

Simulation kombinierter Hybridkonfiguration für Dieseltriebwagen

Untersuchung des Zusammenspiels von Bremsarbeitsrekuperation und Abgaswärmenutzung mittels 1-d-Systemsimulation

Die Steigerung der Energieeffizienz dieselmotorischer Antriebe und die damit einhergehende Reduktion von Kraftstoffverbrauch und Emissionen sind ein zentrales Anliegen aller Akteure der Bahnbranche. Es haben darum in den letzten Jahren verstärkt wissenschaftliche Untersuchungen stattgefunden, wie sich herkömmliche dieselhydraulische oder hydromechanische Antriebsstränge durch Hybridisierung hinsichtlich ihres Kraftstoffverbrauches weiter optimieren lassen.

MASSNAHMEN ZUR EFFIZIENZSTEIGERUNG

Ein Blick auf die Energiebilanz einer Zugfahrt offenbart schnell, dass insbesondere während der Bremsvorgänge und im Zuge der Leistungsabgabe des Dieselmotors jenseits des Leerlaufbetriebs größere Potenziale zur alternativen Nutzung von Energie erschlossen werden können.

Einerseits kann durch die Einführung von regenerativen Bremsen auf Dieseltriebwagen in Kombination mit der Einbindung eines Energiespeichers die während der Bremsungen verrichtete Arbeit auf dem Fahrzeug zwischengespeichert und anschließend erneut zur Beschleunigung genutzt werden. Dies ist die Grundidee, die zur Entwicklung von „klassischen“ Hybridfahrzeugen geführt hat.

Andererseits erscheint die Wiedergewinnung eines Teils der Abgasenergie des Dieselmotors als vielversprechender Ansatz, um dessen Effizienz weiter zu steigern. Immerhin wird die im Dieselmotorkraftstoff gebundene Energie gemäß einer ingenieurtechnischen Faustregel lediglich zu etwa einem Drittel in nutzbare mechanische Arbeit gewandelt, während je ein weiteres Drittel über das Kühlwasser bzw. den Abgasstrom abgeführt wird.

Um die Kraftstoffeinsparpotenziale, die sich durch Bremsarbeitsrekuperation und Abgasenergieerückgewinnung erschließen lassen, zu eruieren, wurde an der Professur für Technik spurgeführter Fahrzeuge (TU Dresden) mit Unterstützung von Voith Turbo ein komplexes Simulationsmodell für dieselhydraulische Triebwagen mit hybrider Antriebsausrüstung entwickelt [1]. Dieses gestattet sowohl die isolierte Betrachtung beider genannter Systeme als auch deren Kombination in einem Fahrzeug.

Das Simulationsmodell soll im Folgenden in seinen Grundzügen dargestellt und ausgewählte Ergebnisse von Simulationen realistischer Fahrspiele präsentiert werden.

FAHRZEUGMODELL

Die Modellierung erfolgte auf Basis der Simulationsumgebung LMS Imagine.Lab AMESim. Die von der Software bereitgestellten Modellbibliotheken enthalten Elemente aus verschiedenen physikalischen Domänen (Mechanik, Elektrik, Hydraulik, Thermodynamik u.a.), die vom Nutzer miteinander kombiniert und weiterentwickelt sowie um zusätzliche Eigenschaften ergänzt werden können. Es handelt sich um eine sogenannte 1-d-Systemsimulation, deren Modellierungstiefe in einer großen Bandbreite variiert werden kann. Sie entspricht den Erfordernissen der fahrdynamischen Simulation und der Abbildung der damit verbundenen Leistungs- und Energieflüsse weitgehend, da die Modelle auf einfache Art und Weise neu kombiniert und um weitere Teilmodelle erweitert oder ergänzt werden können.

Das entwickelte Fahrzeugmodell umfasst die mathematisch-physikalische Abbildung der Fahrwiderstandskräfte, des dieselhydraulischen Antriebsstranges und seiner Ansteuerung sowie eine überlagerte fahrdynamische Steuerung [1]. Letztere realisiert die Einhaltung von Geschwindigkeitsbegrenzungen, Haltestellen- und Haltezeitvorgaben sowie die Berücksichtigung des Fahrzeugauslaufes vor Geschwindigkeitsreduktionen und Fahrzeughalten („Energiesparendes Fahren“ – ESF). Bei der Integration des Fahrzeugauslaufes in die Fahrspiele orientiert sich der Algorithmus an den Fahrzeitvorgaben und vergleicht diese mit prognostizierten Fahrzeiten.



Dr.-Ing. Martin Kache
Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Technik spurgeführter Fahrzeuge, TU Dresden
martin.kache@tu-dresden.de



Dipl.-Ing. Uwe Steglich
Doktorand an der Professur für Technik spurgeführter Fahrzeuge der TU Dresden
uwe.steglich@tu-dresden.de

Diese werden für den hypothetischen Fall der Zugkraftabschaltung unter Berücksichtigung des aktuellen Geschwindigkeitsniveaus und der Analyse des Neigungsprofils der vorausliegenden Streckenabschnitte berechnet. Eine Optimierung der Fahrspiele findet nicht statt, da der rechnerische Aufwand aufgrund der vergleichsweise detaillierten Modellierung des Antriebsstranges sowie der Zusatzkomponenten zur Bremsarbeitsrekuperation und Abgaswärmenutzung zu einem unververtretbaren Anstieg der Simulationszeiten geführt hätte.

Die Fahrzeugmasse ist als Punktmasse modelliert, die mit der fahrdynamisch äquivalenten Masse (Berücksichtigung des fahrdynamischen Massenfaktors) parametrisiert wird. Dies ist nach Ansicht der Autoren durch die im Allgemeinen geringe Längsausdehnung von Dieseltriebwagen (LüK < 100 m) gerechtfertigt.

Sowohl der Dieselmotor als auch die hydrodynamische Leistungsübertragung wurden kennfeld- bzw. kennlinienbasiert modelliert und können mit vertretbarem Aufwand an verschiedene Motor- bzw. Getriebetypen angepasst werden.

Das Motormodell verfügt über einen Reg-

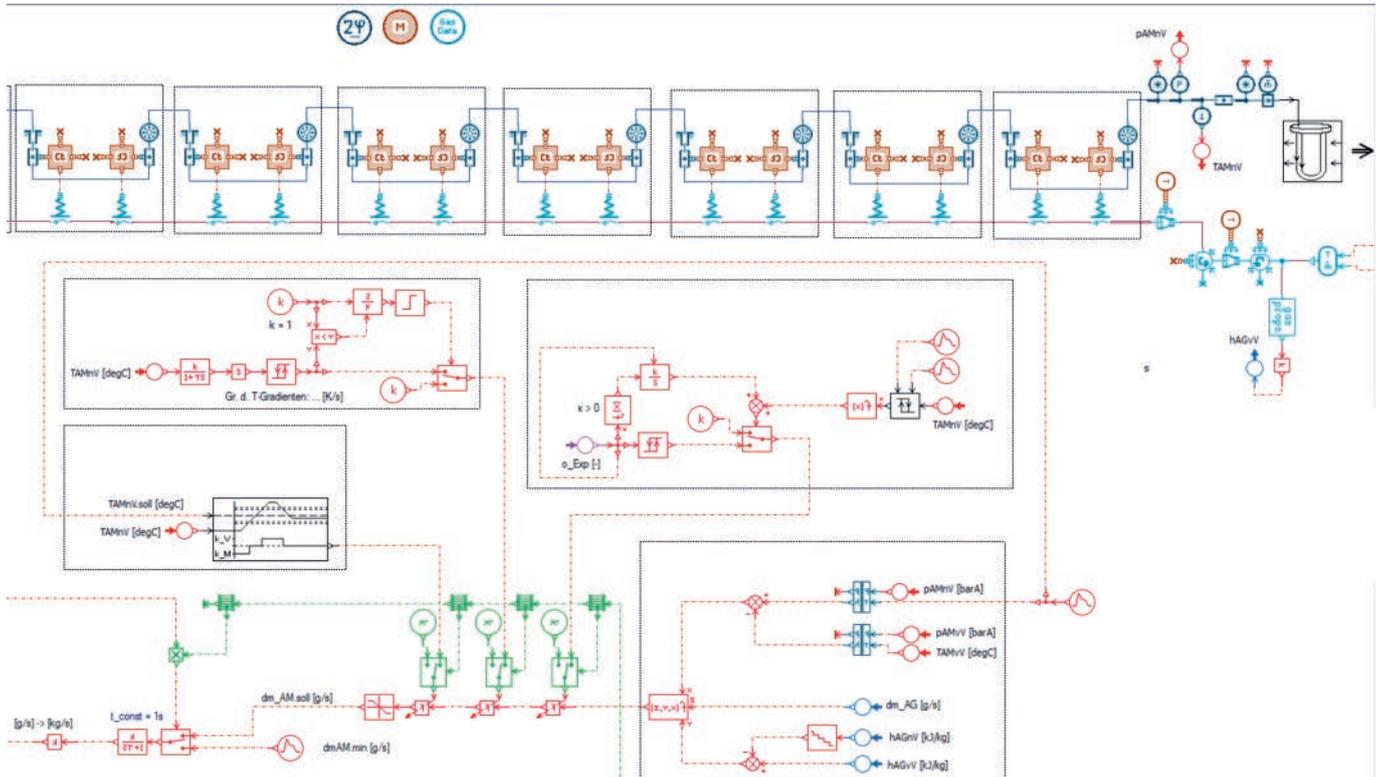


BILD 1: Modellierung des Abgaswärmenutzungssystems (Ausschnitt) in Imagine.Lab AMESim

ler, der die Drehzahlen von Minimal- und Maximaldrehzahl hin begrenzt und die Leerlaufdrehzahl auch bei einer zeitlichen Änderung der Hilfsbetriebeleistung stabilisiert.

Die Hilfsbetriebe selbst werden von einem einfachen Modell repräsentiert, das die Komplexe Kühlanlage, Luftpresser, Klimaanlage und Bordnetz umfasst, denen jeweils ein spezifisches Betriebsregime zugeordnet wird. Das so erzeugte Lastprofil ist synthetisch, da es mangels verfügbarer realer Betriebsdaten auf Annahmen beruht.

Das Motormodell wird durch einen Sollwertgeber aus der übergeordneten fahrdynamischen Steuerung angesteuert und liefert am Ausgang ein Drehmoment, das gemeinsam mit der Drehzahlinformation an den Eingang des Strömungsgetriebes übergeben wird. Das Drehmomentkennfeld des Dieselmotors wird dabei in diskreten Kennlinien (Drehmoment über Drehzahl) für verschiedene Teillaststufen hinterlegt, zwischen denen linear interpoliert wird, um eine stufenlose Einstellung der Dieselmotorleistung zu ermöglichen.

Drehmoment bzw. Leistung und Drehzahl dienen wiederum als Eingangsgrößen zum Auslesen für die Kennfelder des spezifischen Kraftstoffverbrauches, der Abgastemperatur und des Abgasmassenstromes, die ebenfalls im Modell des Dieselmotors hinterlegt sind.

Das Strömungsgetriebe enthält Teilm Modelle von hydrodynamischen Wandlern und Kupplungen, die durch die charakterisierenden Kennlinien (Leistungszahl bzw. Dreh-

momentwandlung über Drehzahlverhältnis von Turbinen- und Pumpenrad) beschrieben werden. Die Umschaltung zwischen den hydrodynamischen Kreisläufen erfolgt, wie bei realen Antriebsanlagen, anhand hysteresebefahter Umschaltunkte (Vorgabe als Geschwindigkeit oder Drehzahl möglich), die zudem von der Getriebeeingangsleistung abhängig sind.

Die Übertragungswirkungsgrade von Gelenkwellen und Radsatzgetriebe wurden als konstant angenommen und in einem Übertragungsglied zusammengefasst. Ferner wurde bei der Modellierung davon ausgegangen, dass der betrachtete Triebwagen über zwei identische Antriebsanlagen verfügt, die jeweils den gleichen Anteil an der Gesamtleistung generieren. Der modellierte Antrieb ist somit einfach auf Mehrmaschinenanlagen zu skalieren.

MODELLIERUNG DES ABGASWÄRMENUTZUNGSSYSTEMS

Das betrachtete Abgaswärmenutzungssystem basiert auf einem Clausius-Rankine-Zyklus und wird als geschlossenes System ausgeführt. Es besteht prinzipiell aus Verdampfer, Speisepumpe, Expansionsmaschine, Kondensator und Tank. Diese Elemente sind jeweils durch Verrohrungen miteinander verbunden und müssen zudem durch Steuerelemente (Ventile) ergänzt werden.

Das Grundprinzip des hier betrachteten

Abgaswärmenutzungssystems beruht darauf, dass ein großer Teil der thermischen Energie des Abgases im Verdampfer dazu genutzt wird, ein flüssiges Medium (hier: Wasser) zu verdampfen. Durch diesen Vorgang nimmt das spezifische Volumen des Mediums bei annähernd gleichbleibender Temperatur deutlich zu, sodass sich auf der Hochdruckseite des Systems ein Druck aufbaut. Der so erzeugte überhitzte Dampf verrichtet in der nachgeschalteten Expansionsmaschine mechanische Arbeit und erzeugt ein Drehmoment an deren mechanischer Schnittstelle. Der am arbeitsmittelseitigen Ausgang der Expansionsmaschine vorliegende Dampf wird in einem als Kondensator bezeichneten, nachgeschalteten Wärmeübertrager verflüssigt. Die im Expander gewandelte mechanische Energie wird bei dem hier betrachteten System erneut dem Antriebsstrang zugeführt und sorgt damit zeitweise für eine Erhöhung der Traktionsleistung. Das System arbeitet somit in diesem Fall als Booster, der dafür sorgt, dass die Höchstgeschwindigkeit schneller erreicht oder, im Falle langgezogener großer Steigungen, besser gehalten werden kann.

Die Modellierung und Berechnung eines solchen Systems ist aufgrund der im Betrieb auftretenden Phasenübergänge mathematisch-physikalisch sehr anspruchsvoll und bindet, bei entsprechend hohem Detaillierungsgrad, beträchtliche Rechenkapazität. Im Folgenden sollen die Herausforderungen, die sich im Zuge der Modellierung ergaben, beispielhaft anhand des Verdampfers umris-

		Fahrspiel			
		#1	#2	#3	#4
Haltestellenabstand	km	14,2	5,4	4,5	4,5
streckenseitig zulässige Höchstgeschwindigkeit	km/h	100	100	120	120
mittlere Längsneigung zwischen Haltestellen	‰	-0,4	-1,1	6,8	-6,8
maximale Längsneigung (auf ... Metern Streckenlänge)	‰	3,7 (77 m)	2,9 (1100 m)	8,4 (74 m)	-1,3 (310 m)
minimale Längsneigung (auf ... Metern Streckenlänge)	‰	-7,0 (300 m)	-5,7 (150 m)	1,3 (310 m)	-8,4 (74 m)
größte Höhendifferenz	m	7,4	5,9	31,1	31,1
Fahrzeitreserve	%	3	3	3	3

TABELLE 1: Charakterisierung der untersuchten Fahrspiele

sen werden. Bei diesem handelt es sich um einen Rohrbündel-Wärmeübertrager, der nach dem Kreuz-Gegenstrom-Prinzip arbeitet, wobei das Arbeitsmittel (hier: Wasser) die Rohre durchströmt, während das Abgas die Rohre umströmt. Der Wärmeübergang innerhalb dieser Komponente ist sehr komplex, da er u.a. von der Art und Form der Strömung, vom Temperaturniveau und dem Dampfmasseanteil abhängt. Da sich alle genannten Faktoren ortsabhängig innerhalb des Verdampfers ändern, wurde eine Diskretisierung der Strömungswege in einzelne Wärmeübertragungselemente vorgenommen, da dies den besten Kompromiss aus Genauigkeit und Handhabbarkeit darstellte. Der Wärmeübergang im Verdampfer wurde so mit 16 Wärmeübergangselementen dargestellt, die jeweils einen Teil des Strömungsweges des Wassers und des Abgases durch den Wärmeübertrager repräsentieren. Der Wärmeübergangskoeffizient im Verdampfer wird auf diese Weise sowohl auf Arbeitsmittel- als auch auf Abgasseite dynamisch den jeweiligen Randbedingungen angepasst. Die Berechnung des Wärmeübergangs erfolgte auf Basis der im VDI-Wärmeatlas [2] beschriebenen empirischen Lösungsansätze, die für die konkret betrachteten Wärmeübertragungselemente angepasst wurden. Beispielhaft ist hier die Gleichung nach Gnielinski [2] zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten einphasiger turbulenter Strömungen zu nennen.

Eine Berechnung des Druckabfalls aufgrund der vorhandenen Wandrauigkeiten wurde nicht vorgenommen, da dies den Berechnungsaufwand noch weiter erhöht hätte. Stattdessen konnte auf Prüfstandsmessungen von Voith Turbo zurückgegriffen werden, die einen Rückschluss auf pauschale Druckverlustkoeffizienten zwischen der Eingangs- und der Ausgangsseite des Verdampfers zuließen.

MODELLIERUNG HYDROSTATISCHER HYBRIDZWEIG

Um die Funktion der Bremsarbeitsrekupe- ration zu realisieren, wurde ein hydro-

statischer Hybridzweig modelliert, der je Fahrzeughälfte aus zwei Hydroaggregaten (Axialkolbenmaschinen in Schrägscheibenbauart) unterschiedlicher Baugröße, einem Kolbenspeicher mit Nachschaltflaschen (Arbeitsmedium: Stickstoff), einem Öl-Tank sowie hydraulischen Steuerungselementen und Filtern besteht. Der Nenn-Energieinhalt der Speicher beträgt für das gesamte Fahrzeug 2,3 kWh. Die Entscheidung für ein hydrostatisches System fiel zum einen, da es im Nutzfahrzeugbereich vielversprechende Ansätze zur Implementierung einer solchen Technologie gegeben hat [3, 4] und auch der PSA-Konzern hydrostatischen Hybridfahrzeugen aufgrund der substanziiell geringeren Produktionskosten realistische Marktchancen zuschreibt [5]. Andererseits bietet die hydrostatische Bremsarbeitsrekupe- ration die Möglichkeit, die Antriebskomponenten auf den betrachteten Fahrzeugen auf mechanische und hydraulische Komponenten zu beschränken und den Anteil der Elektrik zu begrenzen. Insbesondere die leistungselektronischen Baugruppen bei (diesel-)elektrischen Fahrzeugen unterliegen einer vergleichsweise raschen Obsoleszenz, sodass sich auf längere Sicht auch im Unterhalt Vorteile ergeben können, wenn auf die derartigen Baugruppen verzichtet werden kann.

Die Modellierung der hydraulischen Komponenten erfolgte im Falle der Hydroaggregate kennfeldbasiert, während das Übertragungsverhalten von Rohrleitungen und Ventilen mit Hilfe der aus der Strömungsmechanik bzw. Rohrleitungshydraulik bekannten Druckverlustgleichungen beschrieben wurde. Das Verhalten des Speichergases wurde mittels der Realgasgleichung nach Redlich-Kwong-Soave unter Berücksichtigung der von Rupperecht und Rothhäuser in [6] bzw. [7] veröffentlichten Erkenntnisse modelliert. Die genannte Zustandsgleichung ist in den entsprechenden Komponenten der AME-Sim-Bibliotheken bereits hinterlegt, was die besondere Eignung von Imagine.Lab AME-Sim zur Untersuchung derartiger Systeme unterstreicht. Ein Vergleich mit Prüfstandsmessungen von Voith Turbo offenbarte denn

auch, dass der Druckverlauf im Speicher (bei vorgegebenen Ölvolumenströmen) auf die beschriebene Weise mit hinreichender Genauigkeit abgebildet werden kann [8].

Die hinterlegte Betriebsstrategie des hybriden Antriebszweiges sieht eine Unterstützung des konventionellen Antriebsstranges bei Beschleunigungsvorgängen („Boost-Betrieb“) sowie Bremsungen mit konstanter Verzögerung vor, bei denen die Leistung der Hydroaggregate in Abhängigkeit der Fahrwiderstände kontinuierlich angepasst wird.

BEISPIELFAHRZEUG

Um das Zusammenwirken von hydrostatischer Bremsarbeitsrekupe- ration und Abgaswärmenutzung zu untersuchen, wurde ein zweiteiliges Beispielfahrzeug ausgewählt, das eine Masse von 100 t aufweist. Davon entfallen 94 t auf das zu 90% mit Fahrgästen besetzte Fahrzeug selbst und 6 t auf die zusätzliche Fahrzeugausrüstung. Die Masse für die hydrostatischen Energiespeicher und Wandler inklusive der erforderlichen Peripherie wurde mit 5 t veranschlagt, während die des Abgaswärmenutzungssystems mit 1 t angesetzt wurde.

Das Fahrzeug verfügt über zwei identische Antriebsanlagen, bestehend aus jeweils einem Dieselmotor mit einer Nennleistung von 382 kW und einem hydrodynamischen Getriebe der Bauart Voith T211re. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 120 km/h.

FAHRSPIELSIMULATION

Um das Systemverhalten zu studieren und dabei die Rechenzeiten zu begrenzen, wurden zunächst einzelne Fahrspiele simuliert. Vier ausgewählte Fahrspiele (siehe Tabelle 1) sollen im Rahmen dieses Beitrages beispielhaft näher betrachtet werden. Die diesen zugrunde liegenden Streckendaten repräsentieren reale Strecken aus dem nicht elektrifizierten Streckennetz der Bundesrepublik Deutschland und wurden freundlicherweise von DB Netz zur Verfügung gestellt.

Die Fahrspiele 1 und 2 beziehen sich auf Flachlandstrecken, während im Falle der Fahrspiele 3 und 4 ein entlang der Fahrtrichtung stetig ansteigender (#3) bzw. abfallender (#4) Streckenabschnitt vorliegt.

Die im folgenden Abschnitt dargestellten Ergebnisse wurden mit Hilfe einer mehrstufigen Simulation erzielt, bei der zunächst die Fahrt des konventionellen Fahrzeuges ohne Berücksichtigung der energiesparenden Fahrweise (Spitzfahrt) berechnet wurde, um die kürzeste Fahrzeit zu ermitteln. Anschließend wurde eine Fahrt unter Einbeziehung einer Fahrzeitreserve von 3% simuliert und der dabei ermittelte Kraftstoffverbrauch als Referenzwert (relativer Kraftstoffverbrauch = 100%) festgelegt. In einem letzten Schritt wurde mit den Fahrzeugmodellen gerechnet, die zusätzlich zur konventionellen Antriebsausrüstung über ein Abgaswärmenutzungssystem (AWN) oder eine Einrichtung zur hydrostatischen Bremsarbeitsrekuperation (HydRek) oder über eine Kombination dieser beiden Hybridzweige (AWN+HydRek) verfügten. Dadurch konnte der Einspareffekt der beiden Hybridisierungsansätze sowohl isoliert als auch kombiniert beurteilt werden.

SIMULATIONSERGEBNISSE

Bild 2 zeigt das prinzipielle Verhalten des Abgaswärmenutzungssystems am Beispiel des Fahrspiels 3. Nach Aufschaltung der maximalen Zugkraft erfolgt zunächst ein Anstieg der Abgastemperatur, dem die Arbeitsmitteltemperatur aufgrund des Wärmeübergangs mit zeitlichem Verzug folgt. Sobald die Arbeitsmitteltemperatur eine gewisse Zeitdauer hoch genug ist, dass Dampf erzeugt werden kann, ist die Abgabe mechanischer Leistung über den Expander möglich. Die relative Expanderleistung steigt mit einem entsprechenden Zeitverzug an und unterstützt den Beschleunigungsvorgang bis zum Abschalten der Zugkraft. Eine konstante Leistungsabgabe stellt sich aufgrund des komplizierten instationären Wärmeübergangs im Verdampfer nicht ein. Nach Abschaltung der Zugkraft (Dieselmotorleerlauf) sinkt die Abgastemperatur deutlich ab, ebenso wie die Arbeitsmitteltemperatur. Damit steht nicht mehr genug Energie zur Dampferzeugung zur Verfügung und die Expanderleistung fällt auf den Wert Null ab. Am Ende des Fahrspiels arbeitet der Dieselmotor erneut im Teillastbetrieb, weil es während

des Bremsens zu einer Drehzahlanhebung kommt, da ein erhöhter Kühlleistungsbedarf aufgrund der Nutzung des hydrodynamischen Retarders besteht. Dieser hinsichtlich des Kraftstoffverbrauches eher negative Effekt begünstigt die Arbeit des Abgaswärmenutzungssystems, da das Arbeitsmittel vor dem erneuten Anfahrvorgang wieder etwas „vorgewärmt“ wird (siehe Bild 2).

Einen Vergleich der verschiedenen simulierten Hybridkonfigurationen (siehe vorheriger Abschnitt) für dasselbe Fahrspiel (#3) bietet Bild 3. Auffallend ist dabei zum einen das stark differierende zeitliche Verhalten von Abgaswärmenutzungssystem und hydrostatischer Bremsarbeitsrekuperation. Während ersteres aufgrund des Verdampfungsprozesses nur mit einiger zeitlicher Verzögerung Arbeit verrichten kann, erfolgt eine Unterstützung des Beschleunigungsvorganges durch den hydrostatischen Hybridzweig unmittelbar vom Beginn des Anfahrprozesses an. Der Beschleunigungsvorgang ist deshalb unter Nutzung der Energie im Druckspeicher wesentlich schneller abgeschlossen. Dadurch wird der Anteil des Fahrzeugauslaufes am Fahrspiel erhöht und damit gleichzeitig die Zeitdauer, während »

**JETZT
NEU!**



HANDBUCH

Schienenfahrzeuge

Das Bindeglied zwischen theoretischem Wissen und der Praxis.

Speziell für Fachleute aus der Industrie und Studierende

Theorie- und Praxiswissen für Ihren Erfolg

- Grundlagen der Schienenfahrzeugtechnik
- Überblick über gängige Fahrzeugkonzepte
- zukünftige Herausforderungen und Entwicklungstendenzen

Jetzt bestellen für nur **EUR 99,-** (inkl. MwSt, zzgl. Versand)

Telefon: 040-23714-440, E-Mail: buch@dvvmedia.com
oder in unserem Buchshop unter www.eurailpress.de/schienenfahrzeuge

Erscheinungstermin: 28.11.2014 | Technische Daten: ISBN 978-3-7771-0427-0 • Format 165 x 240 mm

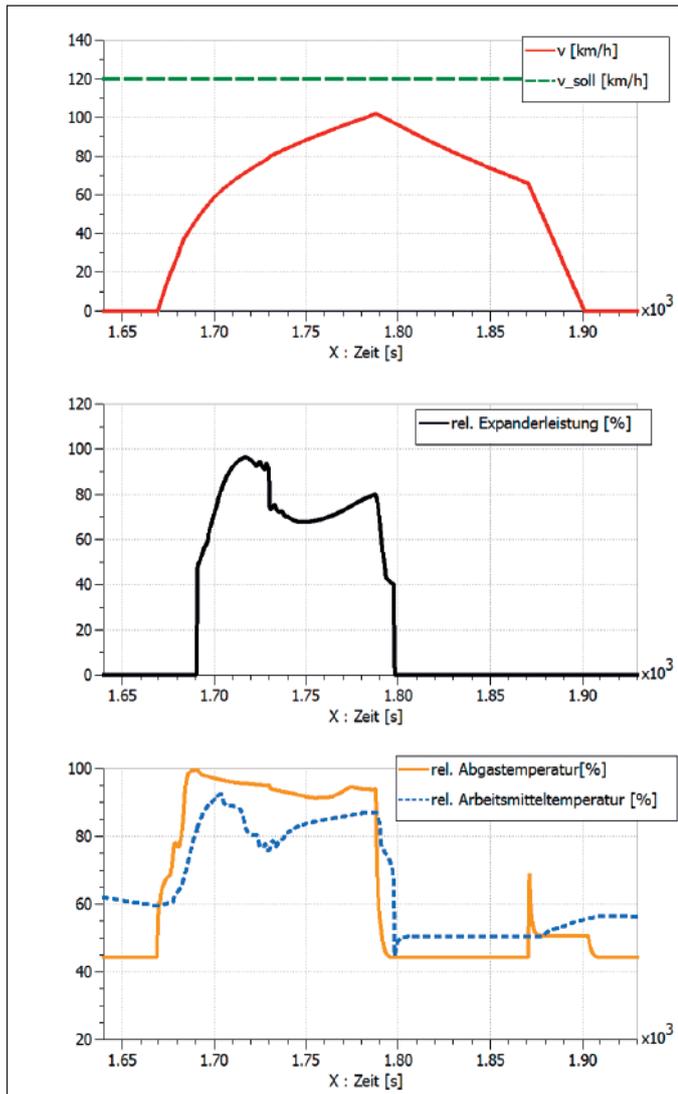


BILD 2: Fahrspiel 3 - Verhalten des Abgaswärmenutzungssystems

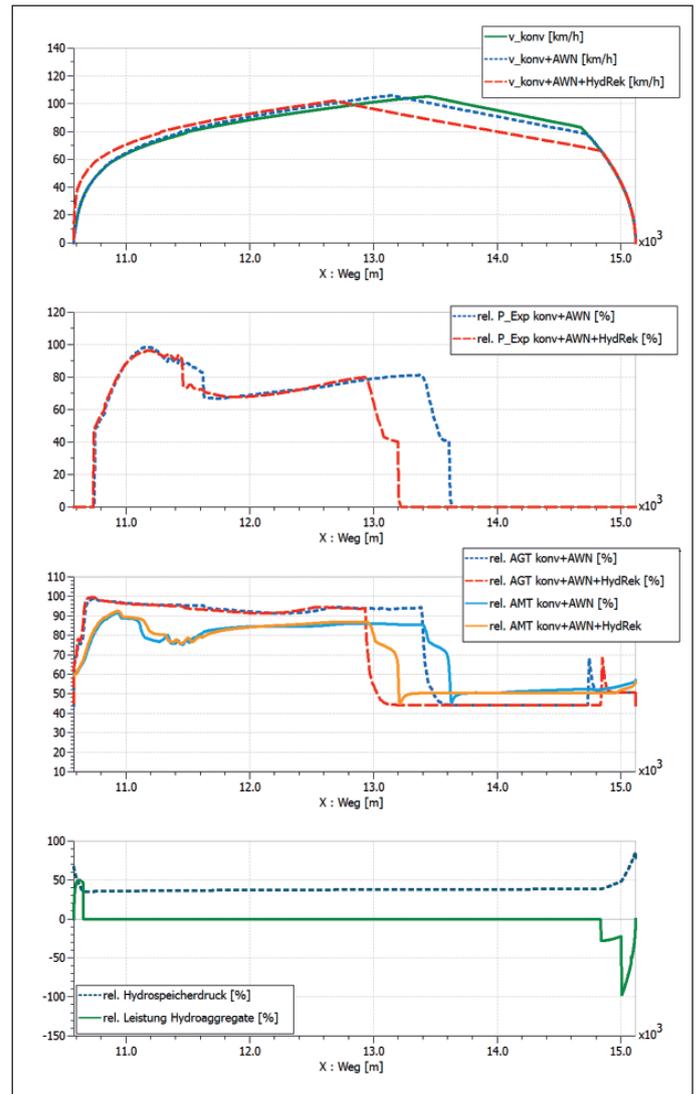
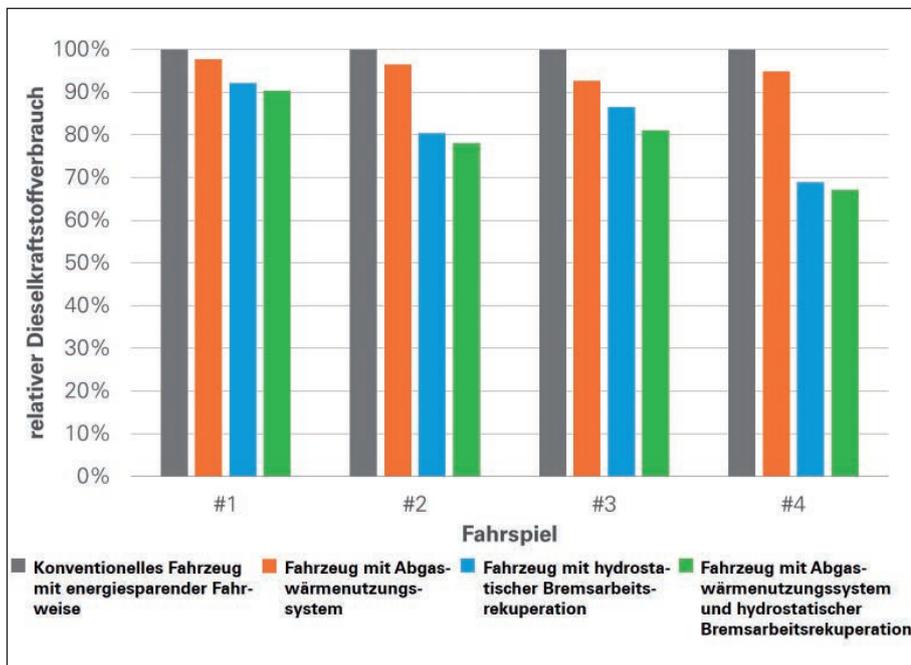


BILD 3: Fahrspiel 3 – Vergleich verschiedener Hybridkonfigurationen

BILD 4: Simulierte Kraftstoffverbräuche für die in Tabelle 1 definierten Fahrspiele und unterschiedliche Hybridkonfigurationen



der sich die Abgastemperatur des Dieselmotors in einem nutzbaren Bereich bewegt, deutlich reduziert. Die vom Expander insgesamt verrichtete Arbeit wird entsprechend verringert. Die Nutzung der durch den hydrostatischen Antriebszweig bereitgestellten Energie reduziert also tendenziell den durch die Abgaswärmenutzung zu erzielenden Boost-Effekt. Es ist deshalb nicht ohne weiteres möglich, die Einspareffekte beider Hybridzweige im Falle ihrer kombinierten Nutzung zu addieren, wie Bild 4 zeigt. Dort sind die für alle vier definierten Fahrspiele ermittelten Energieeinsparungen in Abhängigkeit der Hybridkonfigurationen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der zu erwartende Einspareffekt durch Bremsarbeitsrekuperation deutlich über den durch die Abgaswärmenutzung allein erzielten Werten liegt.

Es zeigt sich zudem, dass der Haltestellenabstand (bei Fahrspiel #1 am größten, bei den Fahrspielen #3 und 4 am kleinsten) generell einen Einfluss auf das Kraftstoffeinsparpotenzial durch Hybridisierung hat und

auch das Längsneigungsprofil (Fahrspiel #3: Steigung vs. Fahrspiel #4: Gefälle; gleicher Haltestellenabstand) eine entscheidende Rolle spielt.

AUSBLICK

In diesem Beitrag wurde das Verhalten des Abgaswärmenutzungssystems sowie des hydrostatischen Hybridantriebes für ausgewählte Fahrspiele dargestellt und diskutiert. Es hat sich gezeigt, dass die konkreten fahrdynamischen Randbedingungen in den Fahrspielen (Haltestellenabstand, Längsneigungs- und Soll-Geschwindigkeitsprofil) die erzielbaren Einspareffekte beeinflussen, da insbesondere das Lastprofil des Dieselmotors für die Wirksamkeit des Abgaswärmenutzungssystems entscheidend ist. Ferner wurde deutlich, dass kurze Haltestellenabstände und das Auftreten von Gefällestrrecken den Einspareffekt durch hydrostatische Bremsarbeitsrekupe- ration verstärken. In einem nächsten Schritt soll die Simulation auf ganze Strecken bzw. Umläufe ausgeweitet werden. Darüber wird

zu gegebener Zeit an anderer Stelle zu berichten sein. ◀

Literatur

- [1] Kache, Martin und Steglich, Uwe: „Fahrdynamische Untersuchungen an dieselhydraulischen Triebwagen mittels 1D-Systemsimulation“, in: ZEVrail, Bd. 135, Heft 6-7, 2011, S. 258–264
- [2] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [3] Kliffken, Markus G.: Hydrostatisch Regeneratives Bremsystem. Vortrag auf dem 6. Braunschweiger Symposium »Hybridfahrzeuge und Energiemanagement«, Februar 2009
- [4] Thiebes, Phillip; Geimer, Marcus: Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. In: O+P Zeitschrift für Fluidtechnik 51 (2007), Nr. 11-12, S. 630–635

- [5] Funk, Petra: „Druckluft-Hybrid von Peugeot und Citroën geht 2016 in Serie“, <http://www.ingenieur.de/Branchen/Fahrzeugbau/Druckluft-Hybrid-Peugeot-Citroen-geht-2016-in-Serie>, Abruf: 06.11.2014 um 14:13 Uhr
- [6] Rupprecht, Karl-Rudolf: HYDROSPEICHER – Experimentelle und analytische Untersuchungen zur Energiespeicherung, RWTH Aachen, Dissertation, 1988
- [7] Rotthäuser, Siegfried: Verfahren zur Berechnung und Untersuchung hydropneumatischer Speicher, RWTH Aachen, Dissertation, 1993
- [8] Kache, Martin: Modellierung, Simulation und Bewertung parallel-hybrider Antriebskonfigurationen für dieselhydraulische Triebwagen im Nah- und Regionalverkehr, TU Dresden, Dissertation, 2013, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-149909>

► SUMMARY

Simulation of combined hybrid configurations for diesel multiple units: examination of interplay between recuperation of braking work and use of exhaust gas heat using a 1-d system simulation

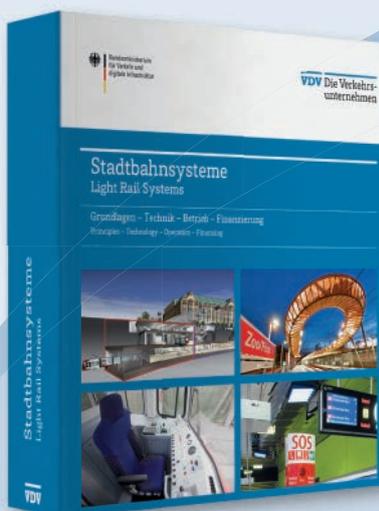
As the hybridisation of transmission blocks of diesel-hydraulic multiple units advances, it becomes feasible to combine various approaches to improving energy efficiency. The authors describe a simulation model which emulates the use of heat from exhaust gas through a closed steam-circuit process. The authors elucidate selected examples of driving cycles to show the interplay between the two hybrid lines operating both singly and in combination and also the impact of different hybrid configurations on fuel consumption compared with a conventional transmission.

Stadtbahn Kompakt

Direkt einzusetzendes Fachwissen zum Verkehrssystem „Stadtbahn“

Grundlagen | Technik | Betrieb | Finanzierung

**JETZT
NEU!**



Stadtbahnsysteme / Light Rail Systems

- Stadtbahnfahrzeuge
- Stadtbahnbau
- Stadtbahnhaltestellen
- Störfallmanagement
- rechtliche Grundlagen
- aktuelle Themen der Fahrweggestaltung
- Bahnenergieversorgung
- Personaleinsatz & Personalausbildung
- Finanzierung

Erscheinungstermin: 15.9.2014

Preis: EUR 149,- inkl. MwSt, zzgl. Versandkosten

Umfang: 992 Seiten, Hardcover | 2-sprachig Deutsch – Englisch

Jetzt bestellen: Telefon: 040-23714-440, E-Mail: buch@dvvmedia.com oder in unserem Buchshop unter www.eurailpress.de/stadtbahn