# Simulation und Vergleich zweier Betriebsarten des Antriebssystems für HELMS-Lokomotiven

Das neuartige Seriell-parallel-Hybridantriebssystem der HELMS-Rangierlokomotiven *(Hybrid Electro-Mechanical Shunter)* ist sehr flexibel und ermöglicht dadurch verschiedene Betriebsstrategien der neubenannten Lokomotiven BR 1094. Zwei grundlegende Betriebsmodi des Hybridantriebes wurden simulativ verglichen.

**Kateryna Stolz, M. Sc.**
Akademische Mitarbeiterin
BTU Cottbus-Senftenberg
Kateryna.Stolz@b-tu.de

**Prof. Dr.-Ing. Georg Möhlenkamp**
Lehrstuhl Leistungselektronik und Antriebssysteme
Lehrstuhlleiter
BTU Cottbus-Senftenberg
Georg.Moehlenkamp@b-tu.de

**Andre Nadebohr, M. Sc.**
Akademischer Mitarbeiter
BTU Cottbus-Senftenberg
Andre.Nadebohr@b-tu.de

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

## 1. Einleitung

Das Innovationsprojekt HELMS ist ein Hybridisierungs- und Modernisierungskonzept des DB-Verbundes für die Rangierlokomotiven der Baureihe 294, das in Kooperation mit Toshiba, Henschel, BTU Cottbus-Senftenberg und mit Mitteln aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung im Land Brandenburg realisiert wurde.

Im Rahmen der Untersuchung des Betriebsverhaltens der HELMS-Modernisierungslösungen an einem Prototyp wurde u.a. die implementierte Betriebsstrategie hinsichtlich ihrer Effizienz überprüft. Dabei wurde ein Simulationsmodell des HELMS-Antriebssystems in Matlab/Simulink umgesetzt und für die Bewertung des Kraftstoff- und Emissionseinsparpotentiales der verschiedenen Betriebsmodi der neuen Lokomotive verwendet.

Als eine moderne und vielversprechende Alternative zu konventionellen dieselhydraulischen Antrieben der Baureihe 294 besitzt das HELMS-Antriebssystem ein großes Potenzial zur Kraftstoffeinsparung und Emissionsverringerung aufgrund seiner innovativen Hybridarchitektur.

Eine grundlegende Beschreibung des HELMS-Systems erfolgte auch bereits in der ETR 11/2020.

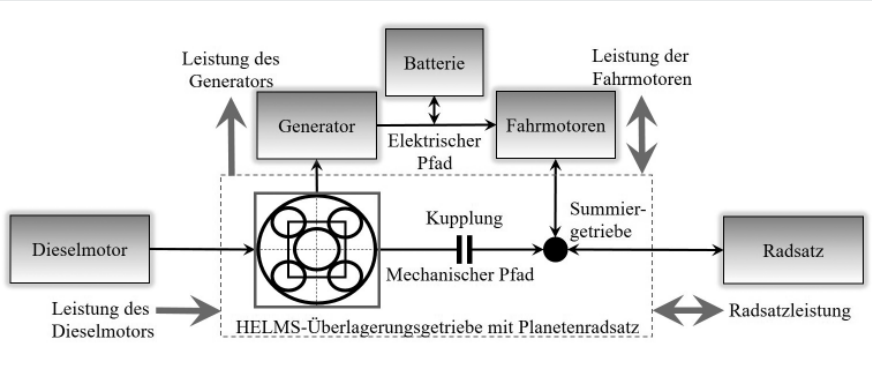
Das Innovationsprojekt HELMS ist ein Hybridisierungs- und Modernisierungskonzept des DB-Verbundes für die Rangierlokomotiven der Baureihe 294, das in Kooperation mit Toshiba, Henschel, BTU Cottbus-Senftenberg und mit Mitteln aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung im Land Brandenburg realisiert wurde.

## 2. Grundlegender Aufbau und Funktion des hybriden Antriebssystems

Der gesamte neuentwickelte Antriebsstrang einer HELMS-Lokomotive stellt eine Mischform der Hybridarchitekturen dar (Bild 1).

Als Hauptantrieb des elektromechanischen leistungsverzweigten HELMS-Antriebssystem wird weiterhin der Dieselmotor mit einer Leistung von 1000 kW verwendet. Der Planetenradsatz dient als Zwischenglied für die Kraftübertragung vom Dieselmotor zu den Radsätzen. Die Antriebsleistung des Dieselmotors wird im Planetenradsatz in Abhängigkeit von den Drehzahlverhältnissen seiner drei Wellen in einen mechanischen und einen elektrischen Leistungspfad geteilt. Der elektrische Antriebsstrang besteht aus einer Kopplung von elektrischen Energiewandlern (ein Generator und zwei Fahrmotoren) und einem elektrischen Lithium-Ionen-Energiespeicher (Traktionsbatterie). Der Dieselmotor und der Generator in Verbindung mit dem Planetenradsatz realisieren ein stufenloses elektrisches Getriebe. Durch Einstellen des Generatorlastpunktes werden die Drehzahlverhältnisse am Planetenradsatz beeinflusst. Dabei ist das Momentenverhältnis am Planetenradsatz

konstant und wird durch seine Übersetzung vorgegeben. Die vom Generator erzeugte elektrische Leistung wird entweder an den Energiespeicher abgegeben oder gleich zum elektrischen Antrieb mittels Fahrmotoren genutzt. Die beiden Leistungsstränge werden über ein Summiergetriebe wieder zusammengeführt. Hier werden die abgegebenen Leistungen beider Energiewandler, des Dieselmotors und der elektrischen Fahrmotoren, mechanisch mittels Momentenaddition überlagert. Das System arbeitet im Seriell-parallel-Betrieb. Die Antriebsstruktur ist zusätzlich mit einer Hybridkupplung ausgestattet, die die Abtrennung des Dieselmotors vom mechanischen Strang und somit einen reinen seriellen Betrieb ermöglicht. Die Leistung im elektrischen Strang kann je nach Bedarf und Betriebssituation bis zur Batterie in beide Richtungen fließen. Die Pfeile zeigen mögliche Leistungsflüsse an.




**1:** Struktur des HELMS-Antriebssystems mit Leistungsflüssen

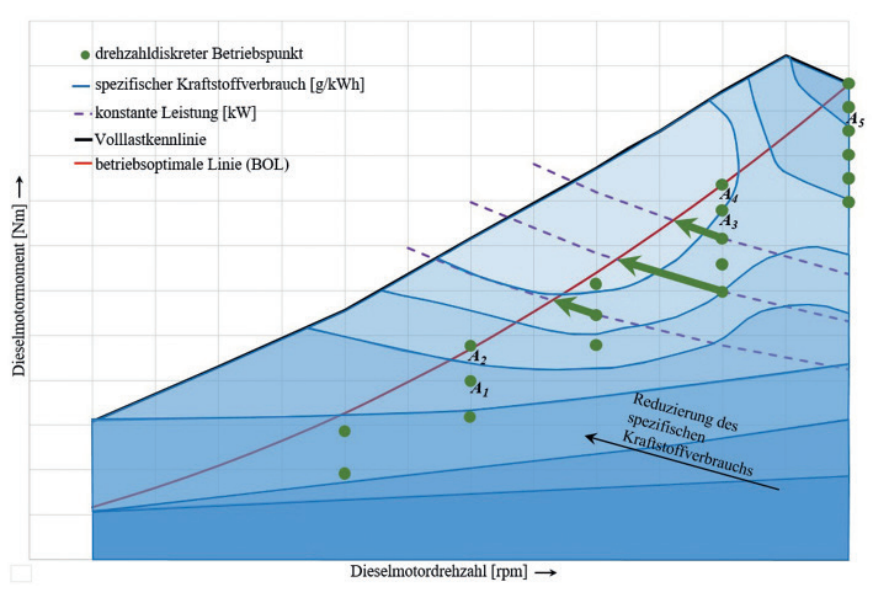
## 3. Vergleich der Betriebsmodi des HELMS-Antriebes

Durch die beschriebene Kombination von zwei unterschiedlichen Energiewandlern mit zwei Energiespeichern (Dieseltank und Traktionsbatterie) entstehen im HELMS-Antriebssystem zusätzliche Freiheitsgrade in der Energiebereitstellung, -übertragung und -speicherung, die den Einsatz einer intelligenten Betriebsstrategie erfordern. Sie soll in Abhängigkeit von vielen Einflussfaktoren ein optimales Zusammenwirken von allen Antriebssystemkomponenten definieren, um das maximal mögliche Kraftstoffeinsparpotenzial des Hybridkonzeptes auszuschöpfen. Dabei werden die Antriebsleistungen und Momente auf den Dieselmotor und den Elektroantrieb aufgeteilt, die Richtung und die Größe des Leistungsflusses zum Abtrieb oder zur Batterie bestimmt, sowie alle Bestandteile der Hybridstränge entsprechend gesteuert. Der Dieselmotor kann dabei in den zwei verschiedenen Modi „Drehzahldiskreter Modus“ oder „Drehzahlkontinuierlicher Modus“ betrieben werden.

In der umgesetzten Betriebsart „Drehzahldiskreter Modus“ wird die Aufteilung des angeforderten Antriebsmomentes auf beide Antriebsquellen abhängig vom Lokführerwunsch, Ladezustand der Batterie und der Lokgeschwindigkeit durch die Hybridsteuerung festgelegt. Dabei kann die Dieselmotordrehzahl nur bestimmte diskrete Werte annehmen. Diese diskreten Drehzahllastpunkte sind in Bild 2 schematisch mit den grünen Punkten gekennzeichnet.

In der Betriebsart „Drehzahlkontinuierlicher Modus“ werden für die Reduzierung der Kraftstoffverbrauchs- und Emissionswerte die Vorteile des hybriden Antriebsstranges und die Eigenschaft des Verbrauchskennfeldes des Dieselmotors ausgenutzt. Das stufenlose elektrische Getriebe ermöglicht eine Einstellung der Betriebspunkte (BP) des Dieselmotors bei wahlfreien Drehzahlen und dadurch mit einem höheren Wirkungsgrad. Der niedrigere spezifische Kraftstoffverbrauch wird typischerweise in den BP nahe der „idealen“ Verbrauchskennlinie erreicht (BOL). Daher bedeutet die Verschiebung eines Betriebspunktes in Richtung der BOL entlang der Leistungshyperbel eine bessere Effizienz des Dieselmotors. Für drei BP wurde das in Bild 2 mit grünen Pfeilen dargestellt.

Die Gesamtantriebsleistung bleibt somit für beide Betriebsmodi gleich. Unterschiedlich ist die Variation der Parameter Drehmoment und Drehzahl am Dieselmotor. Im drehzahldiskreten Modus führt eine Erhöhung bzw. Senkung der Antriebsleistungsanforderung zum Anstieg bzw. zur Verringerung des Dieselmotordrehmomentes unter Beibehaltung der konstanten Drehzahl. Kann die Leistung bei eingestellter Drehzahl nicht geliefert werden, wird eine andere diskrete Drehzahl eingestellt. Im drehzahlkontinuierlichen Betriebsmo-




**2:** Dieselmotorcharakteristik mit Verbrauchskennfeld und diskreten Drehzahlstufen

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

dus werden sowohl das Drehmoment als auch die Drehzahl kontinuierlich angepasst, um die geänderte Leistung bereitzustellen.

Der drehzahlkontinuierliche Modus kann demnach die Effizienzvorteile bringen. Nachteilig ist die komplexere Regelung. Ob diese Steuerungsstrategie maßgebend zur Kraftstoff- und Emissionsreduzierung beiträgt, kann mithilfe einer Simulation des Betriebsverhaltens untersucht werden. Dazu wurde die Gesamtstruktur des HELMS-Antriebssystems in Matlab/Simulink nachgebildet.

## 4. Simulation der beiden Betriebsmodi

Zur Verifizierung des Simulationsmodells wurden die Messdaten eines realen Fahrzyklus verwendet, der in einem Prüfstand vom DB Werk Cottbus mit einem Prototyp der HELMS-Lokomotive gefahren wurde (Bild 3).

Das Antriebssystem wurde im Referenzfahrzyklus im drehzahldiskreten Modus betrieben. Es wurden Beschleunigungs- und Bremsvorgänge sowie Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit nachgebildet. Die in der Prüfstandmessung erfassten Messwert-Zeit-Verläufe wurden als Eingangsgrößen für die Verifizierung des Modells verwendet. Die Simulationsergebnisse des drehzahldiskreten Betriebsmodus stimmen insgesamt gut mit den Prüfstandmessungen überein.

Im drehzahlkontinuierlichen Betriebsmodus wird der Dieselmotor in den verbrauchsoptimalen Betriebspunkten betrieben. Bei gleichem Fahrprofil der Lokomotive unterscheiden sich die Drehzahl und das Drehmoment des Dieselmotors im Vergleich zur drehzahldiskreten Betriebsweise. Die Verschiebung der Betriebspunkte des Dieselmotors im drehzahlkontinuierlichen Modus ist in den blau hervorgehobenen Zeitbereichen in Bild 3 auffallend. In den übrigen Streckenabschnitten des Fahrzyklus sind die Dieselmotorbetriebspunkte auch bei der drehzahldiskreten Betriebsweise schon optimal eingestellt.

Der Verbrauch liegt im drehzahlkontinuierlichen Betriebsmodus nur leicht unter dem Wert des drehzahldiskreten Betriebsmodus. Die Reduzierung des Verbrauches beträgt für den gesamten Fahrzyklus 0,62 %.

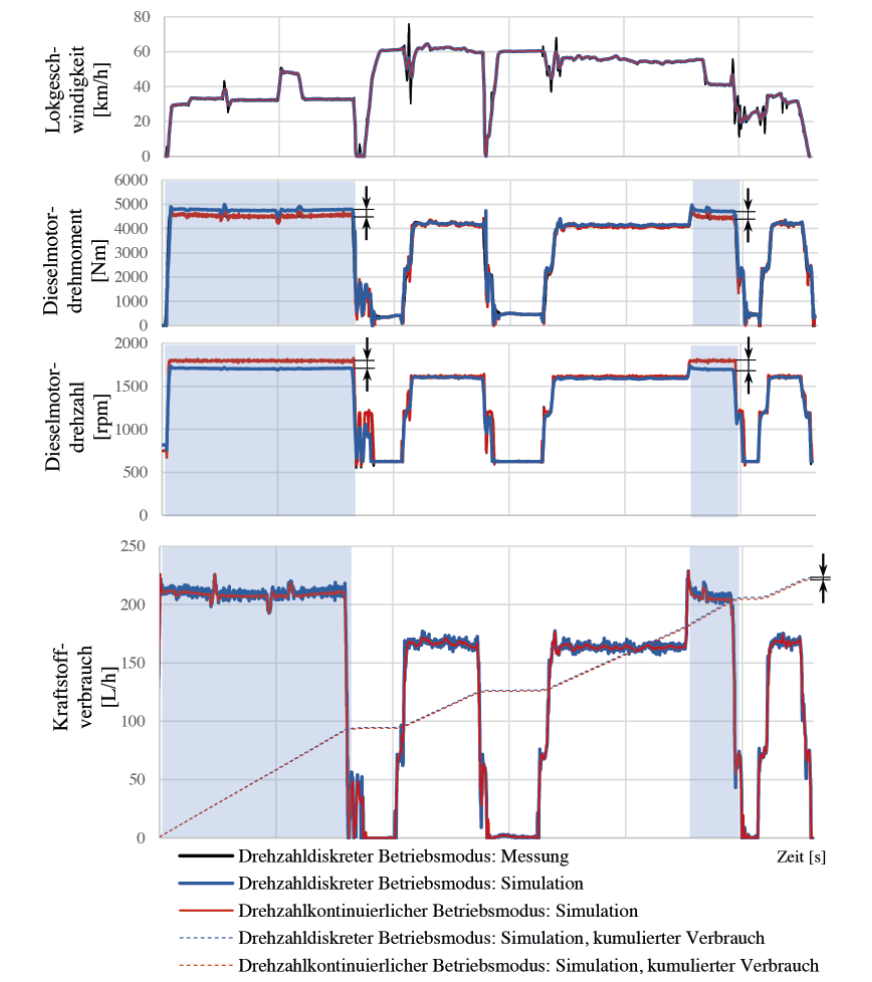
Die nur geringe Einsparung des Kraftstoffes im drehzahlkontinuierlichen Betriebsmodus erklärt sich dadurch, dass der Dieselmotor im Referenzfahrzyklus schon überwiegend in BP sehr nah oder auf der BOL betrieben wurde (BP $A_1 - A_5$, Bild 2).

Es wird auch deutlich, dass Verbrauchseinsparungen des drehzahlkontinuierlichen Betriebsmodus im Vergleich zum drehzahldiskreten Modus vom Fahrprofil abhängen. Je weiter ein BP im drehzahldiskreten Betriebsmodus von der BOL entfernt ist, desto mehr wirkt sich ein drehzahlkontinuierlicher Betrieb des Dieselmotors auf den Kraftstoffverbrauch aus.

Angemerkt werden muss an dieser Stelle, dass es sich bei den hier dargestellten Simulationsergebnissen um einen Vergleich zwischen zwei Modi des neuen HELMS-Antriebes handelt. Im Vergleich zur Altlok BR 294 werden mit der HELMS-Lokomotive deutlich höhere Kraftstoffeinsparungen von bis zu 20 % erreicht!

## 5. Zusammenfassung

Im drehzahlkontinuierlichen Betriebsmodus der HELMS-Rangierlokomotiven kann eine Verbrauchs- und Emissionsreduktion im Vergleich zum drehzahldiskreten Modus erzielt werden. Das erreichbare Kraftstoffeinsparpotenzial ist betriebspunktabhängig und kann somit für verschiedene Fahrstrecken variieren. Inzwischen sind beide Betriebsmodi im HELMS-Antriebssystem implementiert. In der noch laufenden Betriebsbewährungserprobungsphase werden weitere Erkenntnisse zum Kraftstoffverbrauch aus realen Fahrzyklen gesammelt.




**3:** Simulationsergebnisse der beiden Betriebsmodi im Referenzfahrzyklus

Summary

**Simulation and comparison of two operating modes of the drive system for HELMS locomotives**

The new serial-parallel-hybrid-driven system of HELMS-shunting locs (Hybrid-Electro-Mechanical-Shunter) is very flexible and therefore allows different operating strategies of the newly named locomotives BR 1094. Two basic operating modes of the hybrid drive are compared simulatively.

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