

## Entwicklungsmethode für elektrische und hybride Antriebssysteme

Verbrennungsmotoren werden nach wie vor am häufigsten für den Antrieb von mobilen Arbeitsmaschinen eingesetzt. Elektrische Antriebseinheiten gewinnen aber wegen ihres hohen Wirkungsgrads, ihrer Rekuperationsmöglichkeit und des möglichen Betriebs mit regenerativen Energien immer mehr an Bedeutung. Aus Kundensicht hinderlich wirkt sich jedoch die Begrenzung des Arbeitseinsatzes durch den mitführbaren Energievorrat aus. Durch das Einbinden einer zweiten Energiequelle kann der mögliche Energieumsatz auf einer mobilen Arbeitsmaschine jedoch maßgeblich gesteigert werden. Am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen des Karlsruher Instituts für Technologie wird hierfür die modellbasierte Entwicklung von elektrisch hybriden Antriebssystemen und deren Betriebsstrategien für mobile Arbeitsmaschinen unter Anwendung erweiterter XiL-Methoden erforscht.



## MOTIVATION

Im Bereich der Antriebssysteme von mobilen Arbeitsmaschinen ist der Markt primär geprägt von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, insbesondere mit einem Dieselmotor. Der Grund dafür sind die vergleichsweise günstigen Komponenten, die Anwendung bekannter Auslegungsmethoden, die sichere Beherrschung der Technologie und der triviale Steuerungsaufwand. Mit steigenden Umweltauflagen und strengeren Emissionsbeschränkungen werden zunehmende Anforderungen definiert, die nur durch Verwendung elektrischer Antriebstechnologien abgedeckt werden können. Die Reduktion der Lärmemissionen, die einhergehende Steigerung des Fahr- und Arbeitskomforts, die Erhöhung der Arbeitsproduktivität

sowie die systembedingten geringeren mechanischen Belastungen durch die reduzierten Schwingungen des Antriebsmotors sind oft vernachlässigte Vorteile elektrischer Antriebssysteme, die den heutigen Kostenaufwand rechtfertigen. Die Auslegung von Komponenten, die Verwendung repräsentativer Lastzyklen sowie die Integration geeigneter Bauteile in bestehende Fahrzeugarchitekturen stellen erhöhte Anforderungen an den Konstruktionsprozess bis hin zur Validierung. Gerade im Hinblick auf die Nachvollziehbarkeit und Nachweisbarkeit im gesamten Entwicklungsprozess werden umfangreiche Methoden notwendig, um elektrische Antriebssysteme mit spezifischen Hardware- und Softwareentwicklungsumgebungen ganzheitlich zu realisieren.

## AUTOREN



**Dipl.-Ing. Christian Pohlandt** war akademischer Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in Karlsruhe.



**Lars Brinkschulte, M. Sc.** ist akademischer Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in Karlsruhe.



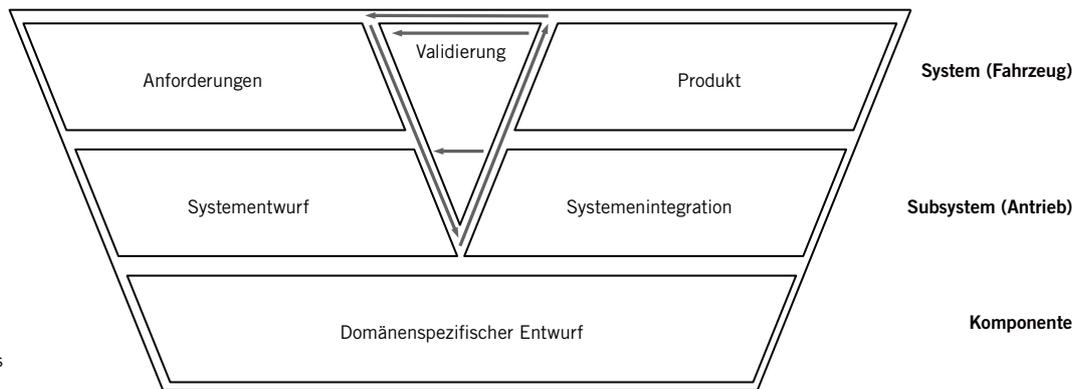
**Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer** ist Institutsleiter des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Karlsruhe.

Die Entwicklungsmethode nach dem V-Modell [1] bietet hier einen ersten richtungsweisenden Entwicklungsansatz aus dem Pkw-Bereich, der sich mit gezielten Modifikationen auch auf mobile Arbeitsmaschinen übertragen lässt. Neben der Fahrfunktion müssen diverse Arbeitsfunktionen bei mobilen Arbeitsmaschinen berücksichtigt werden, die mit Anbaugeräten zu teilweise weitverzweigten komplexen Antriebsstrangtopologien führen. Die einzelnen Anbaugeräte verfügen dabei oft über eine eigene Steuerungssoftware (ECU). Zur optimalen Kopplung der jeweiligen Softwaremodule kommt daher der Betriebsstrategie ein besonderer Stellenwert zu. Hier ist beispielsweise die Energierückgewinnung im Sinn einer Rekuperation zu nennen, die im Fahrtrieb sehr von der Streckentopologie und von der Verwendung des Fahrzeugs abhängig ist, wohingegen gerade die Arbeitsfunktionen einer mobilen Arbeitsmaschine einen oft bedeutend höheren Rekuperationsanteil aufweisen.

Ein weiterer Aspekt sind die Investitionen in Traktionsbatterien mit ausreichender Kapazität, um das Einsatzspektrum einer mobilen Arbeitsmaschine abdecken zu können. Mangelnde Kenntnis über das Einsatzspektrum und die Unkenntnis über das Anwendungsverhalten dieser Technologie führen zu einer geringen Kundenakzeptanz. Abhilfe schafft hier ein Range-Extender-Konzept, bei dem die elektrische Antriebsstrangtopologie mit einem zusätzlichen Verbrennungsmotor kleiner Leistung ausgestattet wird, der den zur Verfügung stehenden Energieinhalt durch die Möglichkeit des Ladens der Batterie steigert. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der modellbasierten Entwicklung von elektrisch hybriden Antriebssystemen und deren Betriebsstrategien für mobile Arbeitsmaschinen unter Anwendung erweiterter XiL-Methoden.

## MODELLBASIERTE ENTWICKLUNG

Beteiligte Bereiche in jedem Entwicklungsprozess sind die Hardware-, Software- und Systementwicklung sowie Applikation, Verifikation und die finale Validierung des entwickelten Produkts. Der Entwicklungsprozess stellt sich dabei als iterativer Vorgang auf Systemebene heraus. Im konventionellen Entwicklungsprozess werden die einzelnen Teilsysteme getrennt voneinander



**BILD 1** Der Entwicklungsprozess nach VDI 2206 [1] (© KIT)

der entwickelt und unter definierten Schnittstellenvorgaben in das Gesamtsystem integriert. Das Vorgehen richtet sich häufig nach dem V-Modell, **BILD 1**, wo einzelne Entwicklungsstände klaren Spezifikations- und Testphasen zugeordnet werden.

Die Entwicklung teilt sich dabei in fünf große Bereiche auf. Zu Beginn stehen die Anforderungen, die an ein Produkt gestellt werden. Für die jeweiligen Anforderungen werden Teillösungen entworfen, anschließend entwickelt und danach in das Gesamtsystem integriert. Den Abschluss und die Eigenschaftensicherung schließt den Prozess bei Erfolg mit einem Produkt ab.

Eine Erweiterung des Vorgehens stellt die modellbasierte Entwicklung im frü-

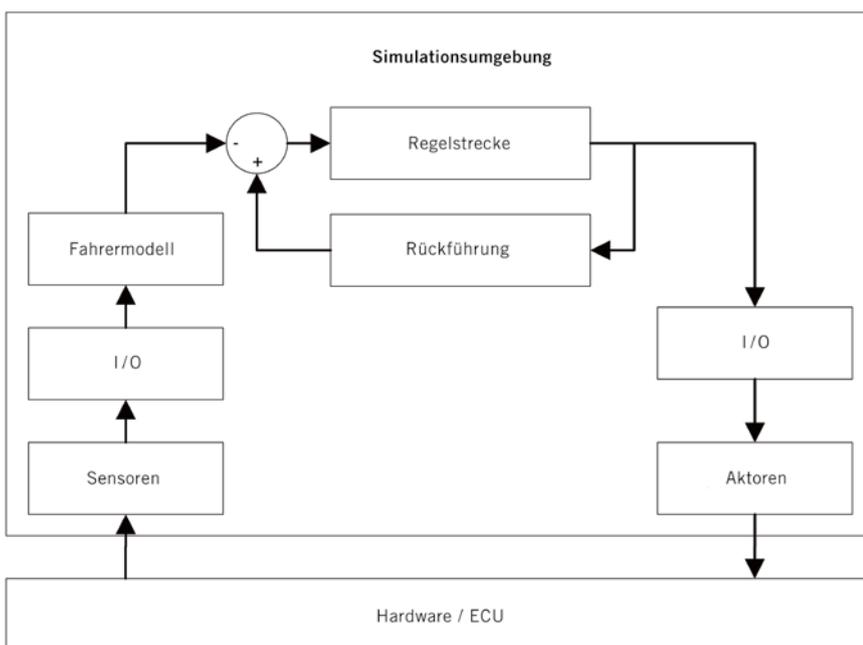
hen Stadium des Entwicklungsprozesses dar. Hier findet die physikalische Systementwicklung basierend auf virtuellen Modellen ihren Platz. Dabei werden mathematische Modelle herangezogen, um das logische und physikalische Verhalten des Systems zu beschreiben. Ziel ist es, Aussagen über das System zu treffen, bevor die eigentliche Hardware zur Verfügung steht. Die modellbasierte Entwicklung ermöglicht dabei eine vereinfachte Modellvariation und -integration bei neuen Funktionalitäten des Produkts. Die frühzeitige Validierung und nachfolgende Anpassung der virtuellen Modelle kann dabei als Methode eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses in der Produktentwicklung angesehen werden.

Zur Entwicklung von Steuerungen und Betriebsstrategien von Systemen werden für die Algorithmenentwicklung Modelle mit definierten Schnittstellen benötigt, die das Steuerungsmodul abbilden. Das Fahrzeugmodell beschreibt das physikalische Verhalten des Fahrzeugs. Somit lässt sich das gesamte System ganzheitlich unter systemischen Aspekten frühzeitig analysieren und das Verhalten sowie die Interaktionen beschreiben.

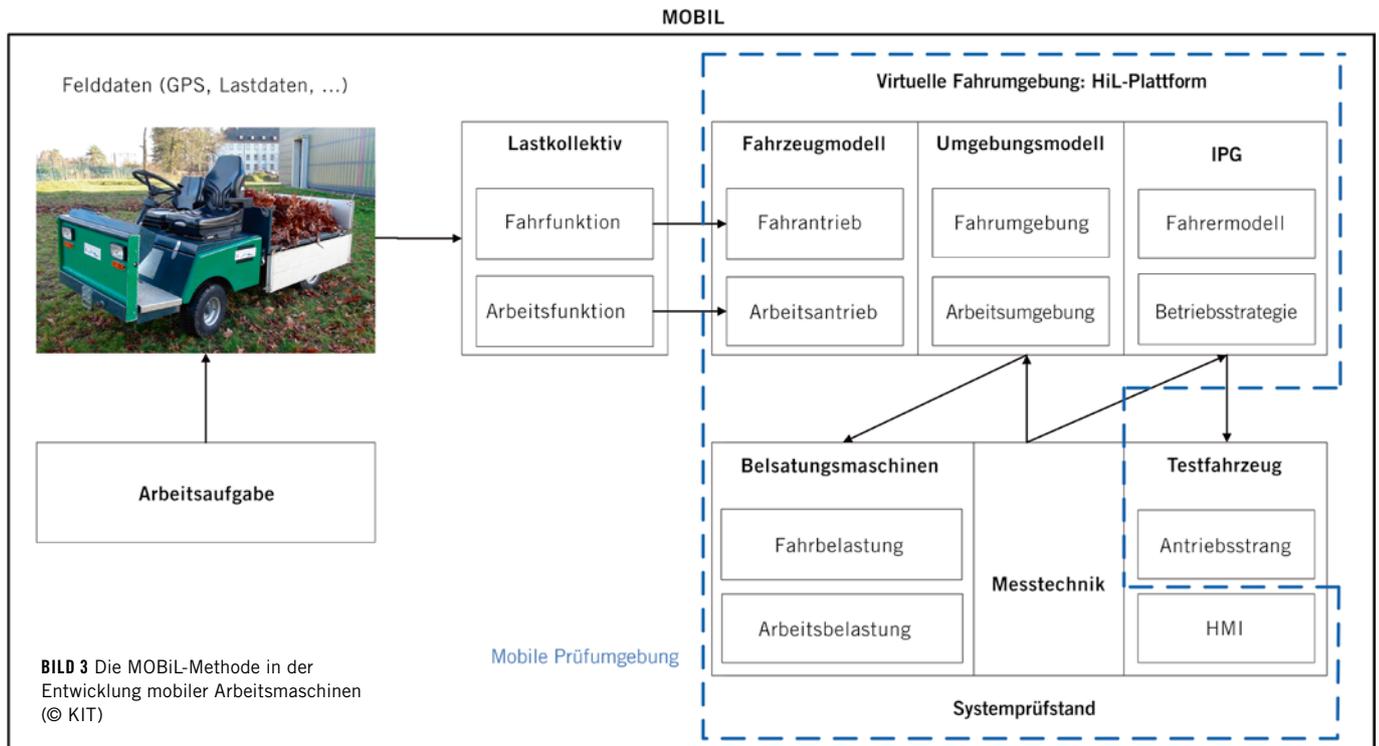
Während Pkw-Hersteller bereits in der Erprobung und Prozessintegration virtuelle Test- und Simulationsumgebungen einsetzen, steht diese Methode bei Herstellern mobiler Arbeitsmaschinen noch am Anfang. Gerade aufgrund der hohen Variantenvielfalt der Fahrzeuge bietet die Kombination aus realem Versuchsträger und virtueller Fahrsimulation enorme Vorteile. Aufgrund vernetzter Regelstrukturen in elektrischen und hybriden Antriebssträngen nimmt die Fahrzeugkomplexität hier immer weiter zu. Mithilfe der modellbasierten Entwicklung kommt es hier zu einem durchgängigen, zielorientierten, zeit effektiven und qualitativ hochwertigem Entwicklungsprozess, der eine Erprobung und Anpassung adaptiver Regelfunktionen zulässt.

## ÜBERTRAGUNG DES XIL-ANSATZES AUF MOBILE ARBEITSMASCHINEN

Die Auslegung des elektrischen oder elektrisch-hybriden Antriebssystems und die Implementierung einer zielführenden Betriebsstrategie erfolgen mittels der modellbasierten Entwicklungsmethode. Dieser methodische Simulationsansatz ist unter anderem für die Entwicklung von elektrischen/elektronischen Komponenten geeignet, lässt sich aber zu einer



**BILD 2** Schematische Darstellung einer Xil-Umgebung (© KIT)



ganzheitlich systemischen Entwicklungsmethode auf Gesamtfahrzeugebene erweitern. Das Auslegungsziel einer energieeffizienten Antriebstechnologie und einer effektiven Betriebsstrategie, die den Arbeitsprozess optimal unterstützt, bleiben dabei bestehen. Um einzelne Komponenten und Subsysteme in unterschiedlichen Entwicklungsstadien im Entwicklungsprozess des V-Modells berücksichtigen zu können und frühzeitig Aussagen über deren Eignung zu treffen, wird der verifizierte Systementwurf, also das Simulationsmodell der Zielhardware, mittels dem X-in-the-Loop-Ansatz (XiL) validiert, **BILD 2**.

Der Begriff XiL stammt ursprünglich aus der Automobilindustrie. Durch die virtuelle Integration einzelner Komponenten in eine virtuelle Gesamtfahrzeugsimulation lassen sich Erkenntnisse zum Systemverhalten und relevanter Wirkzusammenhänge ermitteln noch bevor alle notwendigen Hardwarekomponenten vorhanden sind. Je nach Verfügbarkeit kommen hier Simulationsmodelle und Steuergerätesoftware oder reale Fahrzeugkomponenten und Steuergeräte auf Prüfständen zum Einsatz. Zusätzlich zum Simulator und der zu testenden Hardware sind physikalische Schnittstellen (I/O) notwendig. Diese ermöglichen

eine Kommunikation und einen Datenaustausch zwischen der Gesamtfahrzeugsimulation und der zu integrierenden Komponente.

Die Grenze von XiL liegt in der korrekten Modellierung der physikalischen Zusammenhänge. Eine exakte Nachbildung des physikalischen Verhaltens ist nur bedingt sinnvoll und lässt sich aus Sicht des Steuergeräts durch ein plausibles Verhalten begrenzen. Sind jedoch aufwendigere Modelle notwendig, so kann die Echtzeitfähigkeit des Simulationsmodells verletzt werden. Nach der Systemtheorie ist ein System dann echtzeitfähig, wenn die Systemantwort innerhalb einer definierten Zeitspanne vorliegt.

Da die XiL-Methodik für Anwendungen in der Automobilindustrie ausgelegt ist, muss diese auf mobile Arbeitsmaschinen erweitert werden. Aus diesen Überlegungen heraus ist die sogenannte MOBiL-Methode entstanden, **BILD 3**. Grundlage für dieses Vorgehen ist ein dynamisches Simulationsmodell des Antriebssystems, das sich durch geeignete Schnittstellendefinitionen und spezifische Erweiterungen in eine offene Integrations- und Testplattform, zum Beispiel IPG-TruckMaker, integrieren lässt. Die auf C-Code basierende virtuelle

Plattform wird dabei auf die speziellen Anforderungen mobiler Arbeitsmaschinen – Arbeitsantriebe, Streckentopologien, veränderte Rad-Bodenkontakte und Materialinteraktionen – erweitert und angepasst. Hierzu werden komplette Modellbibliotheken mit einzelnen Komponenten bereitgestellt, um den Anforderungen gerecht zu werden.

Unter Berücksichtigung der Modellkomplexität lässt sich das Fahrzeugverhalten in Echtzeit simulieren, um Aussagen über die Leistungsflüsse und deren Abhängigkeiten von einer Betriebsstrategie zu untersuchen. Dabei werden einzelne Simulationsmodelle sukzessive durch reale Bauteile und Steuergeräte am Prüfstand ersetzt. Da standardisierte Lastzyklen für einen Fahrzeugtyp nur in sehr speziellen Anwendungsfällen vorhanden sind, häufig aber Felddaten aus Kundeneinsatzszenarien vorliegen, erfolgt die Validierung der Betriebsstrategien durch manöverbasierte virtuelle Testfahrten, analog zu aufwendigen und kostenintensiven Feldversuchen.

Mobile Arbeitsmaschinen erfahren selbst bei gleichem Fahrzeugtyp je nach Anwendungsfall unterschiedlichste Lasten und Leistungsabnahmen. Daher ist neben der Vorgabe von definierten Lastzyklen auch die Vorgabe einer Arbeits-



BILD 4 Fahrereingriffsmöglichkeiten zur Durchführung virtueller Prüfmanöver (© KIT)

aufgabe notwendig. Da die Herangehensweise zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe vom Fahrer bestimmt wird, kann die Ansteuerung des Fahrzeugs sowohl durch einen automatisierten Fahrer – Erfüllung der Arbeitsaufgabe auf optimalem Weg – als auch durch den manuellen Fahrereingriff erfolgen. Hierzu ist ein entsprechender Fahrereingriff mittels externen Bedienelementen umgesetzt.

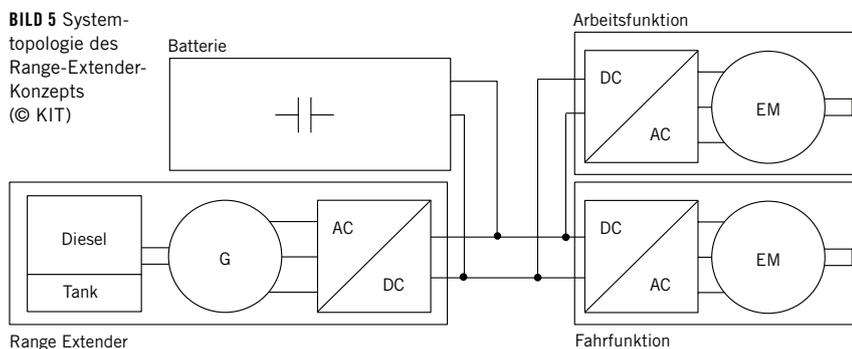
**PRÜFUMGEBUNG**

Zur Umsetzung der Methode bedarf es neben der Simulationsumgebung ebenso einer Prüfumgebung [2]. Kernkomponenten der MOBIL-Prüfumgebung sind drei Asynchronmotoren mit je 130 kW Nennleistung, die variabel auf zwei Prüfbetten von je 20 m<sup>2</sup> positioniert werden können. Gepeist werden diese Maschinen durch drei wassergekühlte Mehrachs-frequenzumrichter, die an einem gemeinsamen

Gleichspannungszwischenkreis mit einer rückspeisefähigen Energieversorgungseinheit angeschlossen sind. Durch diese Prüfstandstopologie ist eine energieeffiziente Zirkulation der Leistung unter den einzelnen Motoren möglich.

Über die virtuelle Fahrumgebung IPG-TruckMaker wird die grundlegende Simulationsstruktur (Fahrzeug, Umgebung und Fahrer) mit definierten Schnittstellen bereitgestellt. So dient die Fahrpedalvorgabe durch den Fahrer als Drehzahlbeziehungsweise Drehmomentvorgabe für den Prüfling. Die Lasten, die durch den Prüfstand auf das Fahrzeug aufgebracht werden, stammen aus der Simulation. Um das Fahrzeug beziehungsweise die Fahrzeugkomponenten vollständig in die Methode zu integrieren, wird das gemessene Drehzahl-signal an den Abtrieben als Eingangsdaten in die Simulation zurückgegeben. Zur Einflussanalyse des Bedieners kann durch ein geeignetes

BILD 5 Systemtopologie des Range-Extender-Konzepts (© KIT)



Human-Machine-Interface (HMI), BILD 4, der Fahrer aus der Simulation entkoppelt und als direktes Steuerungsglied des Fahrzeugs in die Umgebung integriert werden.

**SYSTEMTOPOLOGIE RANGE EXTENDER**

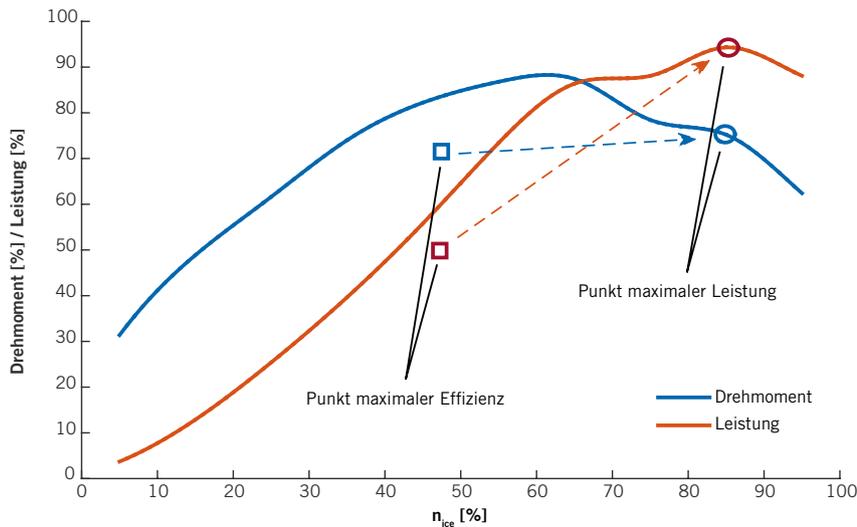
Laut Definition gehört die Range-Extender-Topologie zur Gruppe der seriellen Hybridantriebsstränge – der Antrieb des Fahrzeugs erfolgt immer und ausschließlich über den elektrischen Fahrmotor. Eine mögliche Systemtopologie ist in BILD 5 dargestellt. Der Range Extender besteht aus einer Verbrennungskraftmaschine, die einen elektrischen Generator mit zugehöriger Leistungselektronik antreibt. Die bereitgestellte elektrische Energie kann in der Batterie des Fahrzeugs gespeichert oder in einem der Elektromotoren zum Antrieb genutzt werden. Es besteht keine mechanische Kopplung zwischen dem Range-Extender-Modul und den Antrieben, lediglich eine elektrische Kabelverbindung über die Leistungselektronik zur Batterie. Der Verbrennungsmotor kann daher unabhängig vom aktuellen Fahr- und Arbeitszustand in seinem optimalen Betriebspunkt betrieben werden.

Die Abgrenzung zum seriellen Hybrid ist in der im Fahrzeug installierten Leistung der Verbrennungskraftmaschine zu treffen. Während ein serieller Hybrid über eine kleine Batterie und einen zur Ausgangsleistung bezogenen leistungsstarken Verbrennungsmotor verfügt, so reduziert sich die Einsatzhäufigkeit und das Leistungsangebot des Verbrennungsmotors beim Range Extender deutlich. Dieser Zusammenhang lässt sich nach [3] durch den Hybridisierungsgrad HG beschreiben:

$$HG = \frac{P_{EL,max}}{P_{ice,max} + P_{EL,max}}$$

Hierbei ist  $P_{ice,max}$  die Leistung des Verbrennungsmotors und  $P_{EL,max}$  die Leistung der elektrischen Maschine.

Eine klare Grenze zwischen einem seriellen Hybrid und einem Range Extender existiert nicht. Während in der Automobilindustrie Antriebsstrangtopologien mit Hybridisierungsgraden von über 80 % als Range Extender eingeordnet werden, so kann der Hybridisierungsgrad von mobilen Arbeitsmaschinen durch die hohe installierte Antriebsleistung – Fahr- und



**BILD 6** Implementierte Betriebsstrategie des Range-Extender-Moduls mit hervorgehobenen Betriebsmodi (© KIT)

Arbeitsantrieb – bedeutend höher liegen. Eine Abstimmung der zu installierenden Leistung der Verbrennungskraftmaschine erfolgt mit Hinsicht auf den jeweiligen Anwendungsfall der Maschine.

## BETRIEBSSTRATEGIE

Für einen Range Extender sind verschiedene Betriebsmodi zu berücksichtigen:

- Zero Emission: Durch eine umgebungsbedingte Randbedingung (Indoor-Hallenbetrieb, geräuschreduzierter Bereich) kommt es zur Forderung des rein elektrischen Antreibens des Fahrzeugs.
- Best-Punkt-Betrieb: Zur Steigerung der Kraftstoffeffizienz des Range-Extender-Moduls werden die Betriebspunkte des Verbrennungsmotors in den Punkt minimalen Kraftstoffverbrauchs verschoben, **BILD 6**.
- Maximal-Leistungs-Betrieb: Zur Steigerung der Leistungsabgabe des Range-Extender-Moduls werden die Betriebspunkte des Verbrennungsmotors in den Punkt maximaler Leistung verschoben, **BILD 6**.
- Rekuperation von kinetischer und potenzieller Energie aus dem Fahr- und Arbeitsantrieb: Durch einen bidirektionalen Leistungsfluss im elektrischen Antriebssystem kann überschüssige Energie in Form von passiven Lasten, zum Beispiel beim Abbremsen des Fahr- oder Arbeitsantriebs, in der Batterie gespeichert werden. Es ist allerdings auch möglich

die Energie direkt zu regenerieren, indem diese direkt einem anderen Verbraucher zur Verfügung gestellt wird. So lässt sich beispielsweise die aus einer Verzögerung der Fahrgeschwindigkeit gewonnene Energie direkt einer Arbeitsfunktion bereitstellen.

- Notbetrieb mit reduzierter Leistung: Um eine Tiefentladung und damit eine Schädigung der Batterie zu verhindern, wird bei niedrigem Ladezustand der Batterie die maximal abzuführende Leistung aus dem Antriebssystem begrenzt.

Die Umsetzung der Betriebsmodi erfolgt mittels einer heuristischen Betriebsstrategie. Dabei wird der Leistungsanteil des Range-Extender-Moduls am Verbraucheranteil in Abhängigkeit zum Ladezustand des Batteriemoduls SoC, zur abgeforderten maximalen Leistung  $P_{tot}$  und den äußerlichen Randbedingungen (Zero Emission) gesetzt:

<b>Gl. 2</b>	$u(t) = f(\text{SoC}, P_{tot}, \text{Zero Emission})$
--------------	---

Es werden je nach Ladezustand vier Betriebsbereiche definiert, in denen unterschiedliche Leistungsflüsse im elektrischen Antriebssystem vorherrschen:

- Lademodus des Range Extenders:  $u = 1^*$
- Notbetrieb des Range Extenders:  $u = 1$
- Bestbetrieb des Range Extenders:  $0 < u < 1$
- batterieelektrischer Betrieb:  $u = 0$ .

Im Lademodus des Range Extenders wird bei stehenden Abtrieben die Batterie des Fahrzeugs bis hin zu einem Schwellwert geladen. Im Notbetrieb wird die Leistung primär vom Verbrennungsmotor aufgebracht und über den Generator dem Fahr- und Arbeitsantrieb zur Verfügung gestellt. So kann das Fahrzeug auch bei sehr niedrigem Ladezustand weiterhin eingesetzt werden. Zur Vermeidung einer Tiefentladung der Batterie wird die mögliche Leistungsabnahme durch den Fahr- und Arbeitsantrieb auf einen Maximalwert, der unter der zur Verfügung gestellten Leistung der Verbrennungskraftmaschine liegt, reduziert. Die Verbrennungskraftmaschine läuft in diesem Modus im Punkt maximaler Leistung. Im Bestbetrieb des Range Extenders wird durch den Verbrennungsmotor sowohl die Batterie geladen als auch die Antriebe versorgt. Dieser Modus tritt nur sehr selten auf, da die abgeforderte Leistung unter der Leistung des Verbrennungsmotors im Bestbetriebspunkt liegen muss. Im batterieelektrischen Betrieb wird nur die zur Verfügung stehende Energie der Batterie genutzt. Das Range-Extender-Modul ist ausgeschaltet. Überlagert werden können mit Ausnahme des Range-Extender-Lademodus alle Betriebsbereiche durch eine entsprechende Rekuperation.

Für die Regelung der Leistung des Verbrennungsmotors werden verschiedene Statusmeldungen nacheinander abgefragt. Dazu dienen folgende markanten Eingangsdaten für die Betriebsstrategie:

- Ladevorgang: Laden
- Zero Emission: elektrisches Fahren
- Ladezustand der Batterie: SoC
- abgeforderte Gesamtleistung:  $P_{tot}$
- Drehzahl der Verbrennungskraftmaschine:  $n_{ice}$ .

**BILD 7** zeigt die jeweiligen Zustandsgrößen für die Erfüllung der Schaltlogik. Der rekursive Durchlauf der Zustandsabfragen für die Betriebsstrategie ist in **BILD 8** aufgezeigt. Zu Beginn, das heißt beim Starten des Fahrzeugs, wird der Zustand des Ladevorgangs Laden abgefragt. Ist dieser Zustand gesetzt, so erfolgt im Anschluss eine Abfrage des Ladezustands der Batterie SoC. Solange der maximale Schwellwert nicht überschritten ist, wird nach Freigabe des Verbrennungsmodus Zero Emission die Verbrennungskraftmaschine in den aktiven Status gesetzt. Übersteigt die aktuell vorliegende abgeforderte Gesamt-

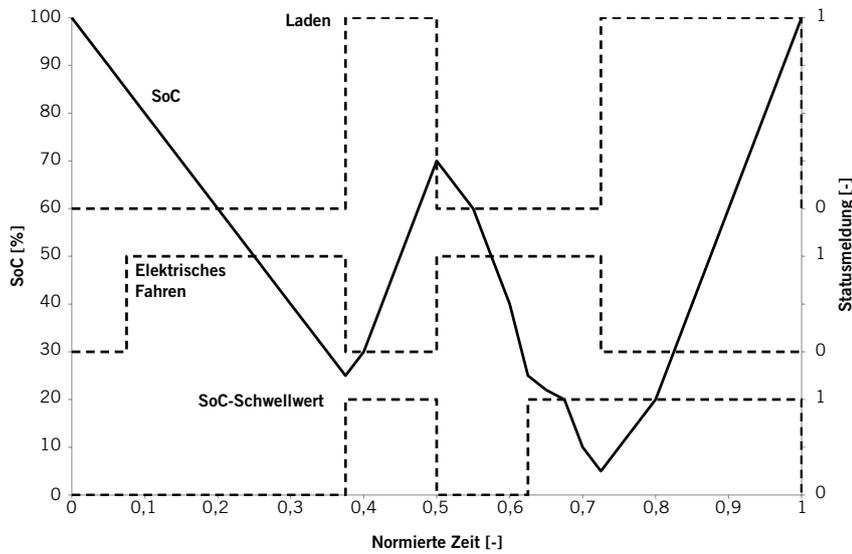


BILD 7 Verlauf der Zustandsgrößen zur Erfüllung der Schaltbedingungen der Betriebsstrategie (© KIT)

leistung  $P_{tot}$  die Leistung der Verbrennungskraftmaschine im betriebsoptimalen Modus, so wird die Drehzahl der Verbrennungskraftmaschine in den Bereich maximaler Leistung angehoben. Bei Erreichen des maximalen Ladezustands der Batterie oder dem Aktivieren der rein elektrischen Fahrfunktion wird der Verbrennungskraftmotor ausgeschaltet. Dieser Zustand hält sich so lange, bis alle Zustandsbedingungen der Betriebsstrategie für einen erneuten Ladevorgang erfüllt sind. Dieser Ablauf wird iterativ in einem geforderten Zeitintervall  $t_{Zyklus} = 0$  bis 10 s wiederholt. Diese

Betriebsstrategie gilt es im Folgenden an einem Versuchsfahrzeug zu erproben und zu validieren.

SYSTEMAPPLIKATIONEN

Ein beispielhafter Anwendungsfall der MOBIL-Methode ist ein elektrisches Kommunalfahrzeug, das zur Reichweitenverlängerung um ein Range-Extender-Modul erweitert werden soll. Als typische Einsatzfälle eines derartigen Fahrzeugs sind Grünflächen- und Parkpflege, Transport von Sach- und Schüttgut sowie der Kehrbeseneinsatz zu nennen. Für

eine ausreichende Datenbasis wurden einsatzspezifische Lastdaten durch umfangreiche Feldversuche aufgenommen und ausgewertet. Zu den Felddaten gehören neben den Leistungseinflüssen der Fahr- und Arbeitsfunktion ebenso die Aufnahme von GPS-Koordinaten, das Ableiten von Fahrgeschwindigkeiten und die zu verrichtende Arbeitsaufgabe. Im Anschluss wurde das Fahrzeug durch eine mechanische Kopplung der Abtriebswellen mit den Prüfstandsmotoren in die Prüfumgebung integriert. Nach erfolgter mechanischer Integration wurde mithilfe der Methode kleinster Fehlerquadrate durch einen mathematischen Vergleich der Ergebnisse aus der Simulation und dem Fahrversuch das mathematische Modell des Fahrzeugs in der virtuellen Fahrumgebung parametrisiert und damit ebenso integriert. Nach erfolgreicher Umsetzung der MOBIL-Prüfumgebung ist jetzt das Durchführen von beliebig gestalteten Prüfscenarien basierend auf unterschiedlichen Arbeitsaufgaben in der Prüfumgebung möglich, BILD 9.

ERGEBNISSE

BILD 9 rechts zeigt einen typischen Anwendungsfall für den Betrieb des Fahrzeugs. Der Fahrzyklus repräsentiert einen Kehrbeseneinsatz auf einem Betriebsgelände. Neben dem Reinigen von Außenflächen ist hier ebenso das Reinigen einer Betriebshalle Teil der Arbeitsaufgabe. Die Laderegulation des Fahrzeugs, die Größe des Energiespeichers und die Leistung der Verbrennungskraftmaschine sind auf den Einsatzfall des Fahrzeugs abgestimmt. BILD 10 zeigt die Zusammenhänge und das Zusammenwirken der beschriebenen unterschiedlichen Ladebedingungen für den Range Extender.

Durch die Durchführungen und Auswertung von weiteren Prüfzyklen anhand der Definition von Arbeitsaufgaben und Lastdaten aus Feldmessungen – sowohl im Versuch als auch in der Simulation – wurden für das vorgestellte Antriebskonzept verschiedene Speichergrößen und Ladelevelaus der Batterien hin zu einem schädigungsarmen Verhalten der Batterie untersucht. Anhand einer statistischen Auswertung der gesammelten Messdaten wurde der für den mittleren Einsatzfall optimierte Hybridisierungsgrad des Fahrzeugs bestimmt. Dieser hat sich als bedeutend

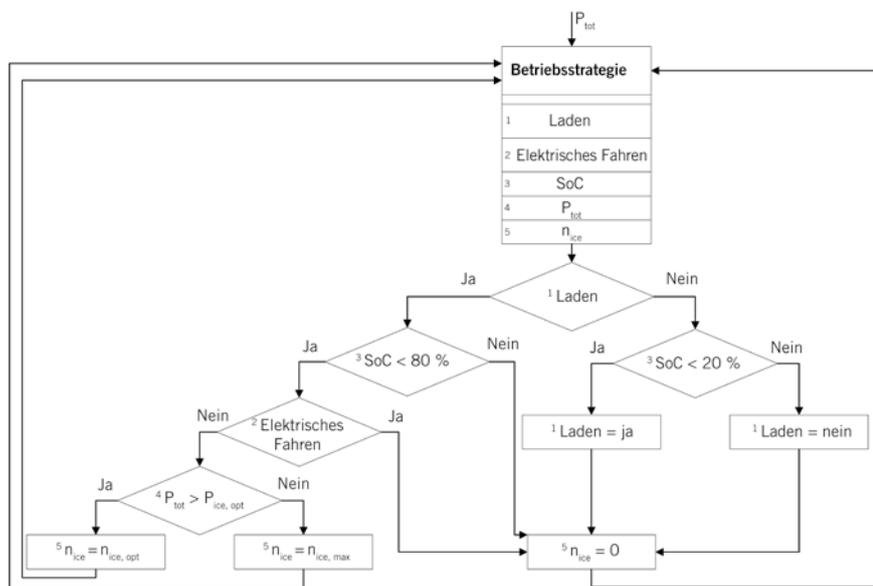
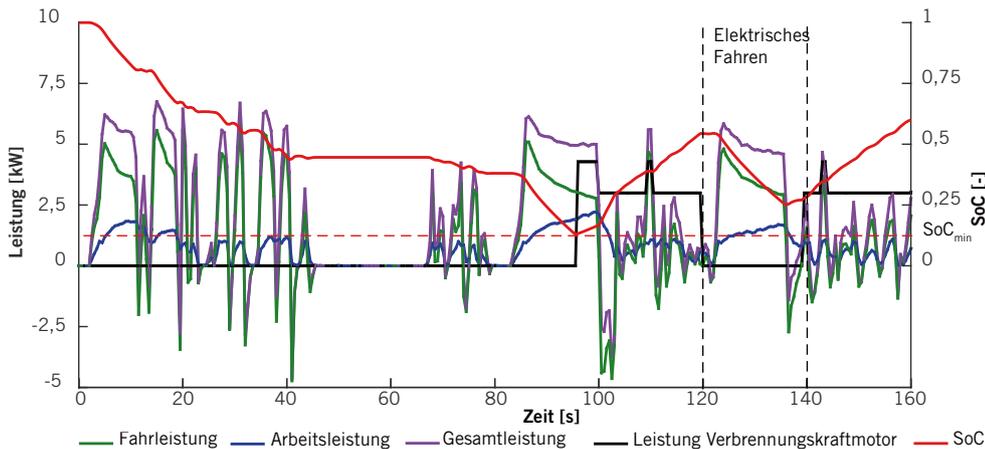


BILD 8 Rekursives Ablaufdiagramm der Zustandsabfragen für die Betriebsstrategie (© KIT)



**BILD 9** Durchführung einer Arbeitsaufgabe und Umsetzung mittels MOBiL-Methode auf dem Prüfstand (© KIT)



**BILD 10** Leistungsflüsse von Batteriepack und Range-Extender-Modul bezogen auf den SoC bei Durchführung eines Fahrversuchs (© KIT)

höher erwiesen, als die in der Pkw-Branche typischen Hybridisierungsgrade. Grund dafür sind die über den zeitlichen Verlauf stark variierenden Leistungsschwankungen der Arbeitsantriebe beim Verrichten einer Arbeitsaufgabe.

## ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Durch die entwickelte MOBiL-Methode können schon frühzeitig im Entwicklungsprozess erste Aussagen zur Funktionalität von Komponenten in mobilen Arbeitsmaschinen und deren Wechselwirkungen untereinander getroffen werden. Neben dem Einsatz von standardisierten Lastzyklen ist es möglich, einfach und effektiv den realen Verwendungszweck anhand von Feldmessungen in die Prüfumgebung zu überführen.

Damit lassen sich sowohl Antriebsstrangtopologien als auch Betriebsstrategien auf die jeweiligen Fahrzeuganwendung auslegen und optimieren, ohne aufwendige und kostenintensive Feldversuche durchführen zu müssen. Die logische Folge ist eine Reduktion der iterativen Entwicklungszyklen und damit eine Reduktion der gesamten Entwicklungszeit und vor allem der Entwicklungskosten. Zudem können komplexe Regelsysteme bei beliebigen Testszenarien untersucht, optimiert und validiert werden.

Als nächster Schritt ist die Übertragung der MOBiL-Methode auf andere Antriebsstrangtopologien vorgesehen. Auf Basis der gesammelten Erkenntnisse kann anschließend ein individueller Systemvergleich in Abhängigkeit des Anwendungsspektrums erfolgen.

## LITERATURHINWEISE

- [1] VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. 2004
- [2] Pohlandt, C.; Haag, S.; et al.: Dynamischer Prüfstand für elektrische Antriebssysteme. In: ATZoffhighway (2014), Ausgabe August, S. 70-79
- [3] Hoffmann, P.: Hybridfahrzeuge: Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft. Wien: Springer, 2014

## DANKE

Teile des Projekts sind im Rahmen eines Kooperationsprojekts entstanden. Dieses wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung.



## READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:  
[www.emag.springerprofessional.de/at-z-offhighway-worldwide](http://www.emag.springerprofessional.de/at-z-offhighway-worldwide)