselmotor als Traktionsleistungsquelle ergibt sich die Schwierigkeit, die Leistung möglichst verlustarm zu den Radsätzen zu übertragen. Verbrennungsmotoren benötigen einerseits eine relativ hohe Drehzahl, um die notwendige Traktionsleistung bereitzustellen. Andererseits rotieren die Radsätze der Lokomotive nur vergleichsweise langsam, müssen aber hohe Drehmomente liefern. Es sind dementsprechend drehzahl- und drehmoment-übersetzende Zwischensysteme notwendig.

Als robuste Lösung haben sich dieselhydraulische oder dieselelektrische An-

triebssysteme etabliert. Insbesondere bei den dieselhydraulischen Systemen sorgen aber die strömungsmechanischen Getriebe für hohe Verluste. Diese so genannte „Schlupfleistung“ wird über Kühlsysteme abgeführt und reduziert dadurch die Effizienz des Antriebssystems.

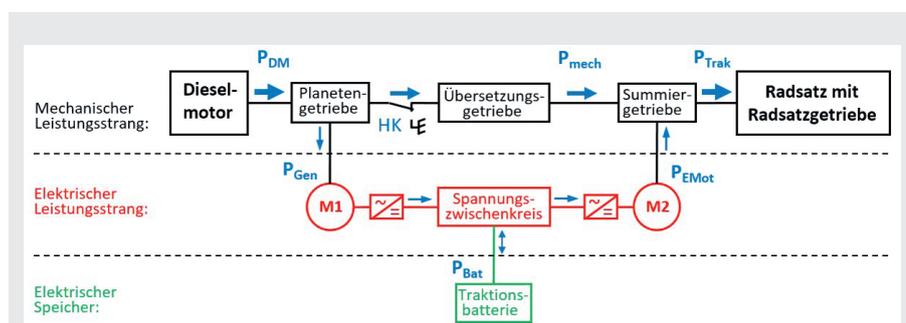
Dieselelektrische Antriebe erfordern ein groß dimensioniertes elektrisches Zwischensystem, um die hohen Traktionsleistungen zu übertragen. Die zweimalige Umformung der gesamten Leistung, mechanisch-elektrisch mittels Generator und von elektrisch wieder zu mechanisch durch Elektromotoren, verursacht auch bei diesen Systemen bedeutende Verluste.



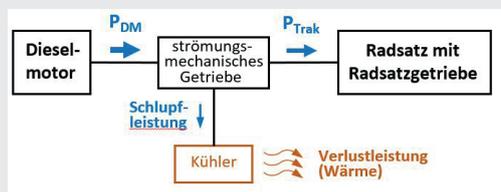
Andre Nadebohr, M. Sc.
akademischer Mitarbeiter
BTU Cottbus-Senftenberg
Lehrstuhl Leistungselektronik
und Antriebssysteme
nadebohr@b-tu.de



Dipl.-Ing. Toralf Noack
DB Systemtechnik,
technischer Leiter
im HELMS-Projekt
toralf.noack@deutschebahn.com



1: Grundstruktur HELMS Seriell-parallel-Hybridantrieb, Leistungsfluss im Normalbetrieb mit Batterieaufladung/-entladung



2: Grundstruktur des strömungsmechanischen Antriebes in der Altlok BR 294

2. Das HELMS-Projekt

Im Rahmen des HELMS-Projektes (Hybrid Electro Mechanical Shunter) der Deutschen Bahn AG wird ein neuartiges Seriell-parallel-Hybridantriebssystem realisiert. Dazu werden zwei Schienenfahrzeuge der Baureihe 294 zu HELMS-Lokomotiven umgebaut. Sie tragen die neue Baureihenbezeichnung 1094. Die Durchführung des Projektes erfolgt direkt durch die Deutsche Bahn. DB Cargo ist darin der Auftraggeber, DB Fahrzeuginstandhaltung Werk Cottbus übernimmt den Umbau der Lokomotiven und DB Systemtechnik die Systemverantwortung und das Engineering. Weitere große Entwicklungspartner sind dabei im Wesentlichen Toshiba Railway Europe GmbH für die elektrischen Antriebskomponenten

und TS Henschel GmbH für das HELMS-Getriebe. Die BTU Cottbus-Senftenberg beteiligt sich an der Systemanalyse und dem Energiemanagementsystem (EMS).

3. Aufbau und Funktion

Für den Umbau zu HELMS-Lokomotiven werden die strömungsmechanischen Getriebe der BR294 durch die neuen HELMS-Getriebe ersetzt und zusätzlich mit elektrischen Maschinen, Leistungselektronik und Traktionsbatterien ausgestattet. Der Dieselmotor der BR294 bleibt unverändert.

Mit dem neuen Seriell-parallel-Hybridantrieb wird nun ein Antriebssystem erprobt, bei dem zwei parallel liegende Leistungspfade realisiert sind (Bild 1).

Die Leistungsaufteilung auf die beiden Stränge erfolgt durch ein Planetengetriebe. Dabei wird der überwiegende Teil der Traktionsleistung direkt und verlustarm per mechanischem Strang (Übersetzungs- und Summiergetriebe) zu den Radsätzen übertragen. Die in den meisten Fällen geringere Teilleistung wird hingegen durch das parallel liegende elektrische System bestehend aus Generator (M1), Umrichter und Elektromotoren (2x M2) den Radsätzen zugeführt. Am elektrischen Strang ist darüber hinaus eine Speicherbatterie angebunden. Im Vergleich dazu ist im Bild 2 der Aufbau der Altlok BR294 dargestellt. Die Schlupfleistung ist darin vollständig Verlustleistung!

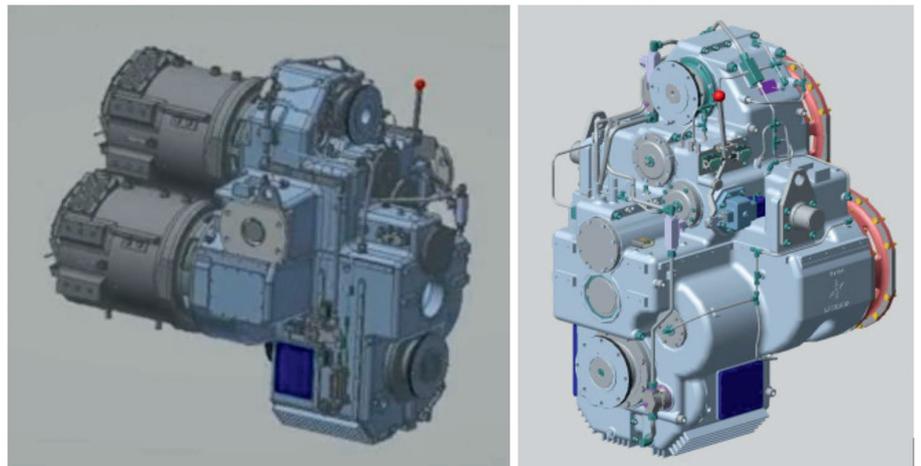
Eine weitere Besonderheit am HELMS-Antrieb ist eine Hybridkupplung (HK). Diese ist im mechanischen Leistungsstrang zwischen Planeten- und Übersetzungsgetriebe angeordnet. Durch die Hybridkupplung kann die Abtriebswelle des Planetengetriebes vom mechanischen

Strang entkoppelt und gleichzeitig festgesetzt werden. Das Planetengetriebe arbeitet dann im Zweiwellenbetrieb. Dadurch wird das Seriell-parallel-Hybridantriebssystem in einen reinen Seriell-Hybridantrieb umgeschaltet. Diese Konfiguration ist den klassischen dieselelektrischen Antrieben mit den oben genannten Nachteilen sehr ähnlich und wird daher weniger genutzt, ermöglicht aber Flexibilität in bestimmten Betriebsstrategien. Außerdem ist der elektrische Strang nicht für die volle Betriebsleistung der Lok dimensioniert. Nachfolgend wird deshalb im Wesentlichen nur die seriell-parallele Konfiguration betrachtet.

Die elektrische Leistung, die am Planetengetriebe durch den Generator abgezweigt wird, wird durch einen Gleichspannungszwischenkreis übertragen und unmittelbar vor den Radsätzen durch Traktionsmotoren

wieder dem mechanischen Strang zugeführt. Durch die Gleichstromübertragung findet eine Entkopplung zwischen Generator und Traktionsmotoren statt.

Die elektrischen Maschinen sind Asynchronmaschinen und direkt am HELMS-Getriebe angeflanscht. Dadurch ist das HELMS-System sehr kompakt und kann direkt an Stelle des strömungsmechanischen Getriebes in die Lokomotive implementiert werden. Der Generator hat eine Nennleistung von 500 kW und die beiden parallel arbeitenden Traktionsmotoren jeweils 250 kW. Die Traktionsbatterie ist mit einer Kapazität von 92 kWh vergleichsweise klein, gestattet es aber rekuperative Bremsvorgänge in ausreichendem Maße durchzuführen. Der Dieselmotor hat unverändert entsprechend der Altlok BR 294 eine Leistung von 1000 kW bei 1800 min⁻¹.



3: HELMS-Getriebe mit Asynchronmaschinen (links), Rückseite des Getriebes (rechts)

Quelle: Deutsche Bahn AG, DB Systemtechnik Cottbus

- ▶ Career Portal: <https://careers.toshiba.eu/de>
- ▶ Initiativbewerbung: recruitment@toshiba-trg.eu

TOSHIBA

Wir suchen Ingenieur*innen mit Schienenfahrzeugerfahrung

Toshiba Railway Europe GmbH ist Teil der Toshiba Corporation, die seit über 120 Jahren erfolgreich technologische Lösungen für den Bahnbereich realisiert. An unseren Standorten in Kiel und Düsseldorf entwickeln wir Hybrid-Lokomotiven und innovative, elektrische Antriebssysteme für Schienenfahrzeuge wie das langlebige Toshiba SCiB™-Batteriesystem.

Im Bild 3 ist das HELMS-Getriebe als CAD-Zeichnung dargestellt.

4. Steuerung des HELMS-Antriebes

Durch die leistungsverzweigende Struktur mittels Planetengetriebe kann der Dieselmotor unabhängig von der Radsatzdrehzahl, d.h. der Lokgeschwindigkeit, im verbrauchsoptimalen Drehzahlarbeitspunkt betrieben werden.

Ein zusätzlicher Freiheitsgrad in der Leistungssteuerung entsteht durch die an den Zwischenkreis angeschlossene Speicherbatterie. Für den Leistungsfluss ergeben sich folgende Möglichkeiten:

1. Die per Generator abgezweigte Leistung wird direkt durch die Traktionsmotoren wieder dem mechanischen Strang zugeführt (Normalbetrieb ohne Batterieladung).
Es gilt: $P_{Gen} = P_{EMot}$
2. Die abgezweigte Generatorleistung ist größer als die elektrische Traktionsleistung. Die überschüssige Leistung wird zur Batterieladung genutzt.
Es gilt: $P_{Gen} = P_{EMot} + P_{Bat}$
3. Die abgezweigte Generatorleistung ist kleiner als die elektrische Traktionsleistung. Die fehlende Leistung wird der Batterie entnommen.
Es gilt: $P_{Gen} = P_{EMot} - P_{Bat}$
4. Rekuperationsbetrieb: Die Generatorleistung ist Null. Die Traktionsmotoren arbeiten im generatorischen Betrieb (regeneratives Bremsen der Lok) und laden die Batterie.
Es gilt: $P_{Gen} = 0, P_{EMot} = P_{Bat}$

5. Inversbetrieb: Die Traktionsmotoren arbeiten im generatorischen und der Generator im motorischen Betriebsmodus. Die Leistung im Zwischenkreis fließt invers und wird im Planetengetriebe eingespeist. Der Inversbetrieb ist energetisch ungünstiger.
6. Generatorrekuperation: Das Bremsen der Lok (regenerativer Betrieb) wird über den mechanischen Strang und per Generator durchgeführt. Die Batterie wird geladen.
Es gilt: $P_{EMot} = 0, P_{Gen} = P_{Bat}$
Praktisch wird dieser Modus nicht genutzt, da eine beschleunigende Rückwirkung auf den Dieselmotor stattfindet.
7. Batterieladung im Stillstand: Die Hybridkupplung ist geöffnet und das Planetengetriebe arbeitet im Zweiwellenbetrieb. Es wird keine Leistung über den mechanischen Strang übertragen. Die Generatorleistung wird nur zur Batterieladung genutzt. (Die Leistung wird vom Dieselmotor abgegeben).
Es gilt: $P_{EMot} = 0, P_{Gen} = P_{Bat}$
(Mit geöffneter Hybridkupplung wären in analoger Weise auch die Leistungsflüsse 1 bis 3 möglich, dann natürlich ohne mechanische Leistungsübertragung.)

Die Drehzahlen der mechanischen Komponenten (inkl. der elektrischen Maschinen) bzw. die Drehzahlverhältnisse im gesamten Antriebssystem sind durch die aktuelle Lokgeschwindigkeit (Radsatzdrehzahl) und durch die Dieselmotordrehzahl eindeutig bestimmt (Bild 4).

Allgemein werden die Drehzahlverhältnisse durch die Willis-Gleichung am Planetengetriebe und durch die Übersetzungsverhältnisse der Getriebestufen berechnet.

Durch die Steuerung der Lokomotive können die Dieselmotordrehzahl (N_{DM}) und die Momente der elektrischen Maschinen (M_{Gen}, M_{EMot}) vorgegeben werden. Die Drehzahlvorgabe an den Dieselmotor kann dabei je nach Betriebsstrategie in diskreten Stufen oder mit kontinuierlichen Werten erfolgen. Soll der Dieselmotor bei entsprechender Leistungsanforderung im verbrauchsoptimalen Drehzahlarbeitspunkt betrieben werden, kann die Leistungsaufteilung zwischen mechanischem und elektrischem Strang am Planetengetriebe nur durch eine Momentvorgabe am Generator erfolgen. Es gilt:

$$N_{DM} \cdot M_{DM} = N_{Gen} \cdot M_{Gen} + N_{mech} \cdot M_{mech}$$

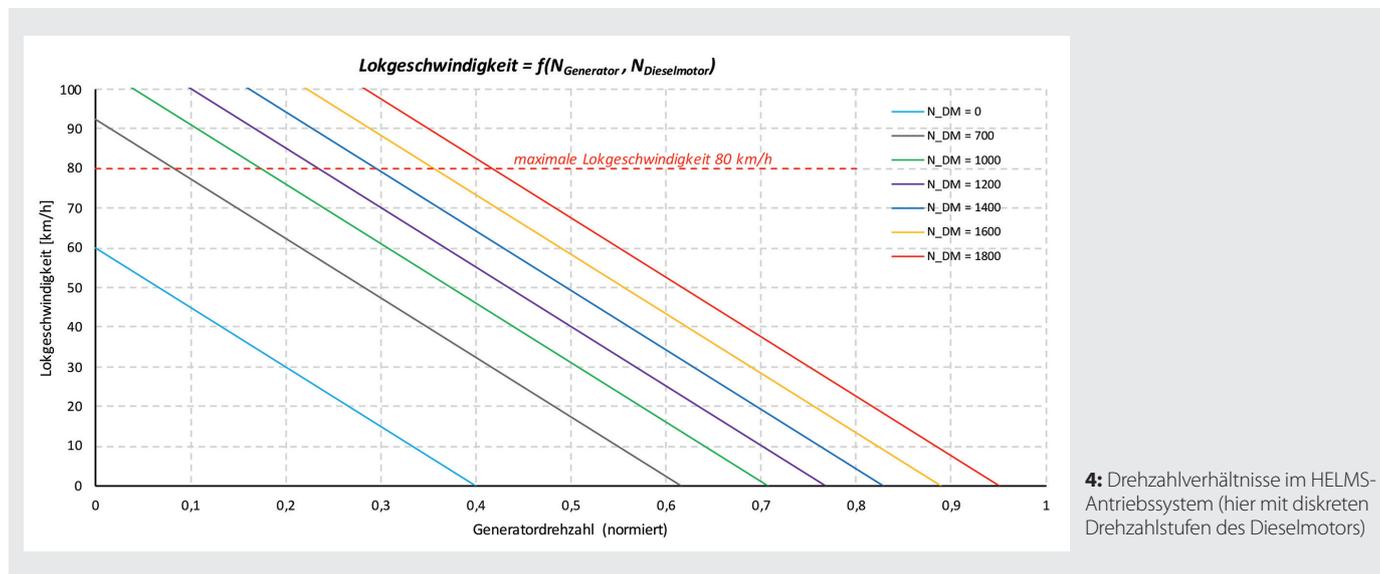
Die geforderte Traktionsleistung (Zugkraft) an den Radsätzen wird vom Lokführer vorgegeben. Es gilt:

$$P_{Trak} = P_{mech} + P_{EMot}$$

Unter Einbeziehung der Traktionsbatterie am Spannungszwischenkreis ergibt sich damit die Gesamtleistungsbilanz für den Dieselmotor:

$$P_{DM} = P_{Trak} + P_{BatLaden} = P_{mech} + P_{EMot} + P_{BatLaden} = P_{mech} + P_{Gen}$$

Wobei die Batterieleistung entsprechend der oben beschriebenen Leistungsflüsse durch das Verhältnis der Generator- und Traktionsmotorleistung gesteuert werden kann:



4: Drehzahlverhältnisse im HELMS-Antriebssystem (hier mit diskreten Drehzahlstufen des Dieselmotors)

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für BTU Cottbus-Senftenberg /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten
 genehmigt von DVV Media Group GmbH 2020

$$P_{\text{BatLaden}} = P_{\text{Gen}} - P_{\text{EMot}} \text{ (bzw. } P_{\text{BatEntladen}} = P_{\text{EMot}} - P_{\text{Gen}})$$

Die allgemeine Regelungsstrategie durch die Steuerung ist die Folgende:

Bei vorgegebenen Leistungsanforderungen P_{Trak} und P_{Bat} wird für den Dieselmotor die verbrauchsoptimale Drehzahl eingestellt. Durch die Vorgabe des Generatormomentes erfolgt die passende Leistungsaufteilung am Planetengetriebe. Die Traktionsmotormomente bestimmen dann, in Summe mit der übertragenen Leistung des mechanischen Stranges, die Traktionsleistung an den Radsätzen und gleichzeitig die Batterieleistung (laden oder entladen).

Die Tabelle 1 fasst die Steuerparameter zusammen.

5. Zusammenfassung

Aktuell werden an den beiden HELMS-Lokomotiven verschiedene Regelstrategien des Hybridantriebes untersucht. Die ers-

Parameter	Quelle	Berechnung
P_{Trak}	Lokführer	-
P_{Bat}	Lokführer, EMS	-
N_{DM}	Loksteuerung	Motorkennfeld: $N_{\text{DM}} = f(P_{\text{DM}}, b_e)$
M_{Gen}	Loksteuerung	$M_{\text{Gen}} = f(P_{\text{Trak}}, P_{\text{Bat}}, v_{\text{Lok}}, N_{\text{Gen}})$
M_{EMot}	Loksteuerung	$M_{\text{EMot}} = f(P_{\text{Trak}}, P_{\text{Bat}}, v_{\text{Lok}}, N_{\text{Gen}})$

Tabelle 1: Steuerparameter des HELMS-Antriebes

ten Resultate zeigen, dass durch die Vermeidung der „Schlupfleistung“ und durch Bremsenergierückgewinnung die prognostizierten Kraftstoffeinsparungen gegenüber der Altlokomotive BR 294 von bis zu 20% tatsächlich erreicht werden.

Eine HELMS-Prototyplokomotive durchläuft derzeit diverse Zulassungsüberprüfungen und wird damit für die Betriebsbewährungserprobungsphase im realen Bahnbetrieb vorbereitet. Im Rahmen der Erprobungsphase werden dann auch weitere Optimierungen und Untersuchungen zu Betriebsstrategien durchgeführt.

Summary

A novel serial-parallel hybrid driving system for locomotives

In order to fulfill the increasing requirements of environmental protection, Deutsche Bahn AG is developing a new hybrid drive for existing shunting locomotives with diesel engine. With the new drive, a significant fuel and contaminants reduction is achieved. At the same time, existing locomotives can be brought up to the latest state-of-the-art thus considerably extending their service life.

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für BTU Cottbus-Senftenberg /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten
 genehmigt von DVV Media Group GmbH 2020

Für Ihre Werbeplanung – die kommenden Ausgaben im Überblick

THEMEN

12/2020

- Service und Instandhaltung, Reinigung
- Predictive Maintenance/ Diagnose
- Trends in der Fahrweginstandhaltung
- Bremstechnik
- Mit ETR-Austria 4/20

Erscheinungstermin: 08.12.2020
 Anzeigenschluss: 10.11.2020
 Druckunterlagenschluss: 13.11.2020

1+2/2021

- Prüfen und Testen
- Zulassung und Genehmigung
- Sicherheit an Bahnübergängen
- Maschinen zur Oberbau-Instandhaltung
- Erhöhung der Streckenkapazität

Erscheinungstermin: 10.02.2021
 Anzeigenschluss: 13.01.2021
 Druckunterlagenschluss: 20.01.2021

Tim Feindt • 040/23 714-220 • tim.feindt@dvvmedia.com

EISENBAHNTECHNISCHE RUNDschau