

# Modellbasierte Konzipierung eines hybriden Energiespeichersystems für ein autonomes Schienenfahrzeug

Jürgen Gausemeier<sup>1</sup>, Roman Dumitrescu<sup>2</sup>,  
Christian Tschirner<sup>1</sup>, Karl Stephan Stille<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn,  
Fürstenallee 11, 33102 Paderborn  
{juergen.gausemeier | christian.tschirner}@hni.uni-paderborn.de

<sup>2</sup>Projektgruppe Entwurfstechnik Mechatronik  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie,  
Zukunftsmeile 1, 33102 Paderborn  
Roman.Dumitrescu@ipt.fraunhofer.de

<sup>3</sup>Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik, Universität Paderborn,  
Warburger Str. 100, 33098 Paderborn  
stille@lea.uni-paderborn.de

**Zusammenfassung:** Die Kommunikations- und Informationstechnik eröffnet neue Möglichkeiten zur Erweiterung und Optimierung der Systemfunktionalität mechatronischer Systeme. Die erfolgreiche Entwicklung dieser fortgeschrittenen mechatronischen Systeme bedarf sowohl einer besonderen Strukturierung der Informationsverarbeitung als auch einer geeigneten modellbasierten Entwurfstechnik. SysML und CONSENS eignen sich für den Entwurf derartiger Systeme. Die Anwendung von CONSENS wird anhand eines Demonstrators vertieft.

## 1 Einleitung

Erzeugnisse des Maschinenbaus und verwandter Branchen wie der Automobilindustrie beruhen heute auf dem engen Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Software. Der Begriff Mechatronik bringt dies zum Ausdruck. Die zunehmende Integration von Kommunikations- und Informationstechnik in mechatronische Systeme eröffnet neue Möglichkeiten zur Erweiterung und Optimierung der Systemfunktionalität: Diese fortgeschrittenen mechatronischen Systeme passen sich flexibel und autonom an ihr dynamisches Umfeld an. Darüber hinaus können sie zukünftige Einflüsse antizipieren, sich auf spezifisches Benutzerverhalten einstellen oder gar das eigene Systemverhalten auf Basis historischer Benutzerdaten optimieren. Diese und weitere Fähigkeiten lassen sich unter Begriffen wie Adaptivität, Robustheit, Effektivität und Benutzerfreundlichkeit subsumieren [Du11].

Die erweiterte Funktionalität fortgeschrittener mechatronischer Systeme geht jedoch einher mit einer erhöhten Komplexität der Informationsverarbeitung, was zu enormen Herausforderungen in der Entwicklung führt [Ad09]. Die etablierten Entwicklungs-

Methodiken des klassischen Maschinenbaus, wie die Konstruktionslehre nach Pahl/Beitz [Pa07] und der Mechatronik, wie die VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ [Vd04], bieten hier keine Lösungsansätze. Dies betrifft insbesondere die frühe Phase des Systementwurfs, die sogenannte Konzipierung. Ihr wesentliches Ergebnis ist die Prinziplösung, die den grundsätzlichen Aufbau und die Wirkungsweise des Systems beschreibt und Grundlage für die anschließende Ausarbeitung ist. Es bedarf daher sowohl geeigneter Entwurfstechniken zur Entwicklung fortgeschrittener mechatronischer Systeme als auch eines ausgefeilten Strukturierungs- und Architekturkonzepts für die komplexen Vorgänge in der Informationsverarbeitung [Ad09].

Das International Council on Systems Engineering (INCOSE) sieht im modellbasierten Systems Engineering („MBSE“) den zentralen Lösungsansatz zur Entwicklung derartiger Systeme [In07]. Das Selbstverständnis des Systems Engineering ist jedoch weitläufig, häufig mangelt es an einer Identifikation der Ingenieure mit dieser Disziplin [VD08]. Der modellbasierte Entwurf schafft jedoch einen hohen Nutzen: Auf diese Weise wird ein ganzheitlicher und durchgängiger Blick auf das zu entwerfende System ermöglicht. Wird die Prinziplösung und damit das sich ergebende Systemmodell in den frühen Phasen des Entwurfs erstellt und über den Produktlebenszyklus gezielt erweitert und konsistent gehalten, ist bspw. die Nachverfolgbarkeit von disziplinübergreifend relevanten Anforderungen und Änderungen gesichert. Ebenso wird die Koordination und Kommunikation aller beteiligten Fachdisziplinen ermöglicht. Basis hierfür ist jedoch eine für alle Entwickler verständliche und akzeptierte Modellierungssprache.

Die Anforderungen an die Strukturierung der Informationsverarbeitung erfüllt das Konzept des Operator-Controller-Moduls (OCM) [Ad09]. Dieses gliedert sich in drei aufeinander aufbauende Ebenen: Controller – CO, reflektorischer Operator – RO und kognitiver Operator – KO. Der Controller bildet die regelungstechnische Ebene, dessen Schnittstellen wie im mechatronischen Regelkreis die Sensorik und Aktorik sind. Die beiden übergelagerten Ebenen greifen nicht direkt auf die Aktorik und Sensorik des Systems zu. Vielmehr steuern und konfigurieren sie die jeweils unterlagerte Ebene und ermöglichen damit die notwendigen Überwachungs-, Notfall-, Anpassungs- und Lernprozesse des Gesamtsystems.

In diesem Beitrag stellen wir neben der SysML die Sprache CONSENS (Conceptual Design Specification Technique for the Engineering of Complex Systems) zur Entwicklung komplexer technischer Systeme vor. In Verbindung mit der vorgestellten Strukturierung der Informationsverarbeitung durch den OCM befähigt CONSENS zur Entwicklung fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Ihre Anwendung wird anhand eines Demonstrators des Vorhabens „NBP“ (Neue Bahntechnik Paderborn) vertieft.

## **2 Handlungsfeld: Frühzeitige Systemmodellierung**

Der Entwurf komplexer mechatronischer Systeme ist nach wie vor eine Herausforderung. Mit den gegenwärtigen Methoden und Werkzeugen kommt es während der Entwicklung immer wieder zu hohen Abstimmungsaufwänden zwischen den beteiligten Fachleuten der verschiedenen Disziplinen sowie zu nachträglichen zeit- und kostenint-

siven Änderungen. Eine Ursache ist ein Mangel an Methoden und Werkzeugen zur fachdisziplinübergreifenden Verständigung und Zusammenarbeit während des Systementwurfs. Den Fachleuten der verschiedenen Disziplinen fehlt ein einheitliches Verständnis über Aufbau und Funktionsweise des Gesamtsystems. Mit ihren spezifischen Beschreibungsmitteln gelingt es nicht, das Gesamtmodell des Systems zu erstellen, da disziplinübergreifende Zusammenhänge nicht angemessen dargestellt werden können. Daher muss ein fachdisziplinübergreifender Modellierungsansatz die Lücke zwischen dem Anforderungskatalog, der eine eher grobe Spezifikation des Gesamtsystems darstellt, und den etablierten Methoden der einzelnen Disziplinen schließen [Ad09]. Eine geeignete Modellierungstechnik erfasst daher das zu entwickelnde System mit Hilfe verschiedener Aspekte, die in ihrer Gesamtheit ein kohärentes Systemmodell ergeben. Hierbei gilt es, die Anforderungen fortgeschrittener mechatronischer Systeme hinsichtlich einer detaillierten Modellierung der verschiedenen Hierarchien in der Informationsverarbeitung angemessen zu berücksichtigen. Nur so kann es gelingen, die Entwicklung intelligenter technischer Systeme, wie sie u.a. INCOSE in ihrer MBSE Vision 2020 propagiert, auf Basis des modellbasierten Entwurfs voranzutreiben [In07].

Eine ausführliche Analyse des Stands der Forschung in [Ga08] zeigt, dass es zur Spezifikation mechatronischer Systeme eine Reihe von Ansätzen gibt. Die Ansätze fokussieren meist einzelne Aspekte, wie bspw. kinematisches Verhalten oder stellen Ablaufprozesse des Systems und Zustandsübergänge in den Vordergrund. Damit berücksichtigen sie nur einen Teilausschnitt der Anforderungen, die fortgeschrittene mechatronische Systeme an den modellbasierten Entwurf stellen. Zwei Ansätze mit Potential, die Entwicklung fortgeschrittener mechatronischer Systeme zu befähigen, sind die SysML der Object Management Group („OMG“) [FMS09] und die Spezifikationstechnik CONSENS des Heinz Nixdorf Instituts. Beide werden im Folgenden vorgestellt; CONSENS wird anhand eines Anwendungsbeispiels ausführlicher dargestellt.

## 2.1 Systems Modeling Language – SysML

Die SysML adressiert das Systems Engineering und somit die ganzheitliche disziplinübergreifende Modellierung, Analyse und Verifikation technischer Systeme. Als semi-formale, grafische Sprache basiert sie in der aktuellen Version 1.2 auf der UML 2.3. Hierzu wurden einige Anpassungen und Erweiterungen zur UML vorgenommen; so werden z.B. Klassen als Blöcke bezeichnet. Gleichzeitig wurden irrelevante Bestandteile der UML gestrichen [FMS09]. Aufbau und Konzept der beiden Sprachen sind sehr ähnlich, was die Unterstützung der SysML durch vorhandene UML-Werkzeuge ermöglicht und teilweise auch die industrielle Einführung dieser Werkzeuge erleichtert hat.

SysML verwendet neun Diagramme unter Berücksichtigung der Aspekte Struktur, Anforderungen und Verhalten. Einige Diagramme wurden aus der UML übernommen (Paket, Sequenz, Zustand, Use-Case). Weitere Diagrammtypen (Internes Blockdiagramm, Blockdefinitionsdiagramm, Aktivitätsdiagramm) wurden für die Anwendung in SysML modifiziert. Vollkommen neu sind das Parameterdiagramm und das Anforderungsdiagramm. Letzteres ermöglicht die Beschreibung funktionaler und nicht funktionaler Anforderungen in SysML, was in der „Muttersprache“ UML nicht möglich ist.

SysML kann den kompletten Entwurf eines technischen Systems abbilden. Der enorme Umfang an Diagrammen und Konstrukten lässt jedoch nicht immer die eindeutige oder gar intuitive Verwendung der Sprache zu. Viele Konstrukte sind nur grob definiert und teilweise beliebig einsetzbar, was mit einer hohen Einarbeitung verbunden ist. Die OMG stellt mit SysML nur die Sprache bereit. Inzwischen entwickelte Vorgehensmodelle, wie bspw. SysMod unterstützen bei der Anwendung [We08]. Die gewollte Entkopplung von Sprache und Vorgehensmodell ist jedoch nicht unbedingt von Vorteil. Zudem werden wichtige Systembestandteile der Mechatronik wie Aktorik und Sensorik bewusst bei der Systembetrachtung ausgeklammert, was die Sprache für die maschinenbauliche Entwicklung schwer zugänglich macht. Hervorzuheben sind die Parameterdiagramme: Sie legen parametrische Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften unterschiedlicher Systemelemente fest und bilden somit die Basis für frühzeitige Analysen.

## 2.2 CONSENS

Die vom Heinz Nixdorf Institut entwickelte Spezifikationstechnik CONSENS basiert auf den Arbeiten von Frank und Kallmeyer [Fr06], [Ka98]. Sie ist wie die SysML eine semiformale, grafische Sprache, setzt jedoch die aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht zwingend für den Entwurf mechatronischer Systeme notwendigen Aspekte um. Diese Aspekte sind in Bild 1 dargestellt und kurz erläutert.

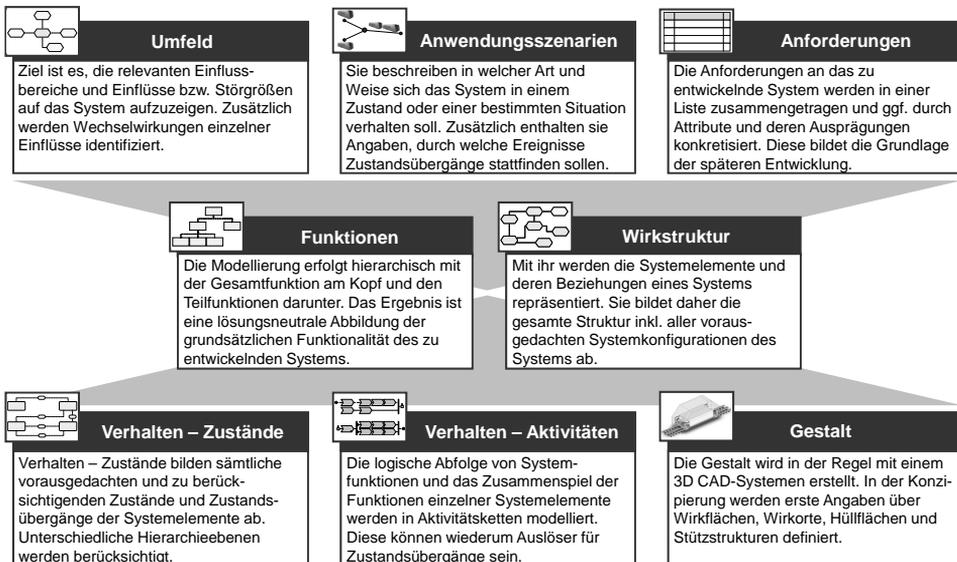


Bild 1. Notwendige Aspekte für den Entwurf mechatronischer Systeme

Die genannten Aspekte werden rechnerintern durch Partialmodelle repräsentiert. Ein formales zusammenhängendes Datenmodell ermöglicht die Werkzeugunterstützung, bspw. durch den Mechatronic Modeller. So werden die zahlreichen Querbeziehungen

zwischen den Partialmodellen handhabbar. Tabelle 1 stellt einige mögliche Wechselbeziehungen zwischen den Partialmodellen dar.

Tabelle 1. Mögliche Wechselbeziehungen zwischen einzelnen Partialmodellen (Ausschnitt)

Konstrukt	aus Partialmodell	Art der Wechselbeziehung	Konstrukt	aus Partialmodell
Systemelement	Wirkstruktur	realisiert	Funktion	Funktionen
Systemelement	Wirkstruktur	führt aus	Aktivität	Verhalten–Aktivitäten
Systemelement	Wirkstruktur	nimmt ein	Zustand	Verhalten–Zustände
Systemelement	Wirkstruktur	verfolgt (opt.)	Ziele	Zielsystem

Die Aspekte bzw. Partialmodelle sind im Wechselspiel zu bearbeiten, wenngleich es eine gewisse Reihenfolge gibt. Diese gliedert sich in Anlehnung an das Vorgehen des klassischen Maschinenbaus [Pa07] in die Schritte Planen und Klären der Aufgabe, Konzipierung auf Systemebene, Konzipierung auf Modulebene sowie die Konzeptintegration [Ga08]. Den Startpunkt bilden die Modellierung des Umfelds, der Anwendungsszenarien und die Ableitung einer Anforderungsliste: Das zu entwickelnde System wird zu Beginn als „Black Box“ in seinem Umfeld abgebildet. Hier werden relevante Einflüsse (z.B. Temperatureinfluss) und die Einbettung in ein übergeordnetes Gesamtsystem („Systems of Systems“) modelliert. Anwendungsszenarien dienen der Beschreibung von Betriebsmodi, für die das System auszulegen ist. Aus den Partialmodellen Umfeld und Anwendungsszenarien ergeben sich Anforderungen an das System.

Die Funktionshierarchie und die Wirkstruktur bilden in der Entwicklung mechatronischer Systeme den Kern der Prinzipiellösung. Die Modellierung einer lösungsneutralen Funktionshierarchie gelingt auf Basis der Anforderungsliste. Dem folgt die Modellierung der Wirkstruktur. Ziel ist die Abbildung der grundsätzlichen Struktur des Systems. In der Wirkstruktur werden die Systemelemente, deren Merkmale sowie die Beziehungen der Systemelemente untereinander beschrieben. Hierzu werden Energie-, Informations- und Signalflüsse sowie mechanische Verbindungen verwendet. Aufbauend auf der Wirkstruktur werden erste Festlegungen der Gestalt des Systems möglich, z.B. Angaben über Wirkflächen oder Wirkorte, die mittels gängiger 3D CAD-Systeme in der fachdisziplinspezifischen Entwicklung detailliert modelliert werden. Darüber hinaus spielen bei der Entwicklung mechatronischer Systeme die Modellierung von Zuständen und Aktivitäten sowie die Auswirkungen auf die Wirkstruktur eine wesentliche Rolle.

CONSENS bietet mit seinen Aspekten und Konstrukten eine sehr gute Basis zur Spezifikation fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Durch die allgemeinverständliche Beschreibung eignet sich diese Technik bei der Integration verschiedener Fachdisziplinen. Der Übergang von der fachdisziplinübergreifenden Prinzipiellösung in die fachdisziplinspezifischen Modelle gelingt zudem bereits in der Softwaretechnik.

### 3 Modellbasierte Konzipierung eines hybriden Energiespeichersystems (HES) mit CONSENS

Die Anwendung von CONSENS wird im Folgenden anhand eines Demonstrators des Vorhabens RailCab/„NBP“ (Neue Bahntechnik Paderborn) vorgestellt. Hierbei handelt es sich um ein Verkehrssystem für den zukünftigen schienenengebundenen Transport von Personen und Gütern im Nah- und Fernverkehrsbereich (Bild 2). Als fortgeschrittenes mechatronisches System vereint es die Vorteile des Individualverkehrs wie Flexibilität und Komfort mit denen des Schienenverkehrs bei Nutzung der vorhandenen Trassen.



RailCab Versuchstrecke an der UPB



RailCab Versuchsfahrzeug (Maßstab 1:2.5)



Konvoibildung zweier RailCabs

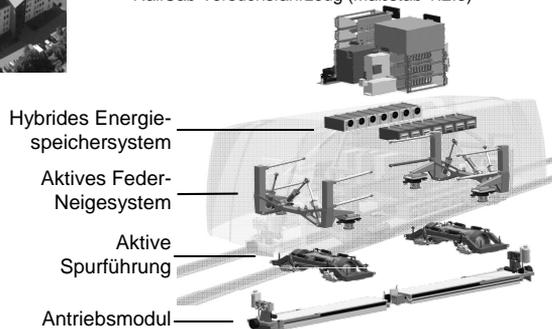


Bild 2. Das Projekt RailCab/Neue Bahntechnik Paderborn im Überblick [<http://nbp-www.upb.de>]

#### 3.1 Anwendungsbeispiel: Hybrides Energiespeichersystem (HES) des RailCabs

Das RailCab besteht aus mehreren mechatronischen Modulen, wie z.B. dem Antriebsmodul inkl. aktiver Luftspaltverstellung, der aktiven Spurführung und dem aktiven Feder-Neigesystem. Ein elektrisches Bordnetz versorgt die Module mit Leistung. Die Realisierung des Antriebsmoduls, ein doppelt gespeister Linearmotor, der asynchron betrieben wird, ermöglicht eine berührungslose Leistungsübertragung aus der Strecke auf das System ohne Oberleitung oder Stromschiene. Allerdings ist eine ausreichende Leistungsübertragung nicht in jeder Fahrsituation möglich, da sie vom Arbeitspunkt des Antriebsmoduls abhängt. Die maximale Leistungsübertragung ist in weiten Bereichen in etwa proportional zur gestellten Antriebskraft. Das Antriebsmodul kann folglich den Momentan-Leistungsbedarf nicht vollständig decken, insbesondere bei geringen Geschwindigkeiten oder im Stillstand [Po05]. Aus diesem Grund muss das RailCab mit einem eigenen Energiespeichersystem ausgestattet sein, das den Leistungsbedarf deckt, der über die durch das Antriebsmodul übertragende Leistung hinausgeht. Die beiden wesentlichen Anforderungen an ein solches Energiespeichersystem sind eine hohe

Speicherkapazität und eine hohe Leistung beim Laden bzw. Entladen. Verfügbare Technologien werden diesen Anforderungen nicht gerecht. Konventionelle Akkumulatoren speichern zwar große Mengen an Energie, besitzen aber nur eine geringe spezifische Leistung. Doppelschichtkondensatoren (DLC) können bei hohen Leistungen nahezu unendlich oft geladen werden, bieten aber nur eine geringe Speicherkapazität. Das HES kombiniert beide Speichertechnologien [Ro09]. Weitere nicht funktionale Anforderungen runden die Anforderungsspezifikation ab. Hierzu gehören bspw. ein geringes Gewicht, geringe Kosten sowie lange Wartungsintervalle.

### 3.2 Modellbasierte Konzipierung des HES

Analog zu der in Abschnitt 2.2 vorgestellten Vorgehensweise beginnt die Konzipierung mit einer Analyse des Umfelds und der Identifikation potentieller Einflüsse (Bild 3). Die Umwelt wirkt bspw. in Form schwankender Temperaturen störend auf das HES: Durch enorme Umgebungstemperaturen könnten die Akkumulatoren einer zu hohen Betriebstemperatur ausgesetzt werden, was den zuverlässigen Betrieb des HES gefährdet. Das Energiemanagement des RailCabs gewährleistet, dass im Bordnetz ausreichend elektrische Ladung verfügbar ist und wird daher ebenfalls mit seinen Einflüssen modelliert.

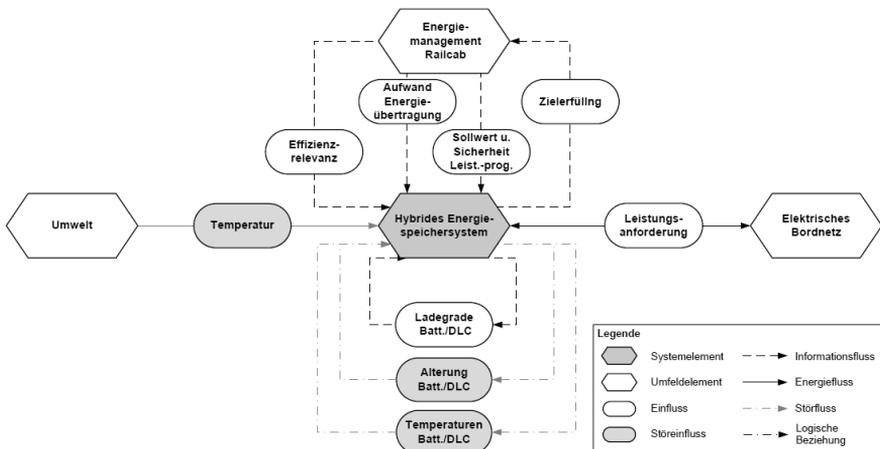


Bild 3. Umfeldmodell des HES

Der Umfeldanalyse folgen die Modellierung von Anwendungsszenarien und Anforderungen. Viele der Anforderungen ergeben sich dabei erst aus dem Wechselspiel zwischen Umfeldanalyse, der Identifikation von Anwendungsszenarien und der Anforderungsanalyse. Die Gesamtfunktionalität des HES ergibt sich aus einer Modellierung des Grundsystems zzgl. aller drei OCM-Ebenen. Bild 4 zeigt einen Ausschnitt der Funktionshierarchie des Controllers. Der Controller übernimmt die Regelung der Energiespeicher. Hierzu werden notwendige Messwerte erfasst, wie bspw. die Batterietemperatur oder der Batteriestrom. Ebenso werden die Ladegrade (SOC) und

der Zustand der Energiespeicher bestimmt (SOH). Die physikalischen Funktionen des Grundsystems und einer Benutzerschnittstelle wurden ebenfalls modelliert.

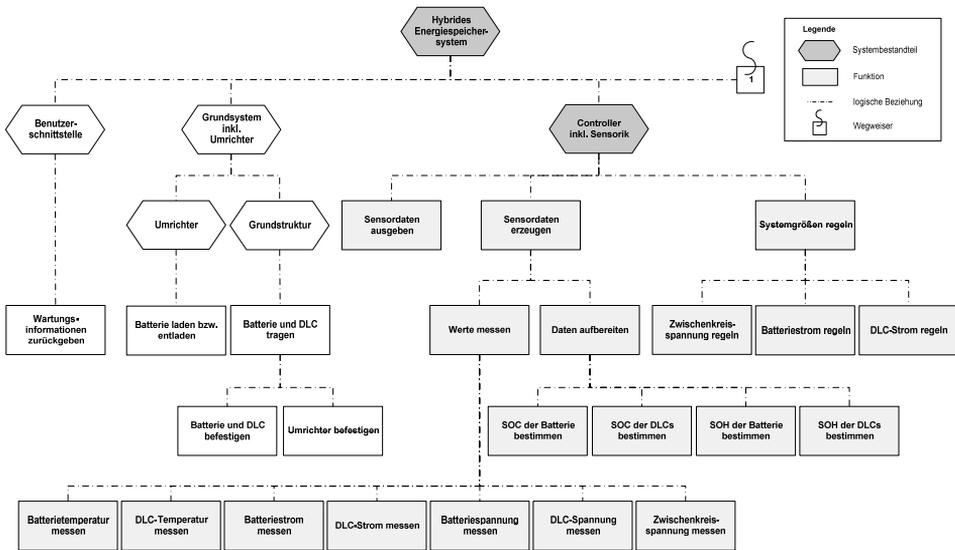


Bild 4. Funktionshierarchie des Controllers inkl. Sensorik (Ausschnitt)

Im Anschluss an die Funktionsmodellierung wird die Wirkstruktur des HES erstellt (Bild 5). Das Grundsystem des HES besteht aus den beiden Energiespeichern, die hier als „Pack“ bezeichnet sind. Der Zwischenkreis puffert die Leistung in den Schaltvorgängen zwischen den bidirektionalen Gleichstromstellern. Er ist die Schnittstelle zum elektrischen Bordnetz des RailCabs und somit zum Antriebsmodul und den Verbrauchern. Das Bordnetz und sein Einfluss auf das Gesamtsystem wurde im Umfeldmodell bereits als Systemperipherie modelliert. In der Wirkstruktur gelingt auf Basis dieser Information die Zuordnung zum korrespondierenden Systemelement.

Das Zusammenspiel der Systemelemente wird im Partialmodell Verhalten – Aktivitäten beschrieben. Das Modell beschreibt, in welcher Reihenfolge die Funktionen zur Laufzeit ausgeführt werden sollen. Das Partialmodell Verhalten – Zustände bildet die Zustände und Zustandsübergänge des HES ab. Hier sind alle vorausgedachten und zu berücksichtigenden Systemzustände und Zustandsübergänge zu beschreiben. Das beinhaltet auch die einen Zustandsübergang auslösenden Ereignisse. So müssen neben dem Systemverhalten natürlich auch potentielle Notfälle abgefangen werden. Diese müssen im Rahmen der Systemspezifikation durch den Entwickler vorausgedacht werden. Bild 6 zeigt mögliche Notzustände und die Ereignisse, die diese auslösen können.

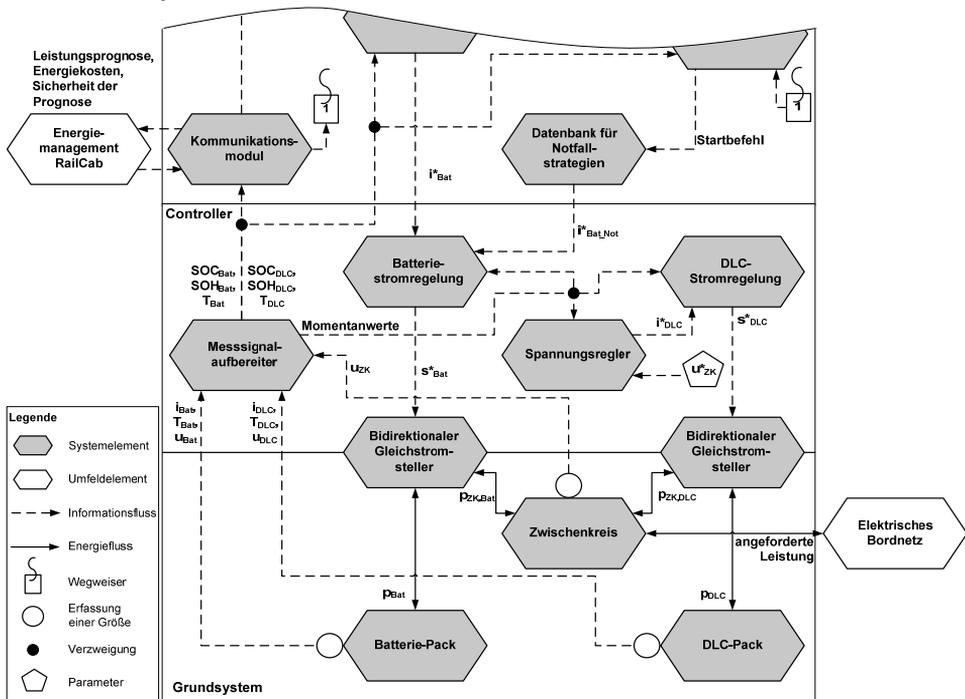


Bild 5. Ausschnitt der Wirkstruktur des HES (Grundsystem und Controller)

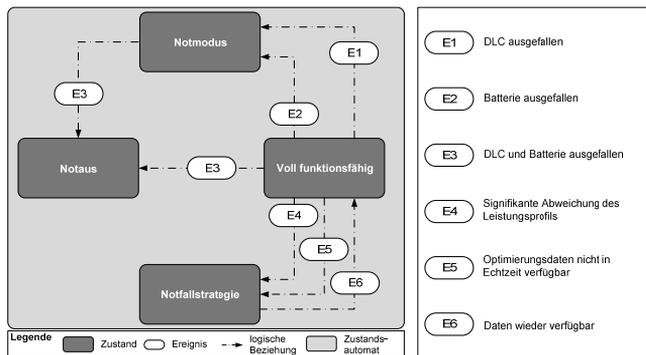


Bild 5. Verhalten – Zustände des Gesamtsystems hinsichtlich möglicher Notzustände

## 4 Zusammenfassung

Der Beitrag zeigt am Beispiel eines autonomen Verkehrssystems auf, wie fortgeschrittene mechatronische Systeme mittels der Beschreibungssprache CONSENS fachdisziplinübergreifend entwickelt werden können. Aufgrund ihrer intuitiven Anwendbar-

keit und der ingenieurwissenschaftlichen Entstehungsgeschichte findet CONSENS hohe Akzeptanz in Unternehmen, die gerade den Wandel hin zu mechatronisch geprägten Entwicklungsabteilungen vollziehen. Ebenfalls vorgestellt wird die Systems Modeling Language SysML. Sie adressiert jedoch nicht direkt die Spezifikation fortgeschrittener mechatronischer Systeme und deren kognitive Informationsverarbeitung. Ihre große Stärke ist das Parameterdiagramm, das zu frühzeitigen Analysen des Systems befähigt. Aufgrund der engen Verbindung zur Softwareentwicklung kann SysML jedoch nicht zwingend als fachdisziplinunabhängige Sprache eingestuft werden; gerade in den frühen Phasen der Systementwicklung ist die Neutralität von Beschreibungsmitteln aber unabdingbar. Für die überwiegend maschinenbaulich ausgebildeten Entwickler kann sich hieraus eine Hürde beim Erlernen der Sprache ergeben. Letztlich bieten jedoch beide Sprachen gute Voraussetzungen für die modellbasierte Entwicklung. Dem MBSE muss hierfür allerdings noch der wirkliche Durchbruch gelingen. Vorherrschende Akzeptanzprobleme könnten beispielsweise durch intuitiv anwendbare Vorgehensmodelle, welche die Entwicklung dennoch strukturiert anleiten, überwunden werden.

### Literaturverzeichnis

- [Ad09] Adelt, P. et al.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus. Definitionen, Anwendungen, Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, Paderborn, 2009.
- [Du11] Dumitrescu, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Universität Paderborn, 2011.
- [FMS09] Friedenthal S.; Moore, A.; Steiner, R.: A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language. Morgan Kaufmann Pub, 2009.
- [Fr06] Frank U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Universität Paderborn, 2006.
- [Ga08] Gausemeier, J. et al.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus. Konstruktion, Ausgabe 7/8-2008 , 2008
- [In07] Incose: Systems Engineering Vision 2020, 2007.
- [Ka98] Kallmeyer, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Dissertation, Universität Paderborn, 1998.
- [Pa07] Pahl, G. et al.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung – Methoden und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin, 7. Auflage, 2007.
- [Po05] Pottharst, A.: Energieversorgung und Leittechnik einer Anlage mit Linearmotor getriebenen Bahnfahrzeugen. Dissertation, Universität Paderborn, 2005.
- [Ro09] Romaus, C. et al.: Optimal Energy Management for a Hybrid Energy Storage System Combining Batteries and Double Layer Capacitors. Proc. of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, USA, 2009.
- [Vd04] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206, Beuth-Verlag, Berlin, 2004.
- [VD08] Valerdi, R.; Davidz, H.L.: Empirical Research in Systems Engineering: Challenges and Opportunities of a New Frontier. Wiley InterScience, September 2008.
- [We08] Weilkens, T.: Systems Engineering mit SysML/UML. dpunkt.verlag, Heidelberg, 2. Auflage, 2008.

Diese Arbeit ist im Sonderforschungsbereich (SFB) 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ der Universität Paderborn entstanden und wurde auf seine Veranlassung unter Verwendung der ihm von der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellten Mittel veröffentlicht.