



FAU Studien aus dem Maschinenbau 320

David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

David Meinel

Architektur applikationsspezifischer
Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren
am Beispiel modularer Triebzüge

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 320

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr. Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp
Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

David Meinel

**Architektur applikationsspezifischer
Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren
am Beispiel modularer Triebzüge**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS)
Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen
FAU University Press
2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bitte zitieren als

Meinel, David. 2019. *Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge*.
FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 320.
Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-185-0.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative Commons Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS Server
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-184-3 (Druckausgabe)

eISBN: 978-3-96147-185-0 (Online-Ausgabe)

ISSN: 2625-9974

DOI: 10.25593/978-3-96147-185-0

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ingenieur

vorgelegt von

Dipl.-Ing. David Meinel
aus Marburg

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 2.10.2018
Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold,
Universität der Bundeswehr
München

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Ich empfinde große Dankbarkeit gegenüber meiner Frau Viktorija. Du warst während der Entstehungszeit dieser Arbeit meine beste Ratgeberin. Du hattest mir bei sehr wichtigen Entscheidungen maßgeblich geholfen, die meine Forschungstätigkeiten in die richtige Richtung gelenkt haben. Nur durch Dich war es mir möglich, die nötige objektive Sicht auf meine Arbeit zu erlangen, welche die Anfertigung einer zugänglichen Ausarbeitung erfordert. Darüber hinaus hast Du mir die nötige Zeit dafür gegeben, was ich sehr bewundere und wertschätze; unserer Tochter Carla hat es dank Dir niemals an Zuneigung gefehlt, obwohl ich nicht immer für Euch da sein konnte. Wenn ich einmal nicht weiterwusste, hast Du mich ungeachtet dieser familiären Herausforderungen aufgefangen und mir neues Vertrauen gegeben.

Professor Jörg Franke möchte ich meinen Dank für seine Unterstützung während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik aussprechen. Dabei habe ich deutlich mehr als nur seine Eigenschaften als Doktorvater zu schätzen gelernt. Nebenbei verdanke ich ihm viele Anregungen, die mir auf meinem weiteren beruflichen, aber auch privaten Lebensweg von Vorteil sein werden.

Mein herzlicher Dank gebührt auch vielen wohlwollenden Kollegen, Kolleginnen und Alumni, u. a. Jochen Zeitler, Tallal Javied, Paryanto, Toni Donhauser, Christian Fischer, Mario Lusic und Alireza Esfandyari, die mir die letzten Jahre ans Herz gewachsen sind. Eure Freundschaft und den Wissensaustausch mit Euch möchte ich nicht missen.

Wichtige Impulse und Ideen habe ich meinen Eltern Brigitte und Tobias sowie meinen langjährigen Freunden Michael Thrun, Stephan Neugebauer und Gunther Dehm-Andone zu verdanken.

Für eine fruchtbare Zusammenarbeit danke ich meinem ehemaligen Studenten Sebastian Rast.

Erlangen, im Oktober 2018

David Meinel

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Verzeichnis von Abkürzungen und Nomenklatur..... | ix |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Zielstellung und Anspruch | 3 |
| 1.2 Strukturierung | 4 |
| 2 Validierung von Produktentwürfen mechatronischer Systeme..... | 6 |
| 2.1 Grundlagen multiphysikalischer Simulation und Modelle | 7 |
| 2.1.1 Bedeutung der Simulation für die Validierung von Produktentwürfen | 7 |
| 2.1.2 UML-Darstellung objektorientierter Architekturen | 9 |
| 2.1.3 Modelica-Werkzeuge | 10 |
| 2.1.4 FMI-Standard..... | 12 |
| 2.2 Motivation für Simulationskonfiguratoren | 15 |
| 2.2.1 Steigende Produktkomplexität | 15 |
| 2.2.2 Entwicklungsprozess fortgeschrittener mechatronischer Systeme | 16 |
| 2.2.3 Notwendige Merkmale von Simulationskonfiguratoren | 20 |
| 2.2.4 Übersicht bestehender Ansätze zur methodischen Integration von Simulation in die Entwicklungsumgebung.. | 26 |
| 2.3 Flexibel konfigurierbare und adaptive Simulationsmodelle | 29 |
| 2.3.1 Objektorientierte Simulationsmodelle als Wegbereiter zur virtuellen Entwurfsvalidierung | 29 |
| 2.3.2 Flexible objektorientierte Modelle | 30 |
| 2.3.3 Kopplung von Modellen..... | 34 |
| 2.3.4 Multiphysikalische Modelle als Umgebung für Hardware-in-the-Loop-Tests | 37 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.3.5 | Dynamische Vernetzung von Modellen | 39 |
| 2.3.6 | Modellierungsmethodik | 42 |
| 2.4 | Fazit | 44 |
| 3 | Längsdynamik- und Energieuntersuchung von Triebzügen | 46 |
| 3.1 | Stand der Forschung | 47 |
| 3.1.1 | Dynamiksimulation | 48 |
| 3.1.2 | Energetische Betriebsoptimierung | 52 |
| 3.2 | Anregung der Längsdynamik von Triebzügen | 53 |
| 3.2.1 | Zusammenhang zwischen Kraft und Bewegung..... | 54 |
| 3.2.2 | Fahrwiderstände | 56 |
| 3.2.3 | Grundlagen des Antriebs..... | 57 |
| 3.2.4 | Grundlagen des Bremssystems | 58 |
| 3.2.5 | Leittechnik | 60 |
| 3.3 | Längsschwingungen in Triebzügen..... | 61 |
| 3.3.1 | Schwingfähige Bauteile in Zügen..... | 61 |
| 3.3.2 | Herleitung der Bewegungsgleichungen..... | 64 |
| 3.4 | Fazit | 72 |
| 4 | Konzeption eines Metamodells für Simulationskonfiguratoren | 74 |
| 4.1 | Erzeugnisgliederung für Simulationsmodelle fortgeschrittener mechatronischer Systeme | 75 |
| 4.1.1 | Metamodell eines Basismodells | 75 |
| 4.1.2 | Anwendungsbeispiel: Basismodell für Triebzüge | 79 |
| 4.2 | Effiziente Konfigurierung von Varianten | 80 |
| 4.2.1 | Metamodell für die effiziente Konfigurierung von Varianten..... | 80 |
| 4.2.2 | Anwendungsbeispiel: Konfiguration unterschiedlicher Zugtypen..... | 82 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.3 | Variable Modellkomplexität | 85 |
| 4.3.1 | Metamodell für variable Modellkomplexität | 85 |
| 4.3.2 | Anwendungsbeispiel: variable Waggonanzahlen im Zugmodell..... | 86 |
| 4.4 | Schnittstellenintegration zur Modellkopplung..... | 88 |
| 4.4.1 | Metamodell für Schnittstellen zur Modellkopplung..... | 90 |
| 4.4.2 | Anwendungsbeispiel: Auftrennung des Waggonmodells in Steuerung und umgebende multiphysikalische Modelle .. | 92 |
| 4.5 | Anbindung von Modulen über ein Feldbusmodell | 93 |
| 4.5.1 | Metamodell für das Feldbusmodell..... | 93 |
| 4.5.2 | Anwendungsbeispiel: Integration eines TCN-Modells | 96 |
| 4.6 | Prozess der Strukturierung multiphysikalischer Simulationskonfiguratoren..... | 98 |
| 4.7 | Fazit..... | 102 |
| 5 | Evaluierung des Metamodells anhand eines Simulationskonfigurators für Triebzüge | 105 |
| 5.1 | Fähigkeit zur Darstellung physikalischer Effekte | 105 |
| 5.1.1 | Methodik und Anforderungen | 106 |
| 5.1.2 | Bewertung des Schwingverhaltens | 109 |
| 5.2 | Potentiale aufgrund der Konfigurationsmöglichkeiten..... | 122 |
| 5.2.1 | Gesteigerte Komplexität bei der Untersuchung des Schwingverhaltens | 123 |
| 5.2.2 | Simulation des Steuerungsverhaltens | 128 |
| 5.2.3 | Konfiguration von HiL-Anwendungen | 137 |
| 5.3 | Fazit..... | 143 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 147 |
| 7 | Summary and outlook..... | 151 |
| | Literaturverzeichnis..... | 155 |

Formel- und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

| | |
|-------|--|
| ACSL | Advanced Continuous Simulation Language |
| AMS | Analog and Mixed-Signal extensions |
| ASIM | Arbeitsgruppe Simulation |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| ED | Elektrodynamisch |
| EP | Elektropneumatisch |
| FEM | Finite-Elemente-Methode |
| FMI | Functional Mock-Up Interface |
| FMU | Functional Mock-Up Unit |
| GUI | Grafische Benutzeroberfläche (Graphical User Interface) |
| HiL | Hardware-in-the-Loop |
| HMI | Human Machine Interface |
| I/O | Input-Output |
| LW | Laufwagen |
| KMU | Kleine und Mittlere Unternehmen |
| MBSE | Model-Based Systems Engineering |
| MiL | Model-in-the-Loop |
| RFLP | Requirements, Functions, Logical Design, Physical Design |
| SiL | Software-in-the-Loop |
| SysML | Systems Modeling Language |
| TCN | Train Communication Network |
| TDEAS | Train Dynamics and Energy Analyser/Train Simulator |
| TEDS | Train Energy and Dynamics Simulator |
| TSI | Technische Spezifikation für die Interoperabilität |
| TW | Triebwagen |
| UML | Unified Modelling Language |
| VHDL | Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language |

Nomenklatur

| Symbol | Bedeutung | Einheit |
|--------------------|-------------------------------------|--|
| \mathbf{o} | Nullvektor | 1 |
| A | Beschleunigung | m/s^2 |
| A | Ort | m |
| A_i | Fahrzeugquerschnittsfläche | m^2 |
| a_i | Waggonbeschleunigung | m/s^2 |
| B_i | Beliebige Konstante | 1 |
| D | Dämpferkonstante | $\text{k}\cdot\text{N}\cdot\text{s/m}$ |
| c_1 | Luftwiderstandsbeiwert Bug | 1 |
| c_2 | Luftwiderstandsbeiwert Heck | 1 |
| c_d | Stoßwiderstandsbeiwert | 1 |
| d_R | Raddurchmesser | m |
| C_i | Integrationskonstante | 1 |
| D | Dämpfungsmatrix | $\text{k}\cdot\text{N}\cdot\text{s/m}$ |
| D | Dämpfungsgrad | 1 |
| E_i | Reelle Konstante | 1 |
| F | Eigenfrequenz | $1/\text{s}$ |
| f_R | Rollwiderstandsbeiwert | 1 |
| F | Kraftvektor | kN |
| F_D | Dämpferkraft | kN |
| f_i | Eigenfrequenz | $1/\text{s}$ |
| F_i | Einträge des Kraftvektors | kN |
| F_{Probe} | Probekraft | kN |
| f_t | Tunnelfaktor | 1 |
| F_R | Reibkraft | kN |
| F_Z | Zugkraft | kN |
| $F_{Z,i}$ | Waggonzugkraft | kN |
| I | Übersetzung | 1 |
| J_i | Massenträgheitsmoment der Radsätze | $\text{kg}\cdot\text{m}$ |
| J_{LW} | Massenträgheitsmomente Laufwagen | $\text{kg}\cdot\text{m}$ |
| J_n | Massenträgheitsmomente der Radsätze | $\text{kg}\cdot\text{m}$ |
| J_{TW} | Massenträgheitsmomente Triebwagen | $\text{kg}\cdot\text{m}$ |
| K | Steifigkeitsmatrix | kN/mm |

| | | |
|----------------------|--|------------------|
| K | Federsteifigkeit | kN/mm |
| k_0, \dots, k_5 | Geometrische und funktionale Faktoren | 1 |
| k_{ij} | Einträge der Steifigkeitsmatrix | kN/mm |
| m | Waggonmasse, Anzahl | t, 1 |
| \mathbf{M} | Massenmatrix | t |
| m_{ij} | Einträge der Massenmatrix | t |
| m_n | Translatorische Masse | t |
| $m_{W, i}$ | Translatorische Waggonmasse | t |
| N | Freiheitsgrade, Anzahl, Drehzahl | 1, 1, 1/s |
| P | Leistung | MW |
| S | Steigung | ° |
| T | Zeit | s |
| T | Periodendauer/Motormoment | s |
| t_o | Zeitpunkt | s |
| T_d | Periodendauer der gedämpften Schwingung | s |
| V | Geschwindigkeit | km/h |
| v_{\max} | Maximalgeschwindigkeit | km/h |
| W | Gesamtwiderstandskraft | kN |
| W_B | Beschleunigungswiderstandskraft | kN |
| W_{Fahr} | Fahrwiderstandskraft | kN |
| $W_{\text{Fahr}, i}$ | Waggonwiderstandskraft | kN |
| W_K | Krümmungswiderstandskraft | kN |
| W_{Lauf} | Laufwiderstandskraft | kN |
| W_{St} | Steigungswiderstandskraft | kN |
| $W_{\text{Stoß}}$ | Stoßwiderstandskraft | kN |
| W_{Str} | Streckenwiderstandskraft | kN |
| W_{Zus} | Zusatzwiderstandskraft | kN |
| \mathbf{X} | Verschiebungsvektor | m |
| X | Ort | m |
| \dot{x} | Ableitung des Ortes nach der Zeit | km/h |
| \ddot{x} | Zweifache zeitliche Ableitung des Verschiebungsvektors | m/s ² |
| \ddot{x} | Zweifache zeitliche Ableitung des Ortes | m/s ² |
| \mathbf{x}_i | Eigenschwingformen | m |
| $\hat{\mathbf{x}}_i$ | Eigenvektor | |
| x_i | Einträge des Verschiebungsvektors | m |

Formel- und Abkürzungsverzeichnis

| | | |
|--------------|--|-------------------|
| x_R | Raddurchmesser | m |
| Δ | Abklingkonstante | 1/s |
| η | Wirkungsgrad | 1 |
| Λ | Trägheitsmomentfaktor/Eigenwert | 1/s |
| μ | Kraftschlussbeiwert | 1 |
| μ_{\max} | Maximaler Kraftschlussbeiwert | 1 |
| Ω | Eigenkreisfrequenz | 1/s |
| ρ | Dichte | kg/m ³ |
| ω_d | Eigenkreisfrequenz der gedämpften Schwingung | 1/s |

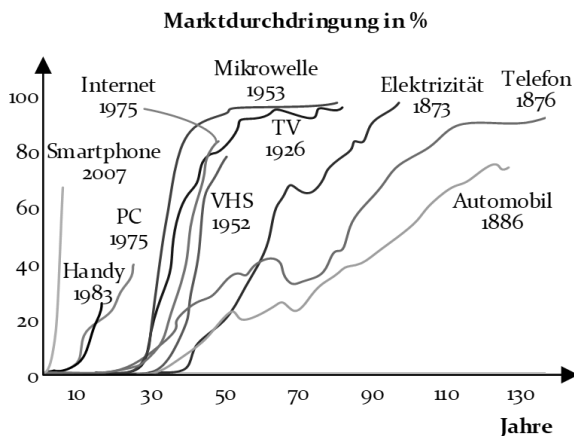
1 Einleitung

Erst hundert Jahre nach der Vorstellung des ersten Automobils im Jahre 1886 waren 60 Prozent der möglichen Käufer Autobesitzer. Der 1926 erstmals vorgeführte Fernseher benötigte nur noch die verhältnismäßig kurze Zeitspanne von 35 Jahren für eine vergleichbare Verbreitung. 1983 wurde das erste erwerbbar Mobiltelefon vorgestellt, das bereits 20 Jahre später am Markt etabliert war. Das Smartphone hatte schon zwei Jahre nach seiner Vorstellung die Marktführung übernommen und herkömmliche Handys verdrängt. Die Entwicklungs- und Nutzungszyklen werden immer kürzer (Bild 1a). [1, 2]

Die Entwicklung zukünftiger mechatronischer Produkte wird wettbewerbsbedingt auf die kürzer werdenden Markteroberungs- und Marktdurchdringungszeiten reagieren und ihre Methoden dementsprechend kontinuierlich verbessern müssen. Eine der des Automobils ähnlich langsame Produktreifung ist längst nicht mehr wettbewerbsfähig. Dementsprechend stärkt die Möglichkeit einer fehlerarmen und zeiteffizienten Produktenwicklung (PE) die Marktposition.

a) Globale

Marktdurchdringungszeiten



b) Globaler Absatz von Elektro-PKW

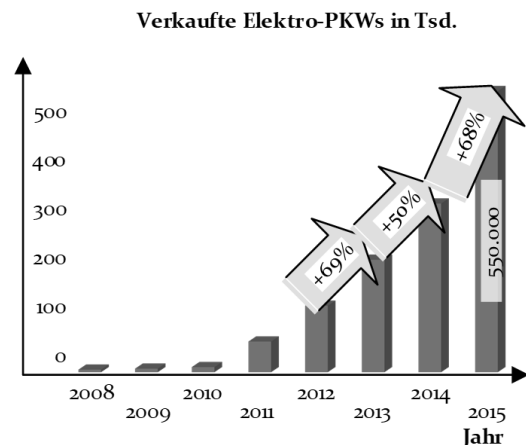


Bild 1: Marktdurchdringung von Produkten [1, 3, 4]

Bild 1b zeigt am Beispiel der Elektromobilität, vor welcher hohen Herausforderungen Fahrzeughersteller gestellt werden, wenn innerhalb eines Jahres fast 70 Prozent mehr PKWs als im Vorjahr ausgeliefert werden müssen. Um bei rapide steigender Nachfrage vor dem Hintergrund des globalen Wettbewerbs weiterhin bestehen zu können, ist der Innovationsdruck auf die Firmen groß, was auch die Eisenbahnbranche zu spüren bekommt.

Aufgrund der steigenden Entwicklungskosten von Hochgeschwindigkeitszügen erwirtschaften deutsche Zughersteller immer weniger Gewinne und werden durch fernöstliche Konkurrenz bedrängt, deren Entwicklungskosten durch um

ein Vielfaches höhere Absatzzahlen weniger stark ins Gewicht fallen. Gerade gegenüber chinesischen Herstellern ist der Innovations- und Kostendruck besonders hoch, weil die in China gesetzlich erzwungene Unternehmensform des Joint Ventures zu einem erheblichen Abfluss des Technologie-Knowhows beiträgt und Konzerne, wie z. B. CRRC, in hohem Maße staatlich subventioniert werden. Für den unternehmerischen Erfolg ist es deshalb entscheidend, die Entwicklungsprozesse der Systeme und Komponenten wesentlich zu verbessern und zu verkürzen. [5]

Während des Lebenszyklus neuer Produkte fallen für den Hersteller besonders hohe Kosten an, wenn in frühen Phasen bereits Fehler verursacht werden. Diese Charakteristik ist in Bild 2 dargestellt. In der Literatur wird sie die „Rule of Ten“ genannt, nach der eine Kostensteigerung um den Faktor Zehn von einer Phase des Lebenszyklus zur nächsten entsteht. Mit einer effizienten und effektiven Validierung können Fehler früher erkannt und damit Kosten eingespart werden. [6–9]

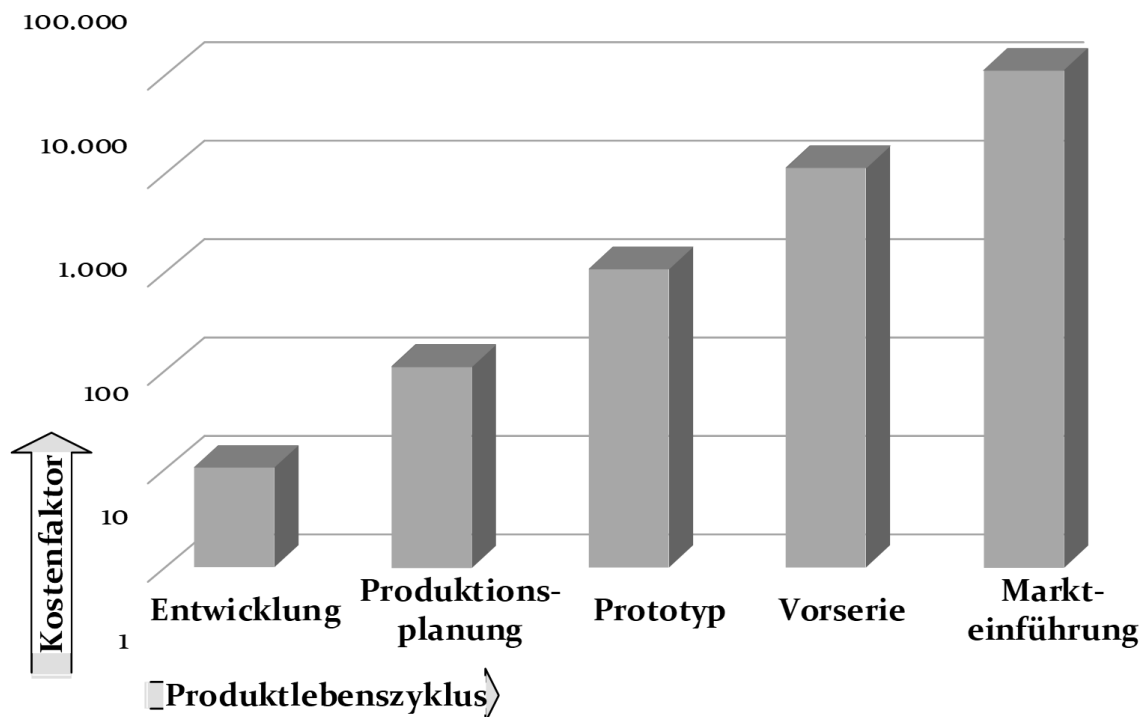


Bild 2: Korrekturkosten von Entwicklungsfehlern in den verschiedenen Lebenszyklen von Produkten [6–9]

Der Ablauf von Produktentwicklungsprozessen (PE) mechatronischer Produkte wird durch die VDI-Richtlinie 2206 in Form des V-Modells beschrieben [10]. Demnach werden Produkte hierarchisch im linken Schenkel des „V“ entworfen, im untersten Bereich implementiert und erst im rechten Schenkel nach dem „bottom-up“-Prinzip integriert und dabei validiert. Bei dieser Vorgehensweise besteht die Gefahr, dass Produkte schon fehlerhaft entworfen werden und dies

erst entdeckt wird, wenn der gesamte PE-Prozess bereits abgeschlossen ist und eine nachträgliche Änderung mit großen Kosten einhergeht. [6]

Noch höhere Kosten fallen an, wenn Fehler erst entdeckt werden, nachdem Produkte schon auf dem Markt sind. Immer wieder kommt es in der Eisenbahnbranche aufgrund mangelhaft ausgelegter Systeme zu Zulassungsproblemen durch das Eisenbahn-Bundesamt. Der bekannteste Fall dürfte sich im Jahr 2013 ereignet haben, als 140 an die Deutsche Bahn ausgelieferte ICE-Züge keine Zulassung bekamen, weil das Bremssystem ein fehlerhaftes Verhalten aufwies. Im gleichen Jahr klagte der Betreiber gegen einen Zughersteller, weil das Bremssystem eines S-Bahn-Typs unterdimensioniert war. Die damit einhergehenden Vertragsstrafen und Änderungskosten fallen hoch aus und gefährden den Geschäftserfolg. [11]

Derartige Defizite können vermieden werden, wenn Produktentwürfe von Anfang an ausreichend validiert werden. Eine Validierung, die früh genug korrigierend in den Entwurf eingreift, stellt Firmen vor dem Hintergrund kurzer Entwicklungszeiten und steigender Produktkomplexität aber vor große Herausforderungen. Dafür sind ein umfängliches Systemverständnis und früh eingreifende Simulationsmethoden zwingend erforderlich [6]. Die nötigen Simulationsmodelle müssen entsprechend flexibel sein, um die verschiedenen konfigurierten Produkte repräsentieren und Einsatzszenarien abbilden zu können. Diese Arbeit geht auf diese Problematik ein, indem ein Konzept zur Erstellung von Konfiguratoren für die aufgaben-, konfigurationsspezifische und produktübergreifende Simulation komplexer Produkte im Entwurfsstadium vorgestellt und validiert wird.

1.1 Zielstellung und Anspruch

Die Motivation zur vorliegenden Arbeit entstammt einer Anwendung aus der Eisenbahnbranche. Aus Forschungstätigkeiten des Autors geht ein flexibles Simulationsmodell zur Untersuchung zugweiter kinetischer Größen hervor. Dessen Ziel ist es, bei unterschiedlichen Fahrszenarien Schwingungen zwischen den Waggonen in Längsrichtung vorherzusagen und daraus Rückschlüsse auf die beteiligten Komponenten zu ziehen. Außerdem ist das entstandene Systemmodell als Umgebung für Hardware-in-the-Loop-Tests (HiL) von Komponenten anbindbar und kann somit in eine vorhandene Entwicklungsumgebung eingliedert werden. Durch den Einsatz des Modells sollen zukünftig Fehlentscheidungen bei der Systemauslegung reduziert und effektivere Komponententests erreicht werden. Darüber hinaus kann durch domänenübergreifende Anwendung die Interdisziplinarität der beteiligten Entwicklungsdomänen gesteigert werden.

In der Wissenschaft und Industrie verbreitete Modelle weisen im Vergleich zu diesem Modell viele seiner Funktionalitäten nicht auf. Die verfügbaren Ansätze ermöglichen weder die Adressierung einer großen Produkt- bzw. Konfigurationsvielfalt noch ein großes Einsatzspektrum der Simulationsmodelle, obwohl die

Werkzeuge objektorientiert sowie programmierbar sind und dadurch bereits eine geeignete Ausgangslage dafür bieten. Deshalb steht die Zielstellung im Vordergrund, das durch dieses Modell verkörperte, übertragbare Konzept zu dokumentieren, durch dessen Anwendung simulationsfähige Digitale Zwillinge beliebiger mechatronischer Produkte abgebildet werden können. Mittels dadurch erzeugbarer Simulationskonfiguratoren besteht die Möglichkeit, diese Digitalen Zwillinge mit unterschiedlicher Komplexität und Funktionalität effizient zu generieren. Die Konfigurationsmöglichkeiten schließen die Integration von Schnittstellen mit ein, mittels der die Digitalen Zwillinge an die Entwicklungsumgebung von Produkten anbindbar sind. Im Rahmen dessen lassen sich die Modelle für Hardware-in-the-Loop-Simulationen (HiL) für die Validierung im Produkt enthaltener Baugruppen und Komponenten konfigurieren.

Die sekundäre Zielstellung ist die Validierung der Methodik, indem ein Konfigurator für Digitale Zwillinge von Triebzügen eingeführt, angewendet und auf diese Weise seine Gültigkeit demonstriert wird. In diesem Rahmen werden unterschiedliche Konfigurationen genutzt, um Simulationsmodelle für verschiedenartige Engineering-Anwendungen zu erzeugen. Diese umfassen die Unterstützung valider Produktentwürfe, Produktoptimierung während der Nutzung sowie die automatisierte Erzeugung von HiL-Testumgebungen zwecks der Verbesserung von Steuerungskomponenten.

1.2 Strukturierung

Die Strukturierung ist in Bild 3 dargestellt. Die Inhalte der Arbeit können einem methodischen sowie einem anwendungsbezogenen Teil zugeordnet werden, entsprechend dem formulierten primären und sekundären Ziel aus Unterkapitel 1.1.

Im Stand der Forschung werden einerseits der Handlungsbedarf für das Metamodell hergeleitet sowie die dafür nötigen Grundlagen erörtert (Kapitel 2). Andererseits werden in Kapitel 3 der Handlungsbedarf für die im Fokus stehenden Simulationsszenarien sowie Zugtypen und die dafür nötigen technischen Details über das längsdynamische Verhalten sowie den Energieverbrauch von Triebzügen dargelegt.

Im Fokus steht die Zielstellung, das generalisierte Metamodell zu schaffen, mit dem sich Simulationskonfiguratoren für verschiedenartige mechatronische Systeme und unterschiedliche Betriebsszenarien erzeugen lassen (Kapitel 4). Mittels der Umsetzung in Form eines Simulationskonfigurators für Triebzüge wird das Metamodell exemplarisch angewendet und anhand dessen verifiziert (Kapitel 5).

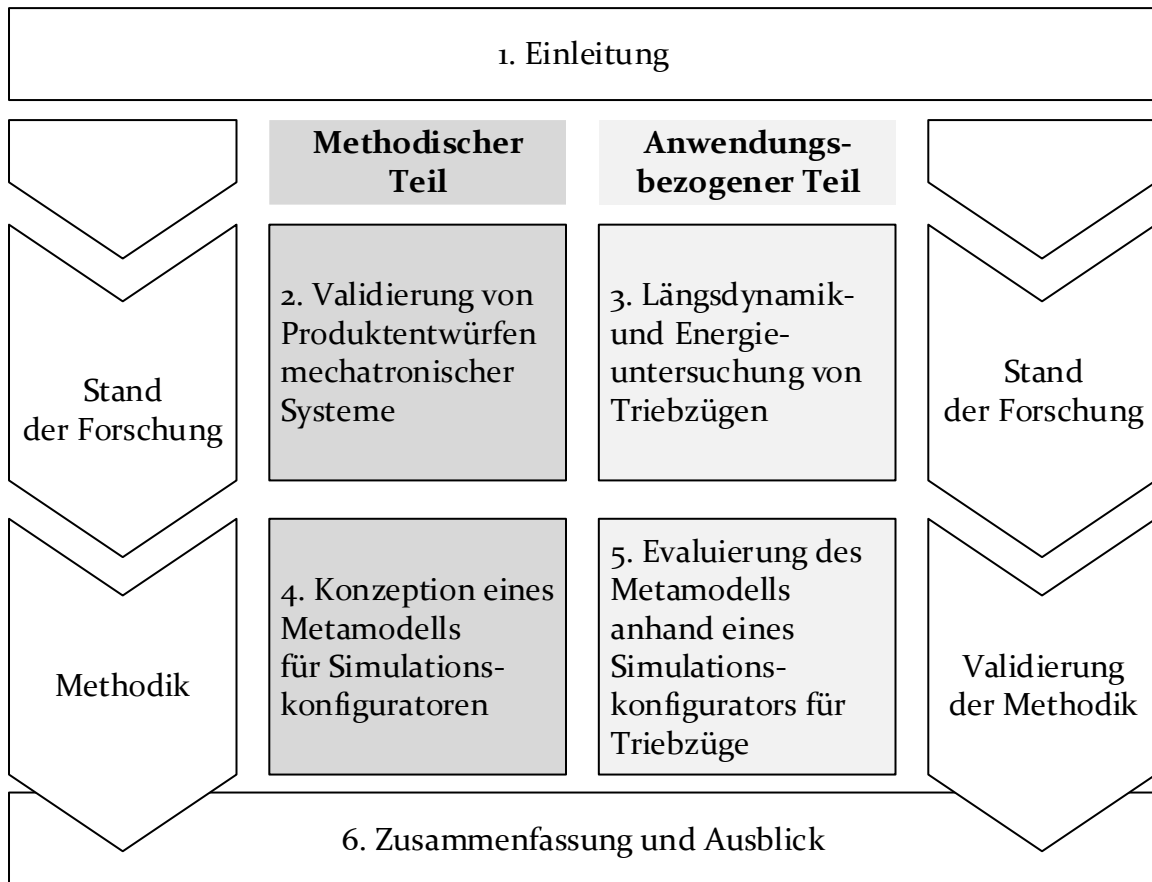


Bild 3: Strukturierung der Arbeit

2 Validierung von Produktentwürfen mechatronischer Systeme

Aus dem entwicklungsbegleitenden Validierungsbedarf durch virtuelle Produktsimulation leitet sich der Handlungsbedarf für das Metamodell ab, das in Kapitel 4 eingeführt wird. In Unterkapitel 2.1 werden Grundlagen erörtert, die für das Verständnis objektorientierter Software-Entwicklung hilfreich sind. In Unterkapitel 2.2 wird der Handlungsbedarf herausgearbeitet, der die Erstellung des Metamodells motiviert. Unterkapitel 2.3 beschreibt die Eigenschaften vorhandener Methoden und ihre Evaluation. Anhand dessen werden die Funktionalitäten abgeleitet, die das Metamodell adressiert.

2.1 Grundlagen multiphysikalischer Simulation und Modelle

Zum thematischen Einordnung und zum Verständnis der multiphysikalischen Simulation und objektorientierten Softwarestrukturen werden zunächst dafür erforderliche Grundlagen erörtert. Sie helfen dabei, die Konzepte flexibler und werkzeugübergreifend austauschbarer Simulationsmodelle nachzuvollziehen.

2.1.1 Bedeutung der Simulation für die Validierung von Produktentwürfen

Während der Entwicklung mechatronischer Produkte ist die Entwurfsvalidierung durch Computersimulation vor dem Hintergrund des globalen Wettbewerbsdrucks unverzichtbar. Die dafür geeigneten Methoden sind multiphysikalische Modellierungssprachen, weil sie in der Lage sind, das Zusammenspiel der heterogenen, im Produkt komponierten Baugruppen und Komponenten darzustellen. Darüber hinaus sind die Modelle über definierte Zeiträume simulierbar, wodurch sich das Produktverhalten bereits prüfen lässt, solange noch keine Produktprototypen existieren. Einen wesentlichen Beitrag liefern dazu modellierbare Regelungs- und Steuerprozesse, ohne die wesentliche Produktfunktionen nicht integriert werden können. Durch die Möglichkeit der Co-Simulation mittels offener zugänglicher Schnittstellen können außerdem heterogene Modelle aus allen Engineering-Domänen in die Simulation miteingebunden werden, wodurch die Modellgranularität anforderungsgerecht variiert werden kann. [2]

Eine Zuordnung von Simulationsmethoden zu unterschiedlichen Anwendungsfeldern ist in Bild 4 dargestellt. Die Auflistung dient der Einordnung der in dieser Arbeit betrachteten multiphysikalischen Verhaltenssimulation. Diese ist nötig, um die Wahl der damit verbundenen objektorientierten Modellierungssprachen nachzuvollziehen.

Simulationsmodelle unterteilen sich in kausale und nichtkausale. Kausale Modellbeschreibungen haben einen gerichteten Informationsfluss, wie z. B. Signalblöcke bei der Modellierung von Regelungs- oder Steuerprozessen. Nichtkausale Modellbeschreibungen weisen bidirektionale Interaktionen zwischen Modellfunktionen bzw. -objekten auf. Auf diese Weise gelingt die realitätsnahe Modellierung physischer Verbindungen mechatronischer Systeme, was die modellseitige Abbildung von modularen Erzeugnisgliederungen ermöglicht. Multiphysikalische Modellierungssprachen bieten derartige Verbindungen an, die im Rahmen des Metamodells in Kapitel 4 verwendet werden. [12]

Des Weiteren kann zwischen der ereignisdiskreten und kontinuierlichen Simulation unterschieden werden, die jeweils verschiedene Anwendungsfelder haben. Bei ereignisdiskreten Simulationen hängt der Zustand des Modells von Aktionen ab, die an Zeiträume und andere Aktionen geknüpft sind. Auf diese Art können komplexe Abläufe simuliert werden, wie beispielsweise Materialflussprozesse zwischen Produktionsanlagen oder Verkehrssysteme etc. Auch Regelungs- und Steuerungsprozesse können auf ereignisdiskreter Simulation basieren, was zur Simulation der Funktionalitäten mechatronischer Produkte erforderlich ist. [13, 14]

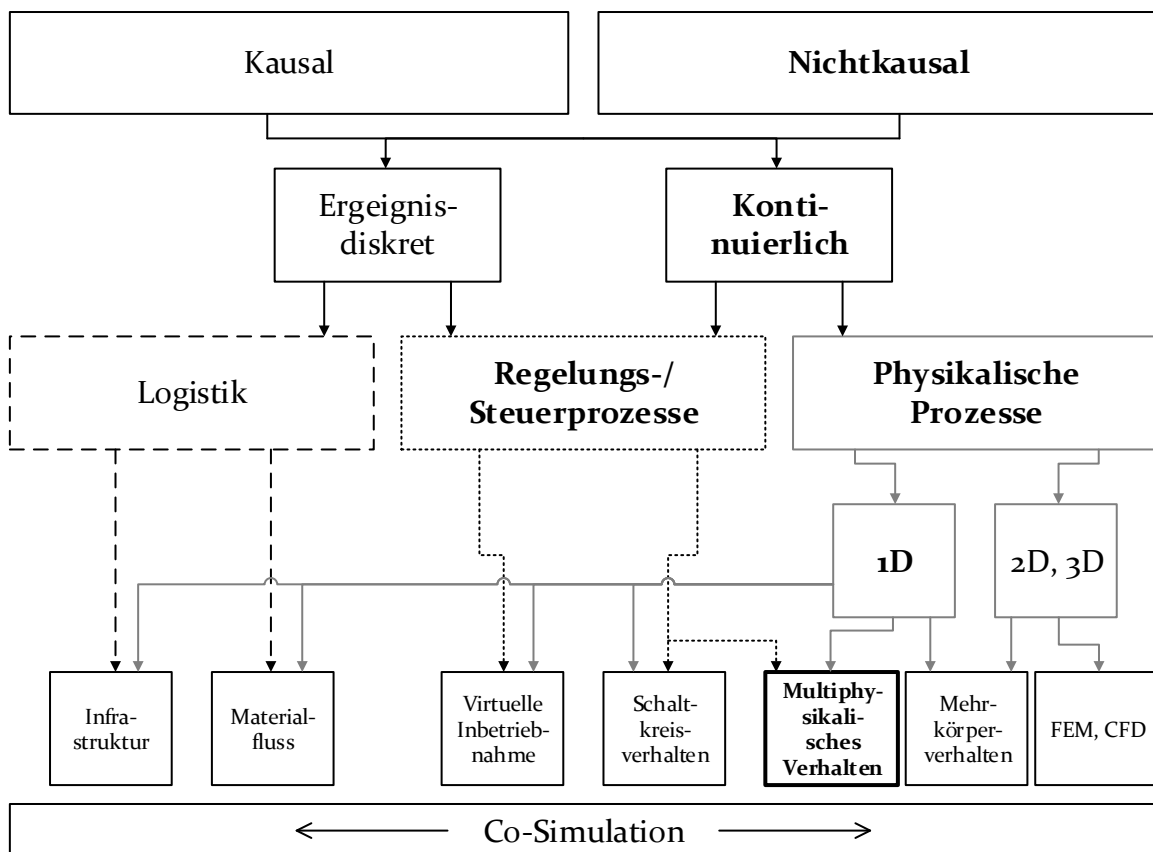


Bild 4: Durch Computersimulation adressierte Herausforderungen des Engineering [12–17]

Die kontinuierliche Simulation dient hingegen insbesondere der Darstellung physikalischer Prozesse. Dabei werden Variablen von Gleichungssystemen unter Definition von Anfangsbedingungen über bestimmte Zeiträume numerisch berechnet. Die Variablen sind die simulierten Systemgrößen. Auf diese Weise können beliebige physikalische Prozesse nachgestellt werden. Multiphysikalische Modellierungssprachen bieten vielerlei eindimensionale, physikalische Modelle an, was zur Darstellung des Zusammenspiels von Baugruppen und Komponenten meistens ausreicht. Dies qualifiziert diese Methode für die Modellierung des physikalischen Systemverhaltens Digitaler Zwillinge. [18]

2.1.2 UML-Darstellung objektorientierter Architekturen

In dieser Arbeit werden vorwiegend objektorientierte Modellstrukturen beschrieben, deren Funktionsweise Standardliteratur entnommen werden kann (z. B. [19–21] etc.). Zur Darstellung von Klassen, ihren instanziierten Objekten sowie ihren Schnittstellen und Beziehungen zueinander eignet sich die Unified Modeling Language (UML). Mittels der durch UML angebotenen Darstellungsmöglichkeiten lässt sich die Architektur technischer Systeme und auch des Metamodells beschreiben [22].

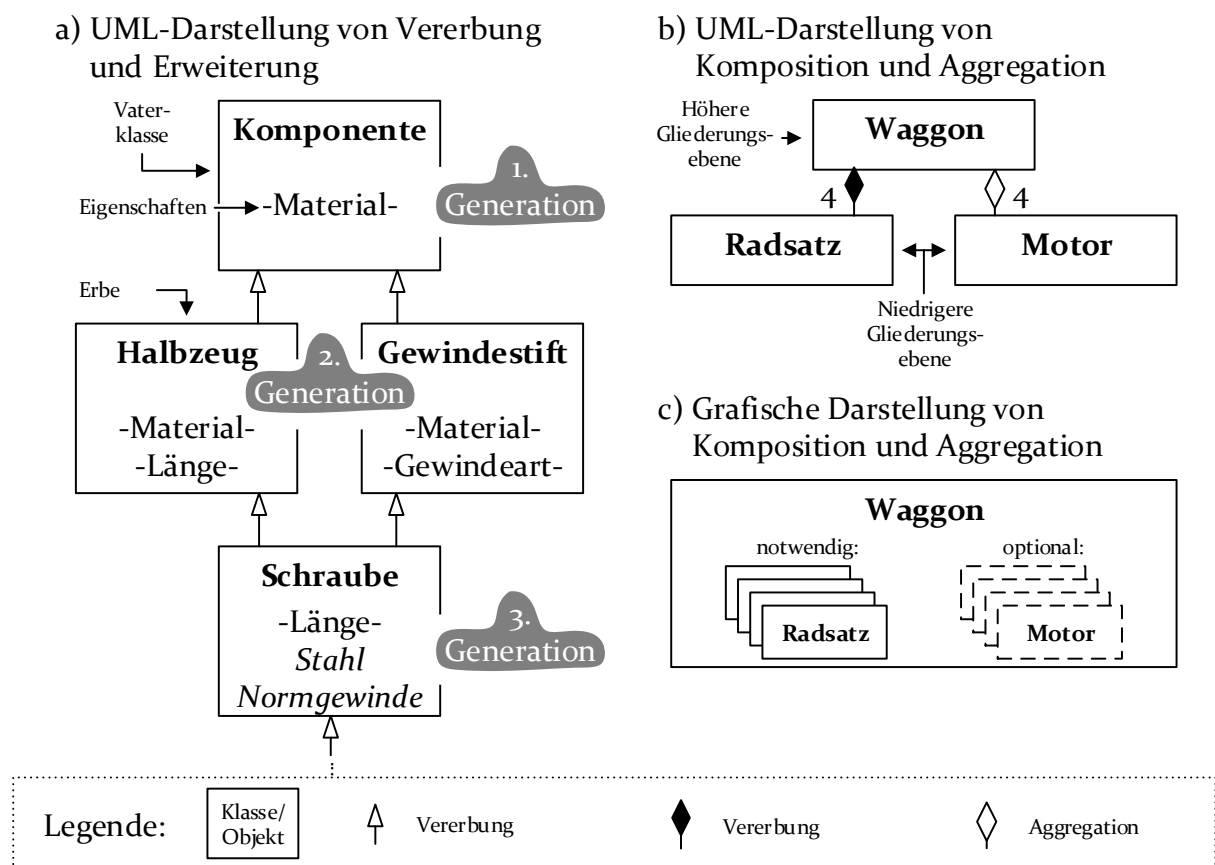


Bild 5: Modelldarstellung mittels UML-Klassendiagrammen anhand von Beispielmotoren und -komponenten [23]

Deshalb wird im Folgenden die Notation von UML-Klassendiagrammen genutzt, wie sie in Bild 5 beispielhaft angewendet ist. Die Rechtecke stellen dabei jeweils Klassen bzw. Objekte dar, während die Verbindungen zwischen ihnen ihre Beziehungen zueinander ausdrücken.

Bild 5a zeigt exemplarische Generationen von Klassen, was durch das weiß gefüllte Dreieck ausgedrückt wird. Klassen zeichnen sich durch ihre Eigenschaften aus. Im Falle von Modellen sind dies beispielsweise ihre Parameter, Gleichungen und Zustandsgrößen. Diese Eigenschaften können Klassen optional zugewiesen werden. Wenn eine Klasse von einer Vaterklasse erbt, übernimmt sie alle ihre Eigenschaften. Werden keine eigenen hinzugefügt, ist sie demnach mit der Vaterklasse identisch. Ansonsten werden die eigenen Eigenschaften hinzugefügt. Ein Erbe kann von einer beliebigen Anzahl von Vaterklassen erben. Im Falle mehrerer Vaterklassen werden sämtliche Eigenschaften vererbt. Deshalb erbt die Ableitung in der dritten Generation die Eigenschaften aller vorhergehenden Klassen.

Die Komposition von mehreren Objekten ist in Bild 5b veranschaulicht. Durch Komposition bzw. Aggregation lässt sich die Zugehörigkeit von Objekten zu einer Klasse ausdrücken. Dabei bedeutet die durch eine schwarz gefüllte Raute symbolisierte Komposition, dass das Objekt der der Verbindung zugeordneten Zahl entsprechend häufig in der Klasse vorkommt. Die durch eine weiß gefüllte Raute repräsentierte Aggregation steht für eine optionale Zugehörigkeit. Der der Verbindung zugeordnete Stern impliziert Häufigkeiten zwischen Null und Unendlich.

Durch Komposition und Aggregation von Objekten lassen sich Objekte Klassen als Erweiterungen zuordnen. Wird ein Erbe einer solchen Klasse erzeugt, enthält dieser ebenfalls alle komponierten bzw. aggregierten Objekte.

Das in Bild 5b beschriebene System kann auch grafisch in Form von Bild 5c ausgedrückt werden. Die Objekte werden durch die Komposition und Aggregation Bestandteile der übergeordneten Klasse. Die Klassen der Objekte selbst können wiederum innere Objekte mittels Komposition und Aggregation enthalten. Dieses Prinzip lässt sich über beliebig viele Ebenen fortführen, um komplexe Erzeugnisgliederungen modular abzubilden.

2.1.3 Modelica-Werkzeuge

Modelica ist eine offen zugängliche, objektorientierte Programmiersprache zur Erstellung von kontinuierlich über die Zeit simulierbaren Modellen technischer Systeme. Die Modelle werden in Klassen geschrieben, deren Objekte die Module und Komponenten des zu modellierenden Produkts bilden, wie in Bild 6a ersichtlich ist. Auf Komponentenebene, in der keine weiteren Modellinstanzen mehr vorhanden sind, wird das physikalische Komponentenverhalten in Form von Gleichungen beschrieben. In der Modelica-Standard-Bibliothek stehen Modelle

aus den geläufigsten technischen Domänen (Maschinenbau, Elektrotechnik, Regelungstechnik etc.) zur Modellierung mechatronischer Systeme zur Verfügung. Die Bibliothek wird durch die Modelica Association kontinuierlich aktualisiert. In ihr lassen sich elementare Modelle, wie z. B. ein Ohm'scher Widerstand, aber auch sehr komplexe Modelle finden, wie z. B. das eines Sechssachs-Industrieroboters, welche beispielsweise für Echtzeitsimulationen eingesetzt werden. [24–26]

Modelica-Werkzeuge beinhalten eine zweidimensionale grafische Modelldarstellung. Darin erscheinen die Objekte als Bestandteile einer Architektur, die das Produktmodell widerspiegelt. In dieses Modell lassen sich aus der Bibliothek neue Modellinstanzen grafisch erzeugen und miteinander in Beziehung bringen. Das grafische Modell wird durch das Werkzeug in Modelica-Quelltext übersetzt und in dieser Form abgespeichert. Durch die grafische Modellierung wird die Modellübersicht im Vergleich zur Quelltextdarstellung deutlich gefördert, da dort die Module und Komponenten des realen Systems wiederzufinden sind. Diese werden mittels Connections verbunden, worüber der bei der Simulation nötige Informationsaustausch stattfindet. Informationen können einheitslos sein, aber auch physikalischen Größen annehmen. Auf diese Weise lassen sich die meisten Verbindungen realer technischer Komponenten nachstellen. Die grafische Darstellung von Modellen ist in Bild 6b skizziert.

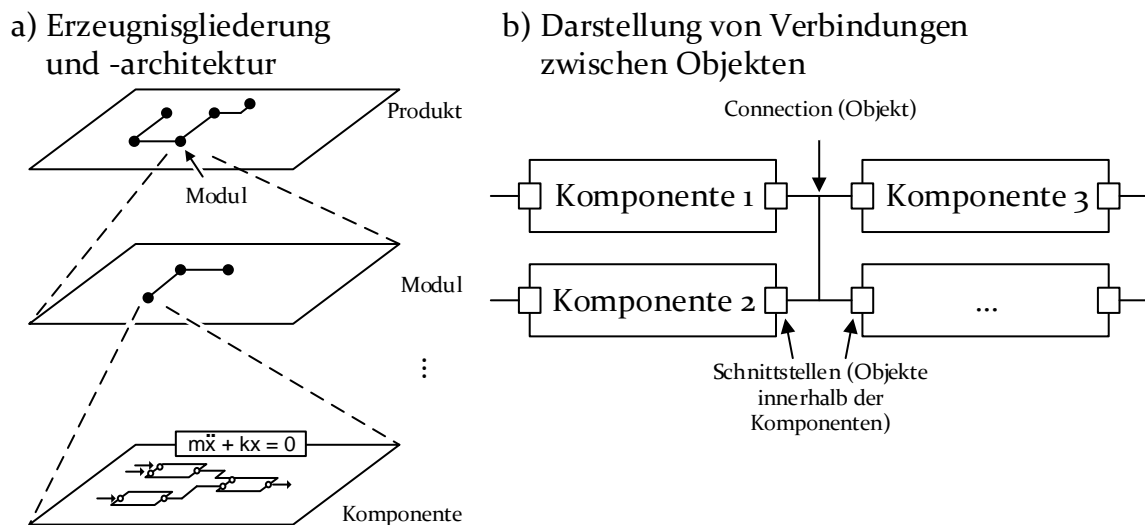


Bild 6: Erzeugnisgliederung und Interaktion von Modell-Komponenten [27]

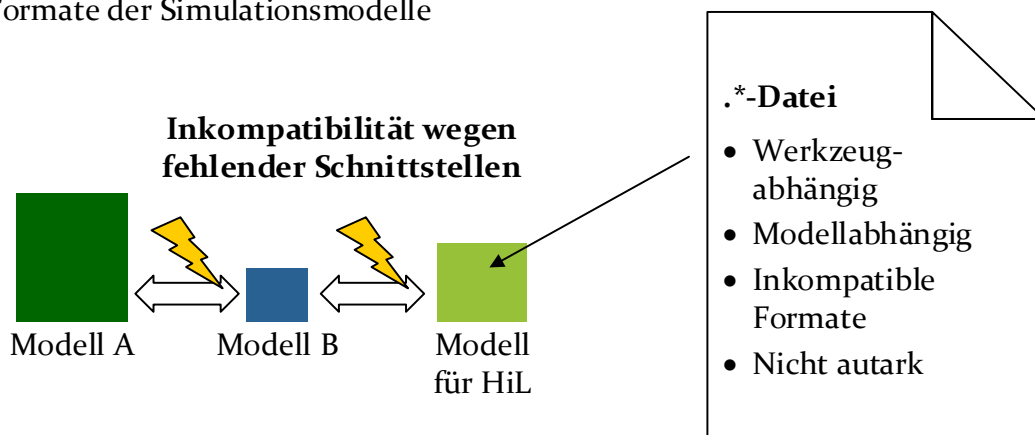
Während der Simulation des Systems wird das dem Modell entsprechende Gleichungssystem berechnet. Die Variablen bzw. Zustandsgröße, wie z. B. Geschwindigkeit, Temperatur etc., lassen sich dabei als Argument über die Zeit grafisch oder numerisch ausgeben. Die unterschiedlichen Werkzeuge sind mit Berechnungsprogrammen ausgestattet, die die Lösungsalgorithmen für das Differentialgleichungssystem beinhalten.

2.1.4 FMI-Standard

Ein weiterer wichtiger Aspekt multiphysikalischer Simulationsmodelle ist ihre Eigenschaft, für reale Komponenten in HiL-Tests eine Simulationsumgebung bilden zu können. Dadurch werden die Validierungsmöglichkeiten gegenüber Feldtests und Prüfständen deutlich gesteigert, da eine größere Anzahl an Betriebsszenarien mit größerer Transparenz getestet werden kann [28].

Außerdem kann die Integration von Computational Fluid Dynamics- (CFD) bzw. Finite-Elemente-Methode-Modellen (FEM) nötig werden, wenn die typischerweise sehr generischen Modelica-Modelle nicht fähig sind, Komponentenverhalten ausreichend genau nachzustellen. In diesem Fall muss die Möglichkeit zum Modellimport bestehen, was durch den Standard Functional Mock-Up Interface 2.0 (FMI) ermöglicht wird [29]. Insbesondere die durchdringende Kompatibilität zwischen vielen verbreiteten Simulations- und Entwicklungswerkzeugen, Modelica und FMI sind die ausschlaggebenden Gründe dafür, dass sich das Metamodell in Kapitel 4 an ihren Eigenschaften orientiert [30, 31].

- a) Mangelnde Werkzeugkompatibilität wegen inhomogener Schnittstellen und Formate der Simulationsmodelle



- b) Modellkopplung zwischen Simulationswerkzeugen durch einheitlich formatierte Modelle mit allen nötigen Daten (Bibliotheken, Lösungsverfahren etc.)

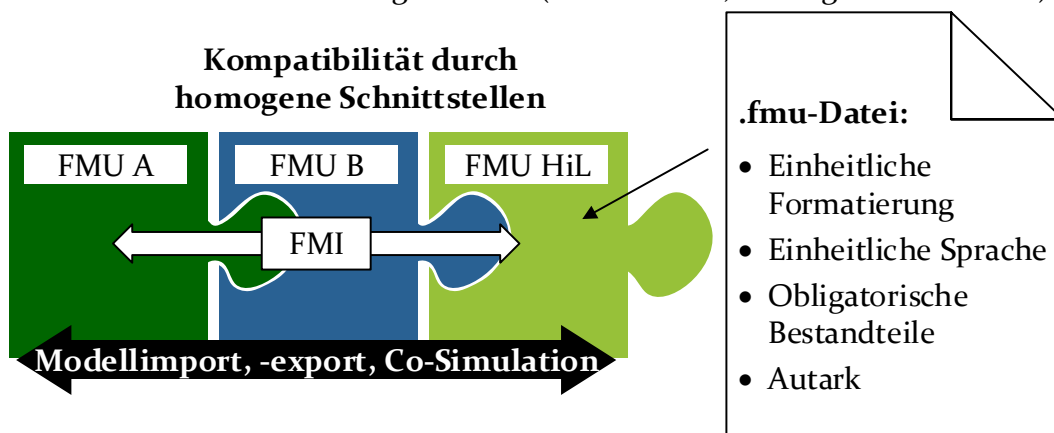


Bild 7: Modellimport und -export mittels Functional Mock-Up Units (FMU) [32–34]

Hinsichtlich umfassender produktbegleitender Validierung ist eine Simulationsumgebung erstrebenswert, in der Simulationsmodelle aus verschiedenen Domänen kombiniert werden können, die mit unterschiedlichen Programmen erzeugt werden. Multiphysikalische Modellsprachen bieten eine Umgebung, mittels der sich Modelle verbinden und sich ihre Wechselwirkungen simulieren lassen [35]. Ein weiterer Grund für den Einsatz multiphysikalischer Simulationsumgebungen und Modellsprachen ist deshalb die Kompatibilität mit FMI, was u. a. speziell für Modelica-basierte Tools entwickelt wurde [31]. Dadurch lassen sich Modelle gängiger Simulationswerkzeuge mittels automatisierter FMU-Generierung über FMI austauschen bzw. koppeln. FMUs sind vereinheitlichte Modelle, die eine hohe Kompatibilität mit verschiedensten Simulationswerkzeugen erreichen. In Bild 7a ist die Problematik bei der Modellbildung in unterschiedlichen Werkzeugen geschildert. Die unterschiedlichen Dateiformate, Modellsprachen und Schnittstellenbeschreibungen sowie proprietären Bibliotheken der jeweiligen Werkzeuge verhindern die Modellkopplung.

Wenn ein Modell jedoch, wie in Bild 7b, als FMU erstellt wird, resultiert dieser Prozess in einer einheitlich formatierten Archivdatei, die immer die gleichen Mindestbestandteile aufweist und außerdem optionale Bestandteile enthalten kann (.xml-Dateien, C-Code und optionale Bibliotheken). Indem FMU über die Modellbeschreibung hinaus auch die Informationen über das Lösungsverfahren, etwaige proprietäre Bibliotheken etc. enthalten können, werden alle fehlenden Daten ergänzt, die die Werkzeuge zum Ausführen von FMU benötigen. Für die Co-Simulation von Modellen, bei der kollaborierende Modelle verschiedener Werkzeuge parallel und synchronisiert simuliert werden können, müssen FMU außerdem Informationen über die Schrittweitensteuerung im xml-Format enthalten. [34, 36]

Modeltransport bzw. Modellkopplungen mittels Co-Simulation können auf vier verschiedene Arten erfolgen. Die richtige Wahl wird je nach den Gegebenheiten durch die Entwicklungsumgebung und Verteilung der vorhandenen Teilmodelle mit dem Ziel einer möglichst effizienten Anwendung getroffen: [37, 38]

- a) Modellexport für HiL
- b) Modellimport bzw. -export zur Integration externer Modelle
- c) Rechnerinterne Co-Simulation
- d) Rechnerübergreifende Co-Simulation

Die Auswahl unterliegt jedoch auch funktionalen Voraussetzungen. Beispielsweise können heterogene Modelle auch unterschiedliche Lösungsalgorithmen erfordern, z. B. im Falle der Kopplung von kontinuierlicher und ereignisbasierter Simulation. Außerdem sind die Einstellungsmöglichkeiten bei exportierten Modellen beschränkt. Wird ein Modell mittels Co-Simulation simuliert, bleiben

alle Modifikationsmöglichkeiten bestehen, die im Werkzeug des externen Modells vorhanden sind. [39, 40]

Der FMI-Standard als werkzeugübergreifende, einheitliche Modellschnittstelle ist zur Zeit alternativlos [34]. Durch FMI lassen sich von Anfang an bereits vorhandene Komponentenmodelle in ein simulationsfähiges, multiphysikalisches Modell des Produkts integrieren. Dadurch wird das Prinzip des modellbasierten Systems Engineering (MBSE) vom Gestaltungsprozess auf den frühzeitigen, virtuellen Validierungsprozess ausgeweitet. Die verbesserte Möglichkeit zur detaillierten Simulation von aufeinander aufbauenden Prozessen wird in vielen Arbeiten hervorgehoben (z. B. [41–43] etc.). Wenn während der Entwurfsphase multiphysikalische Umgebungsmodelle für Module bzw. Komponenten in HiL-Tests zur Verfügung stehen, kann auch die prüfstandbasierte Validierung ihrer physischen Erzeugnisse im Vergleich zu herkömmlicher PE-Prozessen vorgezogen werden. Dadurch wird eine größere Unabhängigkeit der Produktmodule erzielt, und folglich können Produktionsaufträge flexibler temporären Maschinenauslastungen angepasst werden. HiL kommt im Bereich der Software-Entwicklung für große mechatronische Systeme, wie z. B. Züge, besondere Bedeutung zu. Dies liegt darin begründet, dass Module aufgrund starker Emissionen und großen Platz- sowie Energiebedarfs nicht in Entwicklungsstandorten am physischen

Zielsystem getestet werden können.

Durch die Integration von FMI in multiphysikalische Simulationsmodelle kann außerdem ihre Obsoleszenz vermieden werden, die oft mit firmeninternen Softwareumstellungen einhergeht. Beispielsweise hat sich die mangelnde Werkzeugkompatibilität im Falle der Umstellung des Catia-Systems auf NX bei Daimler als hoch aufwändig erwiesen. Aufgrund der mangelnden Modellkompatibilität mussten der gesamte Datenbestand neu erstellt und rund 6000 Mitarbeiter umgeschult werden, was mit enormen Kosten und großem Zeitaufwand verbunden war. [44]

Eine konsequente Nutzung von FMI/FMU kann den Aufwand deutlich reduzieren und sogar ein heterogenes, spezialisierungsabhängiges Werkzeug-Portfolio begünstigen. Denn für die wettbewerbsfähige Entwicklung der heterogenen Komponenten fortgeschrittener mechatronischer Systeme sollten die jeweils geeignetsten Werkzeuge verwendet werden. Dabei sollten Bindungen an Softwarehersteller nicht die Entwicklungsmöglichkeiten einschränken.

Das in Kapitel 4 beschriebene Metamodell hat die effiziente Integration von FMI/FMU zum Ziel. Dementsprechend werden objektorientierte Modellstrukturen vorgestellt, die mittels Modularität und einer universell durchführbaren Schnittstellenbildung die Integration von FMI in beliebige Modellbereiche bestmöglich vorbereiten.

2.2 Motivation für Simulationskonfiguratoren

In diesem Unterkapitel werden die Situation und die damit verbundenen Herausforderungen der Entwicklung fortgeschrittener mechatronischer Systeme vor dem Hintergrund aktueller Bedürfnisse beleuchtet. Im Zentrum steht dabei die geforderte Interdisziplinarität von PE, die zur Beherrschung der fortschreitenden Produktkomplexität, -digitalisierung und -individualisierung neuartiger Methoden bedarf.

2.2.1 Steigende Produktkomplexität

Bei der Entwicklung von Produkten gilt es, eine schnell steigende Produktkomplexität zu beherrschen. Die beim Engineering zur Verfügung stehenden Methoden und Werkzeuge werden weiterentwickelt, um aktuelle Kundenanforderungen an Produkte zu erfüllen. Aufgrund dieses Nacheilens existiert eine prinzipielle Lücke zwischen den Komplexitätsanforderungen an die Produkte und den darauf reagierenden Methoden und Werkzeugen. Mit voranschreitender Zeit und insbesondere vor dem Hintergrund der fortschreitenden Digitalisierung wird die Lücke zunehmend größer. Dieser Sachverhalt ist in Bild 8 dargestellt. [45]

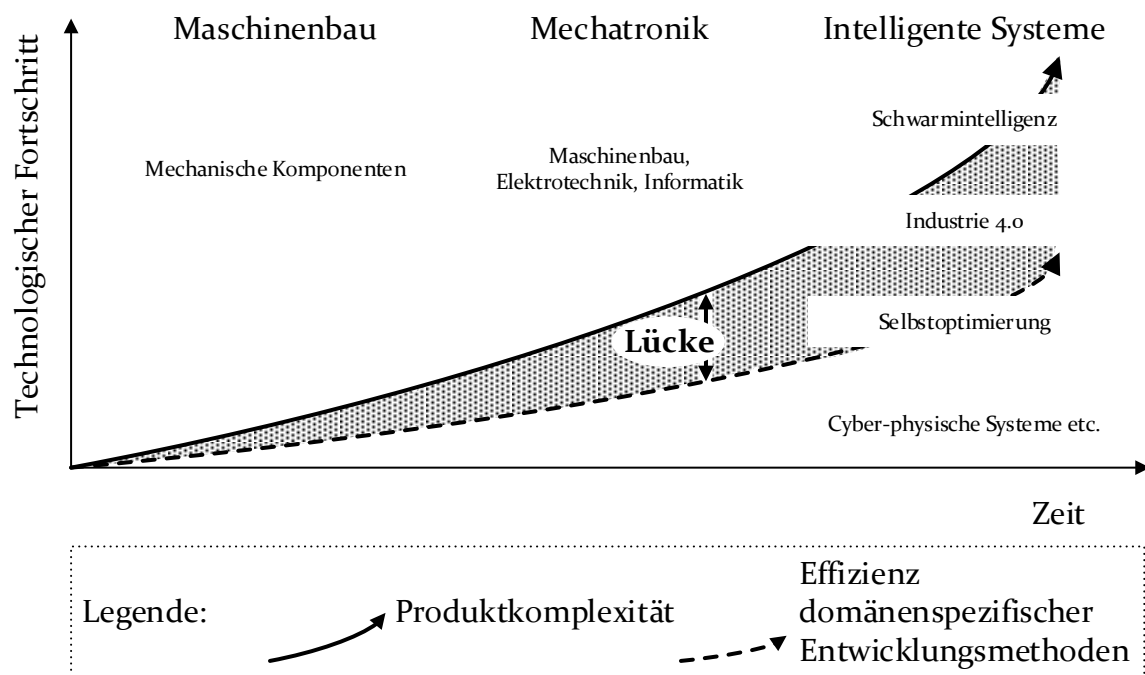


Bild 8: Lücke zwischen notwendigen und etablierten Entwicklungsmethoden zur Beherrschung der Produktkomplexität [45]

Ohne Simulation des Systemverhaltens während der Entwurfsphase lässt sich das spätere Produktverhalten nicht ausreichend vorhersagen, was bereits durch die „Rule of Ten“ nahegelegt wird und dazu führt, dass die Abnahmeprozesse solcher Systeme langwierig und kostenintensiv sind. Oft bleiben Entwicklungsfehler

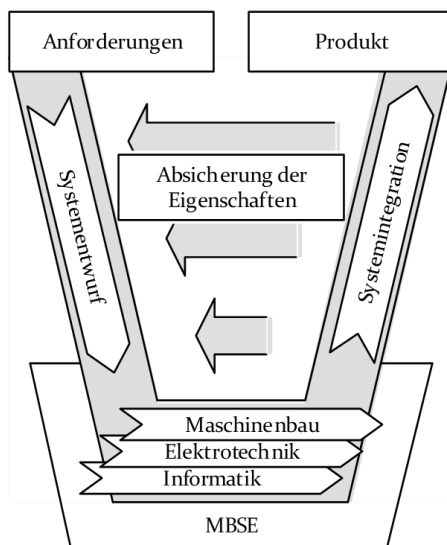
unentdeckt und müssen behoben werden, bis die zuverlässige Erfüllung aller Funktionen gemäß den Anforderungen gelingt. Im schlechtesten Fall treten Fehler erst zutage, wenn ein Produkt bereits auf dem Markt ist, was zu Rückrufaktionen und Nachbesserungen an jedem einzelnen Produkt führt.

Die durch die vorhandenen Methoden zunehmend weniger beherrschbare Produktkomplexität wird deutlich, wenn beispielsweise die PKW-Rückrufaktionen betrachtet werden. Sie haben sich von 55 im Jahr 1998 auf 170 im Jahr 2013 nahezu verdreifacht. Die damit verbundenen Kosten haben sich sogar verachtfacht. [6]

2.2.2 Entwicklungsprozess fortgeschrittener mechatronischer Systeme

Der Bedarf nach Systemsimulation wird weiter an dem Ablauf des klassischen V-Modells nach der VDI-Richtlinie 2206 deutlich, mittels der sich die Entwicklung mechatronischer Systeme beschreiben lässt (Bild 9a). Nach Festlegung der Produkthanforderungen wird das System entworfen (linker Teil des V-Modells). Der fertige Entwurf, der bereits alle geplanten Module und Komponenten beinhaltet, wird nachfolgend in die drei Domänen des Maschinenbaus, der Elektrotechnik und Informatik geteilt und implementiert (unterer Teil). Die entstandenen Baugruppen, Komponenten und Softwaremodule werden abschließend in Form des fertigen Produkts integriert, wobei die Einhaltung der festgelegten Anforderungen mittels Integrationstests validiert wird. Der PE-Prozess wird von MBSE begleitet. MBSE ist ein Sammelbegriff für die Bemühung, Entwicklungsschritte anhand virtueller Produktmodelle durchzuführen und klassische, textbasierte Dokumentation in Modelle zu überführen. [10, 46]

a) Beschreibung PE-Prozess



b) PE-Prozess mit integrierter multiphysikalischer Simulation

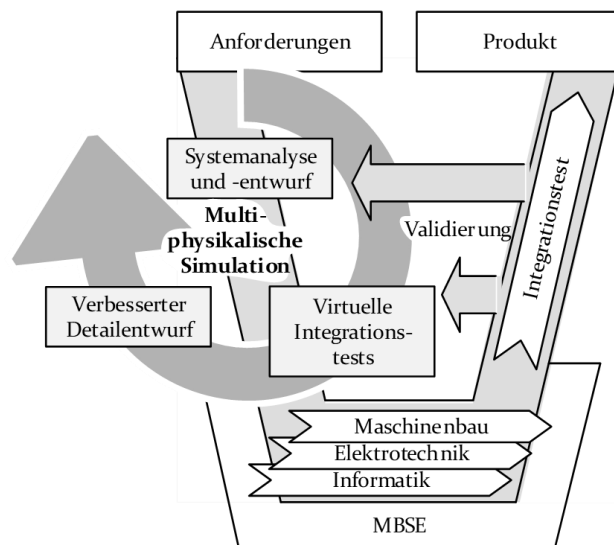


Bild 9: Ablauf von PE-Prozessen [2, 10, 47]

Ungünstiger Weise ist die Integrationsphase oftmals der Zeitraum, in dem Entwurfsfehler offengelegt und rückwirkend behoben werden müssen. Dies kann sowohl Auswirkungen auf den Systementwurf als auch auf die domänenspezifische Entwicklung haben, in denen jeweils nachgebessert werden muss. Konsistente MBSE-Datenmodelle bieten den Vorteil, dass wegen besserer Verknüpfung und Zugänglichkeit der Produktdaten der Produktkontext offensichtlicher ist. Dadurch sind Änderungen leichter verfolgbar und entsprechend ihre Auswirkungen vorhersehbarer.

U. a. FISHER hat zur Adressierung der Probleme der Entwicklungsmethodik ein verbessertes V-Modell vorgeschlagen, dargestellt in Bild 9b, dessen Ziel die frühe Integration von Systemsimulation ist, damit Entwurfsfehler reduziert und früher offengelegt werden können. Der Ansatz besteht darin, dass bereits simulationsfähige Komponentenmodelle in einem Systemmodell während der Entwurfsphase existieren und mittels eines Simulationsmodells des Produkts bereits virtuelle Integrationstests durchgeführt werden können. Dadurch lässt sich der aktuelle Entwurfsstand kontinuierlich verifizieren und verbessern. Auf diese Weise können bei der domänenspezifischen Entwicklung und allen darauf aufbauenden Phasen effizient Fehler vermieden werden. [2]

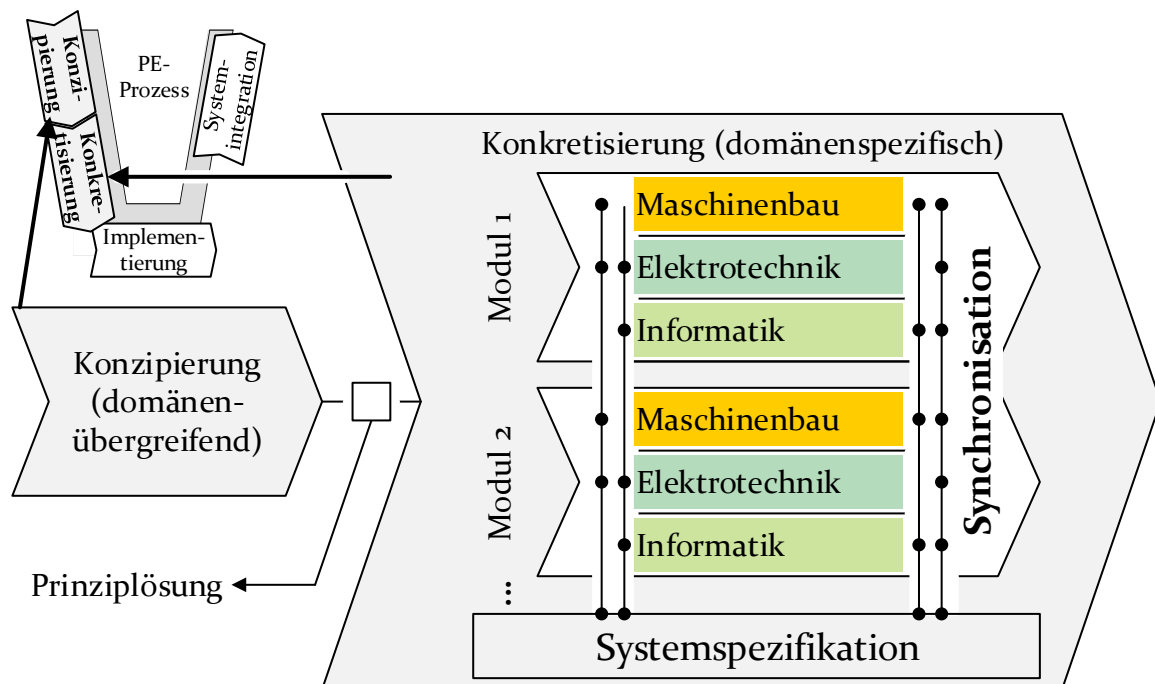


Bild 10: Domänen- und modulübergreifender Synchronisierungsbedarf bei der Entwicklung fortgeschrittener mechatronischer Systeme [49, 50]

Die moderne Interpretation des MBSE sieht ebenfalls ein konsistentes Datenmodell vor, das für effizient ablaufende und transparente Prozesse bei der Entwicklung hoch digitalisierter Produkte unverzichtbar ist [48]. Daran angelehnt kann ein flexibles Simulationsmodell des Produkts während der domänenspezifischen

Implementierung dazu führen, dass die verschiedenen Domänen sowie Entwicklungsteams unterschiedlicher Produktmodule an einem gemeinsamen Simulationsmodell arbeiten.

Auf diese Weise können lediglich separiert nutzbare Teilmodelle angekoppelt werden, die innerhalb der Domänen und Entwicklungsteams gepflegt und verwendet werden. Durch ein an domänen- und modulspezifische Sichtweisen adaptierbares Simulationsmodell des Produkts, das domänen- sowie teamübergreifend eingesetzt werden kann, kann ein kollektives Systemverständnis geschaffen und dadurch eine gesteigerte Interdisziplinarität erreicht werden, die heutzutage erforderlich ist [51].

Die Notwendigkeit für ein flexibles simulationsfähiges Produktmodell wird anhand des in Bild 10 dargestellten Entwicklungsprozesses für fortgeschrittene mechatronische Systeme weiter unterstrichen. Die beiden grau hinterlegten Pfeile stellen unterschiedliche Entwurfsdetaillierungsschritte im V-Modells dar. Die Konzipierung bzw. der Entwurf liefert eine Prinziplösung, welche der Ausgangspunkt für die herkömmliche Dekomposition in die drei Engineeringdomänen ist. Der Unterschied zum herkömmlichen Verfahren nach der VDI-Richtlinie 2206 besteht jedoch darin, dass die Entwicklung und Integration zu einem ganzheitlichen Prozess zusammenfassbar sind. Dies wird durch die Synchronisation zwischen Modulen bzw. Komponenten sowie Interdisziplinarität der Domänen möglich. Diese enge Vernetzung ist im Zeitalter der Digitalisierung erforderlich, um die zahlreichen Informationen zwischen den komplexer werdenden Komponenten von Produkten zu beherrschen. [49]

Der Entwurfsprozess mit integrierter multiphysikalischer Simulation nach FISHER wird in der Praxis bereits beherzigt, was daran deutlich wird, dass entsprechende Aktivitäten schon heute weit verbreitet sind. In der Eisenbahnforschung legen alleine die vorhandenen wissenschaftlichen Abhandlungen zur Simulation von Triebzügen zwecks Analyse der Längsdynamik die Notwendigkeit der Simulation des Systemverhaltens nahe. Längsdynamik bezeichnet dabei kinetische Wechselwirkungen zwischen den Waggonen in Fahrtrichtung. WU et al. haben die vorhandenen Arbeiten und Ansätze zusammengefasst [52]. Daraus geht hervor, dass sich mehr als 50 Veröffentlichungen mit der Untersuchung miteinander wechselwirkender Zugkomponenten befassen. Der Fokus ist dabei vielfältig; unterschiedliche Simulationsmodelle dienen der Untersuchung der Auswirkung des Bremsystems, des Antriebs oder der Umgebung auf das kinetische Verhalten während des Betriebs. Die untersuchten Verhaltenseigenschaften schließen u. a. Längsschwingungen zwischen Waggonen, Schwingungen innerhalb von Waggonen, Energieanalysen sowie -optimierungen, Entgleisungsverhalten etc. ein. Diese Beispiele betreffen insbesondere bereits fertig entwickelte Züge. Das dadurch gesteigerte Systemwissen kann jedoch bei der Entwicklung neuer Züge eine wichtige Rolle zur Vermeidung falsch ausgelegter Komponenten spielen. Noch entwicklungsnaher ist ein weiteres Beispiel, was die Herausforderung der Integration

neuentwickelter Softwaremodule in die Zugsteuerung aufzeigt. Da das durch die Integration neuen Steuerungsverhaltens beeinflusste Systemverhalten nicht vollständig vorhergesehen werden kann, müssen Fehler durch Funktionstests ausgeschlossen werden. In einer Anwendung wurden dafür reale Steuerungshardware und Modelle eines Zuges in einem Labor eingerichtet, anhand derer Software- und Komponentenentwürfe in Echtzeit getestet werden können. Durch Echtzeitsimulation von Steuerungssoftware bzw. Komponenten in einer virtuellen Simulationsumgebung können auf diese Weise die Auswirkungen der Komponenten auf das Gesamtsystemverhalten getestet werden [53]. Die Komplexität von Triebzügen erfordert für einen fehlerarmen Systementwurf eine Vielzahl von Modellen, damit alle nötigen Tests durchgeführt werden können. Sie stellen ein valides Verhalten des Gesamtsystems aufgrund korrekt miteinander wechselwirkender Komponenten in unterschiedlichsten Betriebssituationen sicher.

Der Absicherungsbedarf des Systemverhaltens durch effiziente Modultests ergibt sich bei vielen komplexen Produkten. Somit finden Industrie 4.0-verbundene Eigenschaften, wie beispielsweise ein hoher Vernetzungsgrad und vorausschauende Systeme, immer stärkeren Einzug in die Automobilindustrie [54]. Allgemein lässt sich eine stärkere Durchsetzung dieser neuen Produkteigenschaften in der Gesamtheit der in Deutschland hergestellten mechatronischen Produkte feststellen [55].

Für entwicklungsbegleitende, virtuelle Integrationstests der unterschiedlichen Module fortgeschrittener mechatronischer Systeme ist ein modular aufgebautes Simulationsmodell des Produkts erforderlich. Zum einen muss das Modell Schnittstellen aufweisen, um Modulmodelle anzukoppeln, die in den Domänen entwickelt werden. Somit können die zu testenden Eigenschaften ausreichend realitätsgetreu simuliert werden. Zum anderen müssen durch das Modell die Grundeigenschaften mechatronischer Produkte verkörpert werden. Nur wenn diese in Simulationsmodellen vollständig abgebildet werden, erreichen die Modelle die in den virtuellen Integrationstests geforderten Funktionalitäten.

Die Entwicklung komplexer mechatronischer Produkte ist darüber hinaus ein kontinuierlicher Prozess, bei dem eine Komposition möglicher Module und Komponenten gesucht wird, die die geforderten Funktionalitäten fehlerfrei und effizient umsetzt. Virtuelle Integrationstests verschiedener Kombinationen können jedoch nur durchgeführt werden, wenn die Modulmodelle austauschbar und somit beliebig kombinierbar sind. Demnach ist für ein Simulationsmodell zur Durchführung solcher Tests erforderlich, diese Konfigurationsmöglichkeiten effizient umzusetzen. Dafür wird eine Methodik benötigt, Simulationsmodelle verschiedener möglicher Modulkombinationen effizient zu erzeugen.

Die Durchführung virtueller Integrationstest erfordert zusammenfassend ein an die Entwicklungsumgebung koppelbares Konfigurationswerkzeug. Die damit erzeugbaren Simulationsmodelle weisen die Grundcharakteristika mechatronischer Systeme auf, um das virtuelle Produktverhalten nachstellen zu können. Die Modelle müssen modular aufgebaut sein, um reale Produktgliederungen zu verkörpern und somit auch mit domäneninternen Modulmodellen kompatibel zu sein. Außerdem müssen die Module des Modells frei kombinierbar sein, um in den virtuellen Tests anforderungsgerechte Modulkombinationen identifizieren zu können.

Nachfolgend wird die Beschaffenheit der fortgeschrittenen mechatronischen Systeme näher betrachtet, um herzuleiten, welche Funktionalitäten durch Simulationskonfiguratoren für die Generierung entsprechend flexibler Modelle beherrscht werden müssen. Einerseits wird die Systembeschreibung durch die neuen Eigenschaften intelligenter Produkte gegenüber klassischen mechatronischen Systemen konsolidiert. Andererseits werden die Konfigurationsmöglichkeiten solcher Produkte dargelegt.

2.2.3 Notwendige Merkmale von Simulationskonfiguratoren

Zunächst werden herkömmliche mechatronische Systeme nach der VDI-Richtlinie 2206 betrachtet, um nachfolgend fortgeschrittene mechatronische Systeme zu erörtern und die durch Simulationskonfiguratoren zu adressierenden Eigenschaften herauszuarbeiten. Mechatronische Systeme werden im Allgemeinen von Menschen über ein Human Machine Interface (HMI) gesteuert. Die Steuersignale werden mit den Sensorsignalen durch die Informationsverarbeitung in Bezug gesetzt und in Befehle umgewandelt, die von den Akteuren umgesetzt werden. Dadurch wird Energie in das Grundsystem eingebracht, was dadurch stimuliert wird und seine Hauptfunktionen erfüllt. Dabei kommt es zum Stofffluss, worüber hinaus zusätzliche Energie durch die Umgebung in das Grundsystem eingebracht werden kann. Dieses System ist in Bild 11 veranschaulicht. [10]

Komplexe Produkte weisen darüber hinaus einen stetig steigenden Vernetzungsgrad sowie kognitives und autonomes Verhalten auf. Außerdem passt sich ihre Zusammensetzung und Funktionalität dynamisch an sich kontinuierlich aktualisierende Anforderungen an. Das herkömmliche mechatronische System nach der VDI-Richtlinie 2206 ist aufgrund seiner zentralisierten Informationsverarbeitung und -synthese sowie seiner statischen Funktionszuweisung und Zusammensetzung der Komponenten nicht in der Lage, diese Eigenschaften umzusetzen. Zur Entwurfsvalidierung sind neue Ansätze erforderlich, die die Eigenschaften fortgeschrittener mechatronischer Systeme nachbilden können. Zur Ermittlung dieser Eigenschaften werden aktuelle Trends und Unternehmensbefragungen herangezogen.

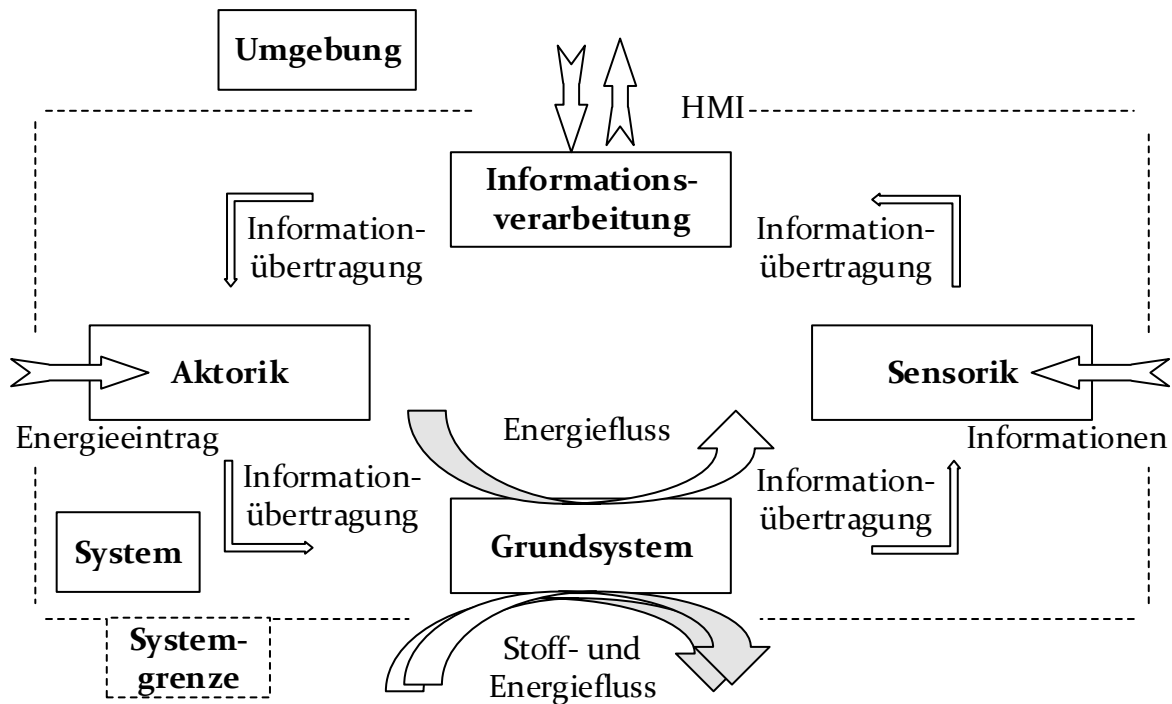
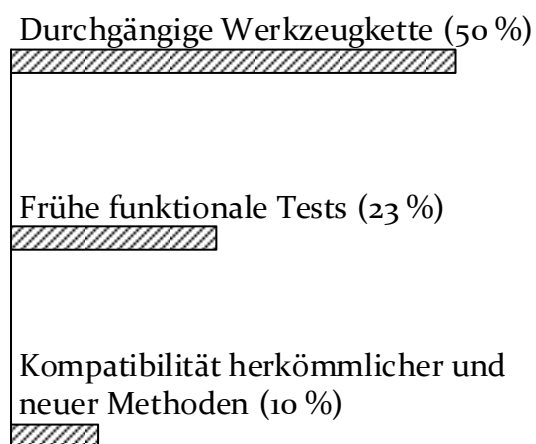


Bild 11: Beschreibung mechatronischer Systeme nach VDI-Richtlinie 2206 [10]

Wie in Bild 12 zusammengefasst ist, spiegeln sich die identifizierten Eigenschaften auch als Bedarfe im Wandel zu Industrie 4.0 bei produzierenden Unternehmen wider. Die in Bild 12a genannten Herausforderungen durchgängiger Werkzeugketten und der Kompatibilität neuer mit herkömmlichen Methoden implizieren für aktuelle Simulationsmodelle eine zu stark ausgeprägte Inkompatibilität bestehender Werkzeuge, Modelle und Simulationsverfahren. [45]

a) Herausforderungen



b) Verbesserungsbedarf

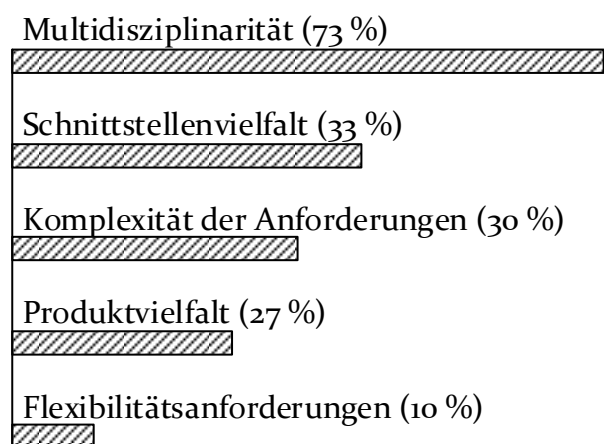


Bild 12: Lücke zwischen notwendigen und etablierten Entwicklungsmethoden zur Beherrschung der Produktkomplexität bei Unternehmensbefragungen [45]

Frühe funktionale Tests sind im Bereich der Simulation ebenfalls eine Herausforderung. Wenn Systemmodelle mittels Schnittstellen als Testumgebung für Komponenten befähigt werden können, lassen sich diese per HiL in einer simulierten Umgebung testen. [45]

Die Herausforderungen werden durch eine Befragung durch die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften bekräftigt. Darin betrachten 36,5 Prozent der Mitarbeiter befragter Großunternehmen und sogar 39,4 Prozent der Mitarbeiter befragter Kleiner und Mittlerer Unternehmen (KMU) die Flexibilitätsanforderungen im Engineering durch steigende Produktindividualisierung als besonders relevant. [56]

Der in Bild 12b dargestellte Verbesserungsbedarf bezieht sich auf bereits vorhandene Eigenschaften, die ausbaufähig sind. Der Wunsch nach gesteigerter Multidisziplinarität repräsentiert den Nutzen durch bessere Zusammenarbeit zwischen den Engineeringdomänen, was u. a. durch Simulation des physikalischen Produktverhaltens erreicht werden kann. Eine bessere Beherrschung der Schnittstellenvielfalt würde für eine bessere Kompatibilität von Modulen, Komponenten aber auch Modellen sorgen. Die steigende Komplexität der Anforderungen führt zu höherer Fehleranfälligkeit von PE-Prozessen. Kontinuierlich mit den Anforderungen abgestimmte Simulationsmodelle, die in der Lage sind, entsprechend flexibel auf Änderungen und Erweiterungen zu reagieren, können zur Fehlervermeidung beitragen. In dieser Umfrage fällt auch der Handhabungsbedarf größerer Produktvielfalt und -flexibilität ins Gewicht, auf die Simulationsmodelle zukünftig reagieren müssen.

Damit geht beispielsweise im Anlagenbau einher, dass die Produkte zunehmend unterschiedliche Produktionsschritte durchführen können müssen. Dies ist mit einer flexiblen Konfigurationsfähigkeit der Anlagen verbunden. Der Aufwand durch virtuelle Inbetriebnahme vergrößert sich durch die verschiedenen Konfigurationsmöglichkeiten und kann deshalb durch multiphysikalische Simulationsmodelle, die die Konfigurationsmöglichkeiten unterstützen, besser beherrscht werden. [45, 57]

Demnach werden sowohl innerhalb als auch außerhalb der Produktionsumgebung Integrationstests für einzelne Produkte nicht mehr ausreichen. Der Grund dafür ist zum einen, dass durch die Produktindividualisierung zukünftig viel mehr Produkte validiert werden müssen. Zum anderen werden durch ein rekonfigurierbares Produkt mehrere Produkte verkörpert, die jeweils validiert werden müssen. Einen deutlichen Anstieg des damit einhergehenden Testaufwands lässt sich nur durch virtuelle Integrationstests bzw. virtuelle Inbetriebnahme anhand effizient konfigurierbarer Simulationsmodelle verhindern.

Um aus den Eigenschaften fortgeschrittener mechatronischer Systeme Anforderungen für Simulationskonfiguratoren ableiten zu können, müssen diese Anfor-

derungen zunächst näher spezifiziert werden. Mit steigender Produktkomplexität, Digitalisierung sowie Produktfunktionalität nehmen mechatronische Systeme zunehmend Eigenschaften intelligenter Systeme an. Grund für den Wandel sind die neuen Anforderungen an Endverbraucherprodukte. Sie sollen kostengünstig hergestellt, dabei aber qualitativ hochwertig und hochgradig individualisiert sein sowie kognitive Funktionen durch Selbstoptimierung verkörpern. Diese müssen ihre Funktionalität bedarfsorientiert an sich kontinuierlich ändernde Umstände anpassen können. Den dafür notwendigen Produktionssystemen wird zur Realisierung dieser Produkte eine hohe flexible Konfigurierbarkeit, Vernetzung sowie viele beteiligte Module und Komponenten abverlangt. Sie werden als ein Wegbereiter für die erfolgreiche Einführung von Industrie 4.0-Technologien gesehen. [59–64]

Tabelle 1: Durch Simulationskonfiguratoren zu adressierende Eigenschaften von fortgeschrittenen mechatronischen Systemen [58]

| Merkmal | Abgeleitete Anforderungen an Simulationskonfiguratoren |
|----------------------|---|
| Komplexität | Modularisierung, Einführung von Gliederungsebenen |
| Individualisierung | Tauschbare Module |
| Produktvielfalt | |
| Interdisziplinarität | Export/Import von Modulen mittels Integration kompatibler Schnittstellen, Nutzung offen zugänglicher Modellsprachen |
| Funktionale Tests | |
| Dynamik | Kommunikationssystem zwischen Modulen, flexibel Vernetzung der Module, Feldbusmodell |
| Vernetzung | |
| Digitalisierung | |
| Hohe Funktionalität | |

In Tabelle 1 sind die Eigenschaften fortgeschrittener mechatronischer Systeme zusammengefasst. Aus ihnen lassen sich die in der zweiten Spalte aufgelisteten Anforderungen ableiten, durch deren Berücksichtigung Simulationskonfiguratoren befähigt werden können, die Merkmale effizient abzubilden.

Steigende Produktkomplexität kann durch eine Modularisierung des Gesamtsystems in Teilsysteme besser beherrscht werden. Die Module selbst müssen dabei weiter modularisierbar sein, um Erzeugnisgliederungsebenen abbilden zu können.

Produktindividualisierung und -vielfalt haben eine flexible Zusammensetzung tauschbarer Module gemeinsam. Darüber hinaus muss zur Konfigurierung von Modellen grundlegend unterschiedlicher Produktvarianten die Möglichkeit

geschaffen werden, Module entsprechend tauschen zu können, deren Modellansatz unterschiedlich ist. Wird diese Eigenschaft durch Simulationskonfiguratoren unterstützt, kann die hohe Flexibilität fortgeschrittener mechatronischer Systeme wiedergegeben werden.

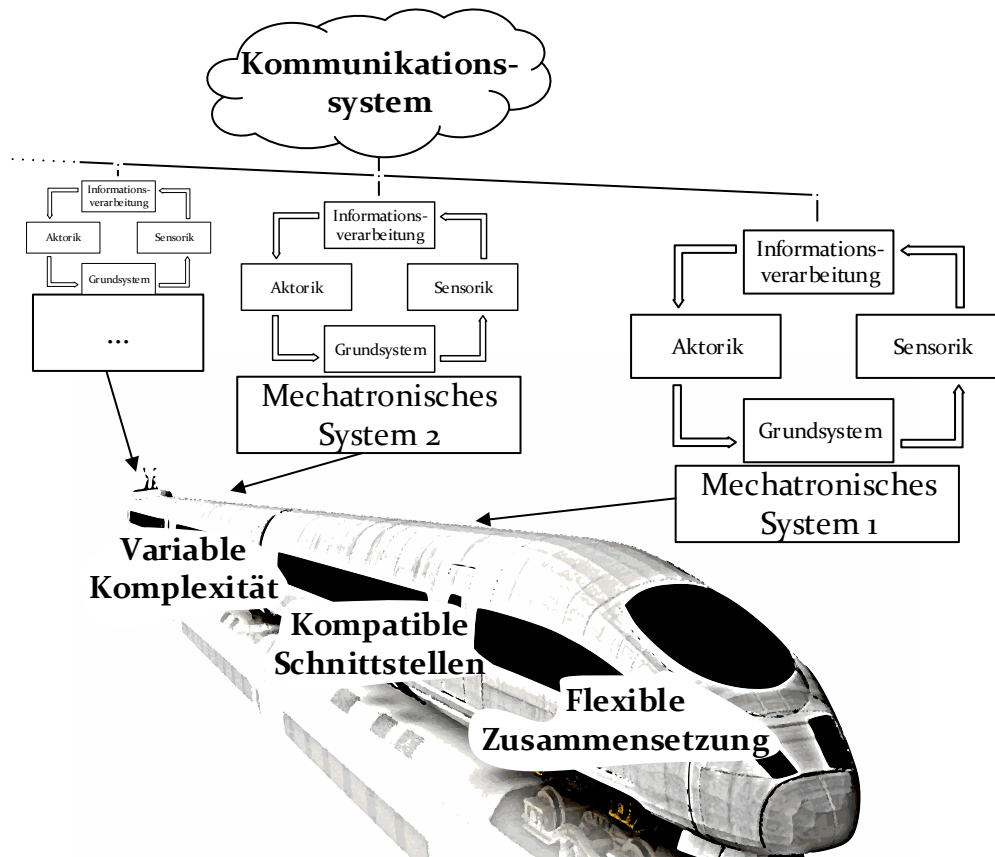


Bild 13: Zu adressierende Eigenschaften von Simulationskonfiguratoren für fortgeschrittene mechatronische Systeme [65]

Für ein interdisziplinär nutzbares Simulationsmodell ist es wichtig, dass Module der verschiedenen Entwicklerteams in das Produktmodell integrierbar sind. Durch eine allgemeingültige Beschreibung, wie dafür eine Modellschnittstelle geschaffen werden kann, sind Import sowie Export der Module möglich. Auf diese Weise lässt sich das Produktmodell auch als Simulationsumgebung für physische Module in HiL-Tests nutzen, wie in Kapitel 5 demonstriert wird.

Um den hohen Anforderungen an die Anpassungsfähigkeit gerecht zu werden, sorgt ein Kommunikationssystem zwischen den Modellmodulen für den nötigen Informationstransport, mittels dessen die Module flexibel vernetzt werden können. Ein Feldbusmodell stellt die entsprechende Kanalisierung der Steuersignale zur Verfügung, angelehnt an Datentransportstrukturen hochcomputerisierter Systeme. Durch diese flexibel zusammengesetzte Kommunikationsstruktur und das konfigurierbare Feldbusmodell wird ein großer, mittels Konfiguration wählbarer Funktionsumfang möglich.

Diese neuen Eigenschaften der angesprochenen Industrie 4.0-Technologien verinnerlichen u. a. moderne Triebzüge zunehmend. Sie müssen durch dynamische Konfiguration flexibel auf unterschiedliche Personenaufkommen reagieren und sich in ihrer Beschaffenheit an die logistischen Anforderungen anpassen können. Dadurch wird die Wirtschaftlichkeit und Schonung von Ressourcen gefördert.

In Bild 13 ist ein an die aktuellen Bedarfe angepasstes mechatronisches System aufgegriffen, das die beschriebenen Anforderungen aufgreift. Darin werden die Module jeweils als herkömmliche mechatronische Systeme mit unveränderlichen Funktionalitäten gesehen, die durch ein übergeordnetes System verwaltet werden. Dafür ist ein Kommunikationssystem erforderlich, das eine flexible Anordnung und Steuerung der Module ermöglicht, indem eine anforderungsgerechte Kommunikation zwischen ihnen stattfinden kann. Auf diese Weise ist die Systemgrenze zwischen Modell und Umgebung nicht mehr fest definiert, sondern kann entsprechend der Anforderungen angepasst werden. [65]

Am Beispiel moderner Triebzüge können die Waggonen als mechatronische Systeme angesehen werden, die mittels der Leittechnik in ein gemeinsames Kommunikationssystem eingebunden sind. Die Zusammensetzung des Zugs und damit die Waggonanzahl sowie -position im Zug bleibt dabei variabel, um den Betreiber zu befähigen, durch verschiedene Konfigurationen u. a. unterschiedliche Passagierzahlen oder Maximalgeschwindigkeiten wirtschaftlich umsetzen zu können. Darüber hinaus müssen Triebzüge ohne Verzögerung in beide Richtung fahren können, was einen Positionswechsel des Fahrers von einem in den anderen Kopfwaggon bedingt. Dabei müssen sich die Rollenverteilungen der waggon-internen Steuerungshardware und -software automatisch neu konfigurieren, und die Kommunikation zwischen den Waggonen muss sich entsprechend anpassen. Die damit einhergehenden Kommunikationsfunktionalitäten lassen sich auf zukünftige mechatronische Produkte übertragen. Individuelle Funktionalitäten werden zunehmend Software-basiert realisiert, wofür eine entsprechend flexible Signalübermittlung nötig ist, die in Simulationsmodelle durch ein Feldbusmodell angeboten werden kann.

Aktuelle multiphysikalische Simulationslösungen für fortgeschrittene mechatronische Systeme weisen diese Funktionalitäten nicht in ausreichendem Maße auf. Unter Beispielen aus der Automobilentwicklung ist ein multiphysikalisches LKW-Modell für HiL-Tests von Steueralgorithmen für die Lenkung zu nennen [66]. In einem weiteren Beispiel wird ein Simulationsmodell von Baumaschinen als HiL-Testumgebung für energieeffiziente Steueralgorithmen vorgestellt [67]. Beide Modelle sind maßgeschneiderte Lösungen zur Simulation eines einzigen Produktes. Die Ähnlichkeit verschiedener Produkte sollte jedoch genutzt werden, was mittels eines adaptiven Simulationskonfigurators möglich wird. Auf diese Weise könnten der Anwendungsbereich und damit der Nutzen der Modelle deutlich ausgeweitet werden. Die dafür nötige Flexibilität wird durch die Funktionalitäten der Beispielm Modelle jedoch nicht unterstützt.

Das in Kapitel 4 vorgestellte Metamodell greift die Bedarfe auf. In verschiedenen Teilmodellen werden schrittweise Teilfunktionalitäten beschrieben, die in der Gesamtheit die Erzeugung eines Simulationskonfigurators mit den in Tabelle 1 beschriebenen Eigenschaften ermöglicht. Mittels dieses Konfigurators können effizient modulare und adaptive Simulationsmodelle generiert werden.

2.2.4 Übersicht bestehender Ansätze zur methodischen Integration von Simulation in die Entwicklungsumgebung

In diesem Abschnitt werden bestehende Ansätze erörtert und gegenübergestellt. Dabei wird evaluiert, inwiefern sich die Modellierungsmethoden für die hierin angestrebten Eigenschaften eignen. Neben der Eignung zur Erstellung multiphysikalischer Simulationsmodelle werden die Möglichkeiten zur effizienten Modellkonfigurierung und ihre Anbindbarkeit an Fremdmodelle mittels Schnittstellen untersucht.

Mit der Herausforderung, die entwicklungsbegleitende MBSE-Datengrundlage zur physikalischen Simulation des virtuellen Produkts zu nutzen, beschäftigen sich viele Arbeiten (u. a. [51, 58, 68, 69]etc.). Dabei werden vorwiegend UML und Systems Modeling Language (SysML) als offen zugängliche Modellsprachen hervorgehoben, da es zwischen multiphysikalischen Modellsprachen, wie z. B. Modelica, die sich für die Simulation multiphysikalischer Systeme eignen, und SysML bzw. UML Synergieeffekte gibt [69]. SysML ist eine Weiterentwicklung von UML, die zur Erstellung von verschiedenartigen MBSE-Modellen notwendige semantische Mittel ergänzt. SysML bietet die Möglichkeit, den Produktentwurf in Form eines grafischen Modells zu dokumentieren, während Modelica die Simulation des physikalischen Verhaltens anbietet. Außerdem besteht die Möglichkeit der Unterstützung von FMI durch SysML-Werkzeuge, wodurch sich Simulationsmodelle in SysML-Modelle einbinden lassen [70]. Die genannten Synergieeffekte treten aufgrund der Kopplung von SysML-Modellen und Simulationsmodellen auf, die in der Regel auf Modelica basieren [71, 72]. Dadurch sind den Produktentwürfen Simulationsmodelle hinthinterlegbar. Außerdem lassen sich weitere Simulationswerkzeuge mit SysML koppeln, wie z. B. MATLAB/Simulink [73].

ModelicaML ist eine Modelica-Erweiterung, mittels der durch Modelica-Werkzeuge komplexe Systemarchitekturen und grafische Produktmodelle entwickelt werden können. Auf diese Weise lassen sich semantisch einerseits PE-Schritte in Form eines Modells einschließlich dem gleichungsbasierten zeitabhängigen Verhalten mittels Differentialgleichungssystemen beschreiben. Andererseits lässt sich das physikalische und steuerungs- bzw. regelungstechnische Verhalten simulieren. Diese Möglichkeiten bietet SysML nicht, wenn auch die Auswertung zeitunabhängiger Gleichungssysteme möglich ist. [74–77]

Die Kombination aus multiphysikalischer Simulation und UML bzw. SysML erzielt u. a. die Integration bestehender Simulationsmodelle in den MBSE-Prozess. Die verfügbaren Funktionalitäten repräsentieren jedoch keine Methodik zur automatisierten Modellkonfiguration, bei der die effiziente und flexible Kombination von Modellmodulen entsprechend alternativer Produktentwürfe durchführbar ist.

Der RFLP-Ansatz ist eine durch CATIA V6 umgesetzte Methode zur Unterstützung von MBSE-Methoden während der Produktentwurfsphase. RFLP steht dabei für *Requirements*, *Functional design*, *Logical design* und *Physical design*. Diese vier Phasen beschreiben die von sukzessive ansteigender Detaillierung geprägten Entwurfsphasen von den Produktanforderungen bis hin zu einem virtuellen Produktmodell einschließlich seiner CAD-Ausarbeitung. Die Modelle, die in den verschiedenen Phasen entstehen, werden in einer gemeinsamen Datenbank abgelegt, auf die die entsprechenden Product-Life-Cycle-Werkzeuge zugreifen. Aufgrund des gemeinsamen Datensatzes findet eine werkzeugübergreifende Vernetzung der Produktdaten statt. Dadurch werden die Zusammenhänge zwischen Entscheidungen in den verschiedenen Phasen offengelegt. Somit können fehlerhafte Systembestandteile bzw. Inkompatibilitäten frühzeitig erkannt und behoben werden. Für die Darstellung des multiphysikalischen Produktverhaltens stehen Modelica-unterstützende Werkzeuge zur Verfügung, wodurch alle damit einhergehenden Vorteile ebenfalls genutzt werden können. [78–80]

Die größte Problematik des RFLP-Ansatzes ist die Werkzeugbindung und die damit verbundene mangelnde Übertragbarkeit der Modelle. Somit ist eine Datenadaption durch Fremdwerkzeuge nicht möglich.

Simscape ist ein Werkzeug für multiphysikalische Simulation von technischen Systemen, welches eine Erweiterung für die MATLAB/Simulink-Umgebung ist. Es ist eine objektorientierte Modellsprache mit vergleichbaren Funktionalitäten wie Modelica. Durch Simulink werden die Fähigkeiten zur Implementierung von Steuerungs- und Regelungsprozessen ergänzt, wodurch mechatronische Systeme darstellbar sind. Simulink unterstützt ebenfalls die FMI-Schnittstelle. [81]

Das auf der MATLAB-Syntax basierte Simscape ist für eine werkzeugübergreifende Modellbeschreibung nicht geeignet, da Simscape-Modelle keine Verbreitung außerhalb der MATLAB-Umgebung aufweisen. Dies ist aufgrund der Bindung an die Simulink-Erweiterung unmöglich.

Über die vorgestellten Sprachen und Methoden hinaus existieren weitere Sprachen zur Beschreibung technischer Komponenten, wie z. B. *Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language* (VHDL), *Analog and Mixed-Signal extensions* (AMS) und *Advanced Continuous Simulation Language* (ACSL). VHDL und AMS eignen sich jedoch lediglich zur Beschreibung von elektrischen Schaltungen. ACSL ist ebenfalls eine Sprache zur Modellierung und

Simulation multiphysikalischer Systeme, die aktuell nicht mehr verwendet wird. [69, 83]

Tabelle 2: Eigenschaften bestehender Ansätze zur Flexibilitätssteigerung und Kopplung von Simulationsmodellen [27, 82, 18]

| Eigenschaft | Modelica, ModelicaML | RFLP-Ansatz | Simscape (MATLAB/Simulink- basiert) |
|---|-------------------------|-------------|---|
| Schwerpunkt physikalische Simulation | ● | ○ | ○ |
| Schwerpunkt Simulation von Steuerungs- und Regelungsprozessen | ● | ○ | ● |
| Schwerpunkt Produktentwicklung und FEM-Simulation | ○ | ● | ○ |
| Multiphysikalische Simulationsmodelle | ● | ● | ● |
| Flexible Modellarchitektur | ○ | ● | ○ |
| Effiziente Modellkonfiguration | ○ | ● | ○ |
| Tauschbare Modellmodule | ○ | ● | ○ |
| Konfigurationsspezifischer Informationsaustausch zwischen Modellmodulen | ○ | ○ | ○ |
| Unterstützung von FMI bzw. anderen Standard-Schnittstellen | ● | ● | ● |
| Offen zugänglicher Quelltext | ● | ○ | ● |
| Werkzeugübergreifende Anwendung | ● | ○ | ○ |

Eine Gegenüberstellung der bisweilen erwähnten Methoden und Sprachen ist in Tabelle 2 aufgelistet. Zusammenfassend lassen sich objektorientierte Modellsprachen aufgrund der Schnittstellenunterstützung, des offenen Quelltexts und der werkzeugübergreifenden Anwendbarkeit als die am besten geeignete Basis für Simulationsmodelle von fortgeschrittenen mechatronischen Systemen identifizieren. Die Möglichkeiten, die Simulationsmodelle dieser Systeme mittels solcher Modellsprachen bieten können, sind bereits in [84] beschrieben und dienen den in diesem Unterkapitel beschriebenen Bedarfen. Die bisweilen fehlenden Eigenschaften werden in Kapitel 4 durch eine Modellierungsmethodik unter Nutzung objektorientierter Prinzipien ergänzt.

2.3 Flexibel konfigurierbare und adaptive Simulationsmodelle

In diesem Unterkapitel wird herausgearbeitet, inwiefern die benötigten, in Unterkapitel 2.3 identifizierten Eigenschaften erfüllt werden. Dabei wird erörtert, welche der in Tabelle 1 herausgearbeiteten Eigenschaften bereits in Simulationsmodellen abgebildet werden können.

2.3.1 Objektorientierte Simulationsmodelle als Wegbereiter zur virtuellen Entwurfsvalidierung

Die Struktur, auf der mechatronische Systeme basieren, findet sich in objektorientierten Softwarestrukturen wieder. Der komponentenweise und deshalb modulare Aufbau spiegelt sich in Klassen und Objekten wider. Ein Modul wird zunächst entworfen, was in der objektorientierten Programmierung einer Klasse entspricht. Dabei werden Eigenschaften und Funktionen definiert und ausgearbeitet. Nach Fertigstellung des Entwurfs wird die Komponente in einer mehr oder weniger großen Stückzahl nach den Vorgaben des Entwurfs hergestellt. Ähnlich diesem Prinzip wird bei der objektorientierten Softwareentwicklung eine Klasse mehrfach in Form von Objekten instanziiert, die die Eigenschaften der Klasse annehmen. Diese Objekte werden für ihren geplanten Einsatzzweck – Berechnungen – verwendet und in diese eingebunden. Außerdem lassen sich Gliederungsebenen mechatronischer Systeme realisieren, indem Objekte Bestandteile von Klassen bzw. anderen Objekten sein können. Aus diesen Gründen werden objektorientierte multiphysikalische Modellsprachen als Wegbereiter zur Modellierung fortgeschrittener mechatronischer Systeme betrachtet. [84, 85]

Die Kommunikation mit anderen Werkzeugen, die für eine interdisziplinäre Entwicklung fortgeschrittener mechatronischer Systeme notwendig ist, wird begünstigt, indem verschiedene Werkzeuge dieselbe Modellsprache verwenden und kompatible Schnittstellen anbieten. Diese Eigenschaften werden am besten durch die Modellsprache Modelica verkörpert, die u. a. aufgrund ihrer großen Kompatibilität bereits proprietäre Sprachen verdrängt hat, wie z. B. Dymola [86]. Neben der gemeinsamen Sprache Modelica können Werkzeuge Modelle über FMU austauschen, wenn sie über die Schnittstelle FMI verfügen, was durch eine Vielzahl an Simulationswerkzeugen bereits unterstützt wird, wie durch z. B. Adams, Amesim, Ansys, die meisten Modelica-Werkzeuge, Rational Rhapsody, MATLAB/Simulink, Simpack und Siemens Product-Lifecycle-Management-Werkzeuge [31]. Die in dieser Arbeit eingeführten Prinzipien sind von allen objektorientierten Modellsprachen adaptierbar. [30, 87, 88]

2.3.2 Flexible objektorientierte Modelle

Die Möglichkeiten objektorientierter, multiphysikalischer Modellierungssprachen bieten Konzepte zur Modularisierung von Systemen und zur flexiblen Kombination von Modulen. Werden die in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Prinzipien angewendet, ergeben sich die Modularisierungsmöglichkeiten. Hauptsächlich muss zwischen Zusammenhängen zwischen Klassen (Bild 14a) und Klasseninstanzen als Eigenschaften einer Klasse (Objekte, Bild 14b) unterschieden werden. Klassen befinden sich in der Bibliothek und können Objekte enthalten, d. h. Instanzen von anderen Klassen.

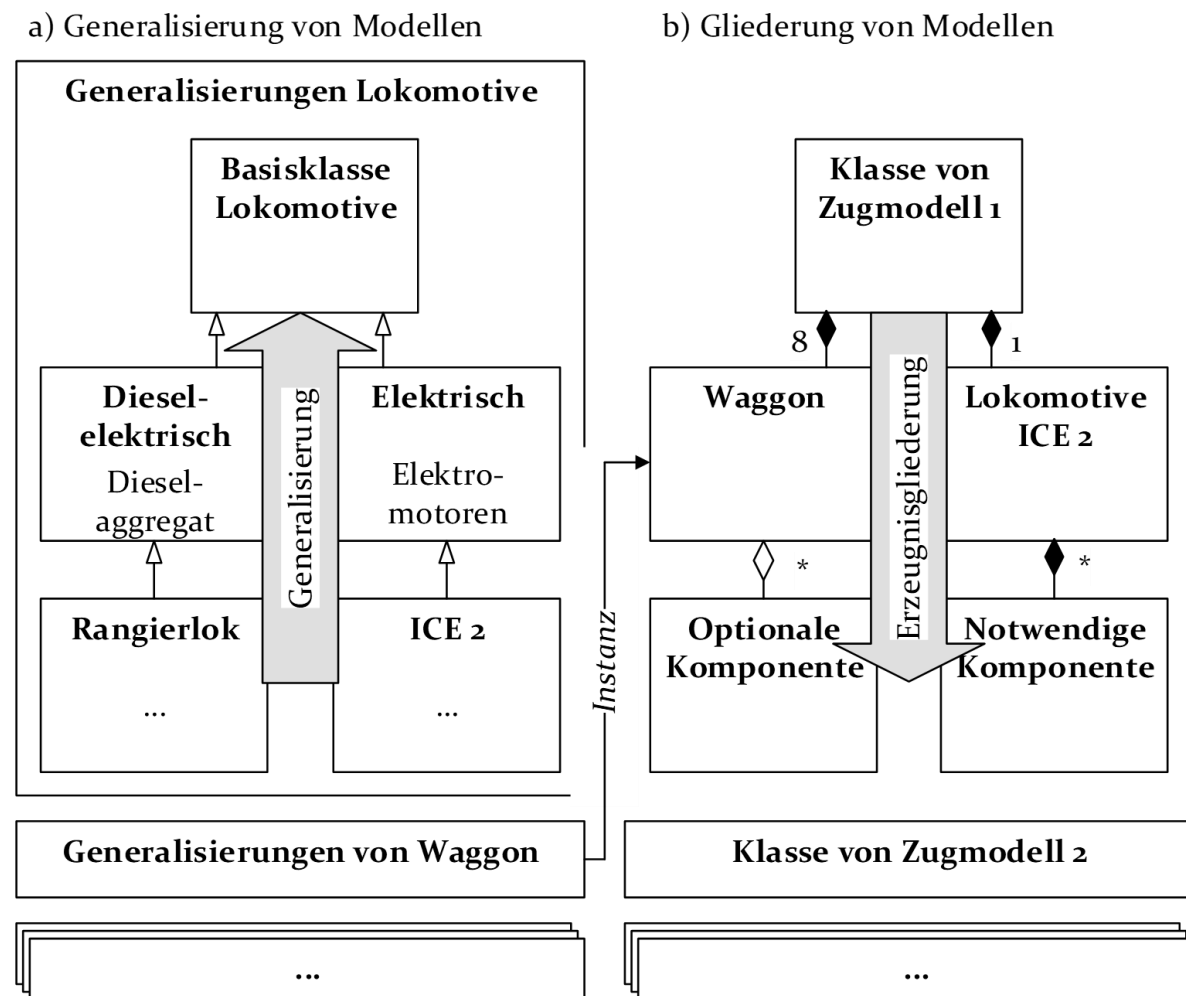


Bild 14: Generalisierung von Modellen und ihre Gliederung [27]

Klassen, die durch Vererbung miteinander in Zusammenhang stehen, beziehen sich auf Bestandteile auf einer beliebigen Erzeugnisgliederungsebene, in Bild 14a exemplarisch für die einem Waggon zugeordneten Klassen dargestellt. Klassen können für alle Bestandteile auf sämtlichen Erzeugnisgliederungsebenen erzeugt werden und repräsentieren die Modelle der realen Baugruppen und Komponenten. Komponenten sind als Objekte in den Klassen der zugeordneten Baugruppen

instanziiert, während ebenfalls Modul-Objekte zur Produkt-Klasse komponiert werden.

Die Anzahl der Generationen einer Klasse richtet sich nach der geeigneten Generalisierung, die für die zu simulierende Komponente bzw. Baugruppe sinnvoll ist. Die verschiedenen Generationen der Klassen eines Modells bezeichnen alle dieselbe Baugruppe bzw. Komponente, sind demnach in der Produktgliederung gleichgestellt und drücken jeweils verschiedene Konkretisierungen bzw. Generalisierungen des Modells aus. Die in der Darstellung zu oberste Klasse stellt die höchste Form der Generalisierung dar und wird zukünftig Basisklasse genannt.

Das Prinzip der Generalisierung ermöglicht die effiziente Verkörperung gemeinsamer Modelleigenschaften. Physikalisches Modellverhalten, das mehrere Modelle gemeinsam haben, muss genau einmal beschrieben werden und kann wiederverwendet werden, indem neue Erben erzeugt werden. Dabei bleibt die Möglichkeit erhalten, Unterschiede darzustellen, indem die Erben um die zusätzlichen Eigenschaften ergänzt werden. [89]

Ein Modell entsteht durch die Verbindung mehrerer Objekte, wie in Bild 14b abgebildet ist. Diese Instanzen sind Objekte ihrer Modellklassen. Das Prinzip bedient sich der Aggregation bzw. Komposition aus Abschnitt 2.1.2. Das Waggonmodell ist die Klasse, während die Waggons innerhalb des Zugmodells Objekte davon sind. Wird eine Klasse eines Objekts modifiziert, ändern sich die Eigenschaften der Objekte in jeder Klasse, in denen diese Objekte instanziiert sind.

Auf diese Weise können Modelle effizient angepasst werden. Dies trifft insbesondere zu, wenn eine Klasse als Instanz in vielen verschiedenen Modellen miteinander verbunden ist, die ansonsten jeweils einzeln angepasst werden müssten. Mittels Aggregation und Komposition lassen sich modulare Erzeugnisgliederungen darstellen, indem die in Modellen enthaltenen Objekte den Komponenten des realen Produkts entsprechen. [27]

Indem den Modulen bzw. Komponenten eines Modells Schnittstellen verliehen werden, lassen sich Verbindungen zwischen ihnen herstellen. Auf diese Weise können physikalische oder informationstechnische Verbindungen mechatronischer Systeme realisiert werden. In Bild 15 ist dargestellt, wie ein derart beschaffenes Simulationsmodell komponiert ist. Das dargestellte Modell enthält dieselben Bestandteile wie das in Bild 6b dargestellte. Die Schnittstellen sind Bestandteile der Komponenten 1 und 2. Über eine Connection, die eine Komponente der Waggon-Klasse ist, werden die mechanischen Modelle miteinander verbunden. [27]

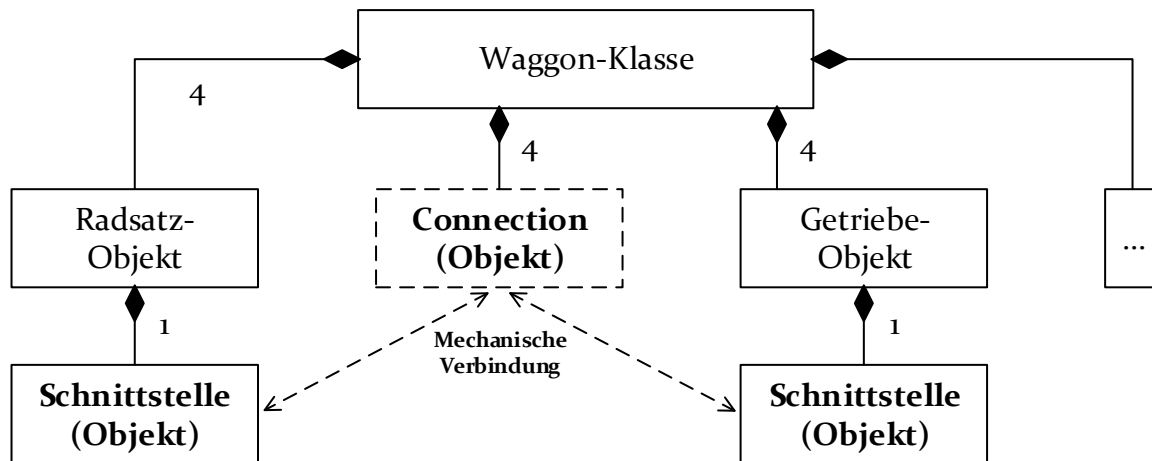


Bild 15: Komposition eines Modells mit Komponenten, die über Schnittstellen und Connections miteinander wechselwirken [27, 90]

Der Grad der Flexibilität objektorientierter Modelle wird durch generische Typen gesteigert, die in Modelica-Terminologie als Replaceable Types bezeichnet werden. Werden Objekte in einer Klasse komponiert und sind diese generisch deklariert, können sie durch einen beliebigen Erben konfiguriert werden. Dafür muss ein Erbe der Klasse erzeugt werden, in der die Objekte instanziiert sind. Bei Erzeugung des Erben werden die generischen Objekte spezifisch konfiguriert. Dieses Prinzip ist in Bild 16 veranschaulicht. Somit kann z. B. ein Modul in Simulationen die geforderten Eigenschaften annehmen, die für eine variantenspezifische Modellkonfiguration nötig sind.

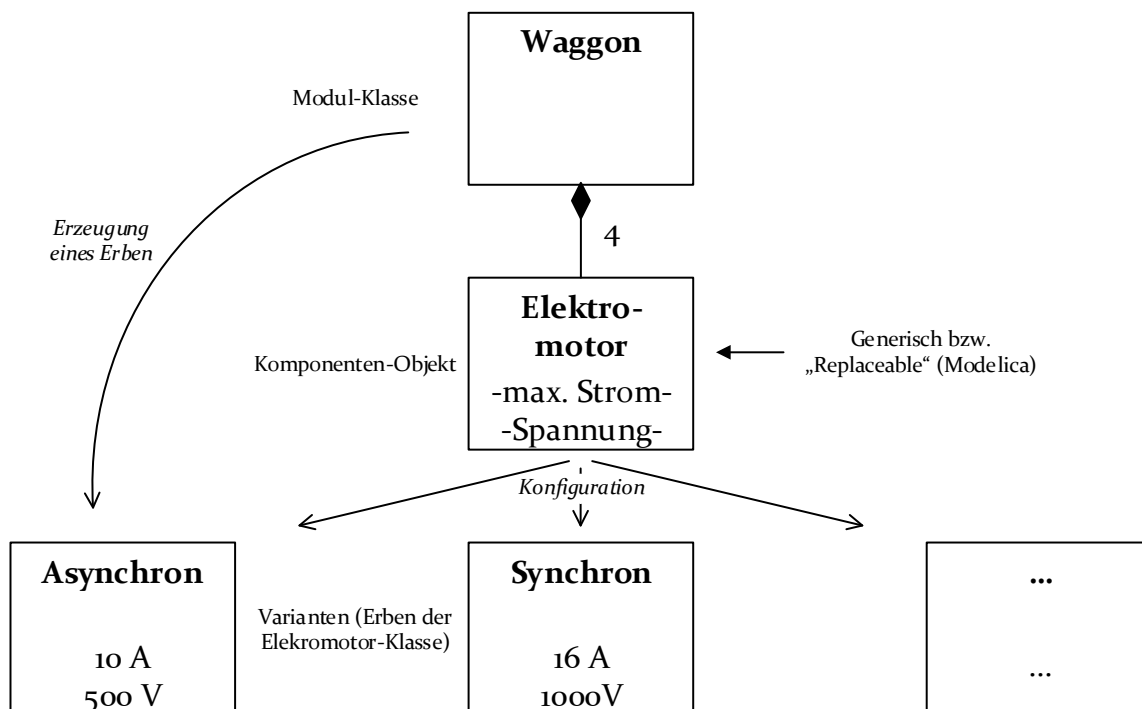


Bild 16: Unterschiedliche Modellkonfigurationen mittels Komposition generischer Objekte [27, 90]

Generische Objekte erlauben eine effizientere Software-Nutzung, was in Bild 17 dargestellt ist. Darin wird die unterschiedliche Erzeugung zwei alternativer TW-Modelle beschrieben. In Bild 17a werden jeweils für Triebwagen A (TW) sowie B die vier spezifischen Erben der Elektromotor-Klasse komponiert und bilden die jeweiligen Waggon-Klassen. In Bild 17b wird ein einziger Erbe erzeugt, in welchem vier generische Objekte der Elektromotor-Klasse komponiert werden. Die in -a durchgeführten Modifikationen lassen sich nun während der Erzeugung eines Erben der Waggon-Klasse durchführen, wobei der gewünschte Erbe der Elektromotor-Klasse ausgewählt und dadurch konfiguriert wird. Auf diese Weise muss das Waggonmodell nicht für jede einzelne Variante komponiert werden, sondern lediglich einmal. Während der Mehraufwand im Beispiel -a noch überschaubar ist, wächst die Effizienz durch Verwendung generischer Objekte mit der abzubildenden Variantenvielfalt.

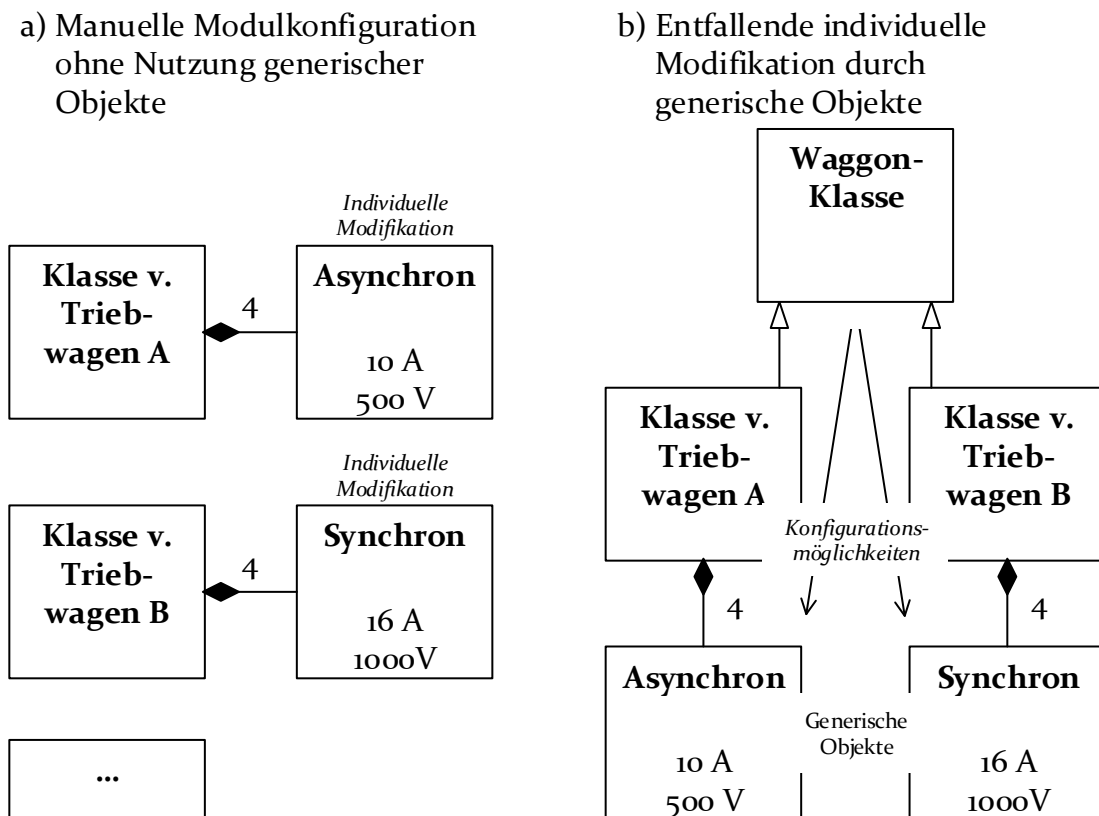


Bild 17: Mittels generischer Objekte entfallende individuelle, redundante Arbeitsschritte zur Modellkonfiguration hinsichtlich der Simulation von Produktvarianten [27, 90]

Der Anstieg der Konfigurationskomplexität von Simulationsmodellen wächst gemäß des Beispiels in Bild 18 überproportional mit zunehmenden Erzeugnisgliederungsebenen und möglichen Ausprägungen. Im gezeigten Modell müssten manuell acht Konfigurationen komponiert werden. Unerwähnt bleiben in diesem Beispiel weitere Varianten durch reduzierte Modellkomplexität, indem Objekte entfallen, wie es beispielsweise bei Zügen mit verschiedenen Waggonanzahlen

der Fall ist. Dadurch steigen die Konfigurationsmöglichkeiten weiter an. Dementsprechend hat die effiziente Nutzung generischer Objekte eine deutliche Reduktion der Konfigurationskomplexität zur Folge.

Im Metamodell in Kapitel 4 wird die Verknüpfung der Nutzung von Basisklassen sowie generischer Objekte methodisch beschrieben. Daraus resultiert die Möglichkeit, mittels einer einzigen Basismodell-Klasse eines Produkts alle relevanten Produktvarianten zu erhalten. Durch Erzeugung eines Erben des Basismodells und gleichzeitiger Konfiguration der darin komponierten generischen Objekte in einem Simulationsmodell nach dem Prinzip aus Bild 17b lassen sich somit sämtliche spezifische Varianten erhalten. Außerdem wird eine variable Modellkomplexität in das Basismodell integriert, was ebenfalls auf den beschriebenen Prinzipien aufbaut. Die Flexibilität wird durch eine durchgängige Anwendung der beschriebenen Methodik über alle Erzeugnisgliederungsebenen erreicht.

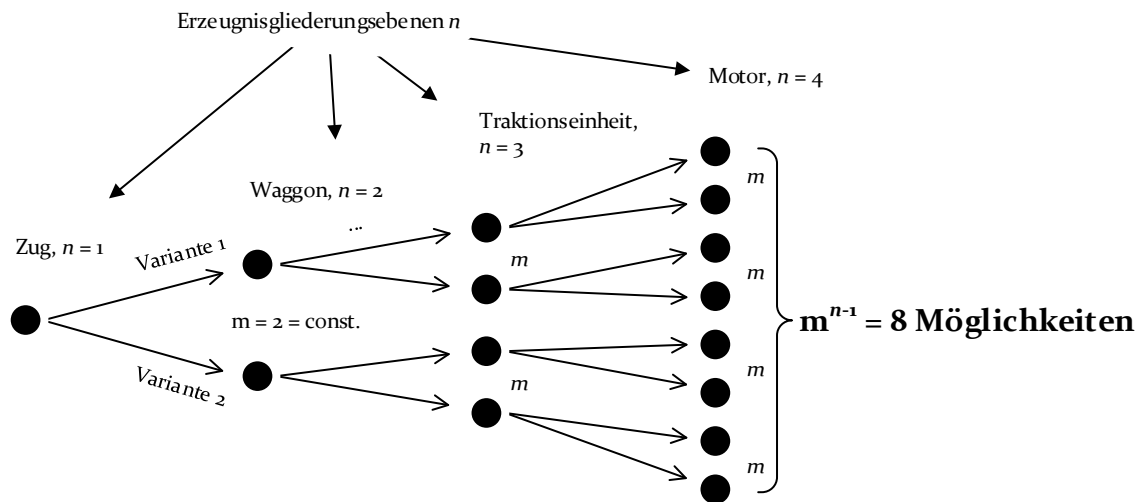


Bild 18: Exemplarischer Anstieg der Konfigurationskomplexität in Abhängigkeit der Varianten m und Erzeugnisgliederungsebenen n

Auf dem Gebiet der modularen Modellgestaltung von Triebzügen wurden vom Autor bereits Vorarbeiten geleistet. Darin sind komplexe Generalisierungsstrategien hinsichtlich der Darstellung von Modellen über mehrere Generationen mittels multiphysikalischer Simulationswerkzeuge beschrieben. Darüber hinaus ist die resultierende Flexibilität bei der Modellkonfiguration beschrieben. Im Rahmen des Metamodells wird eine generell anwendbare Methodik dokumentiert [P1].

2.3.3 Kopplung von Modellen

Damit Simulationsmodelle mechatronischer Systeme keine separierten Lösungen bleiben, sondern in die Entwicklungsumgebung von Produkten eingliederbar sind, ist die FMI-Schnittstelle unverzichtbar. Sie ermöglicht als einzige die werk-

zeugübergreifende Anbindung objektorientierter, multiphysikalischer Modelle an domänenspezifische Simulationsmodelle. [91, 92]

Tabelle 3: Synergieeffekte durch die Integration multiphysikalischer und domänenspezifischer Simulationsmodelle mittels FMU [93–99]

| Einsatzspektrum in der Entwicklung | Erfüllung durch: | | |
|--|----------------------------|---|---|
| | Domänenspezifische Modelle | Interdisziplinäre Modelle ohne FMU-Support | Interdisziplinäre Modelle mit Integration domänenspezifischer Modelle mittels FMU |
| Fokus auf Bauteil-/Prozessebene: <ul style="list-style-type: none"> • Maschinenelemente • Komplexe mechanische bzw. fluiddynamische Bauteile • Elektrische und magnetische Bauteile • Werkstoffauswahl • Energieoptimierung und Wärmeleitung • Prozessauslegung und -optimierung | | | Nachweise: Funktionalitäten durch dynamische Randbedingungen: |
| Fokus auf Produkt-/Ablaufebene: <ul style="list-style-type: none"> • Eindimensionale, zeitabhängige physikalische Größen und Ereignisse • Elektrische, elektronische Systeme • Thermodynamische Systeme • Mechanische und mechatronische Systeme • Elektrische und elektronische Systeme • Informationstechnische Systeme • Physikalische Umgebungsmodelle • Abläufe sequentieller und simultaner Prozesse | | Ereignisse: Lange andauernde Prozesse: | Ereignisse: Lange andauernde Prozesse: |
| Erkenntnisse zur Systemauslegung und -optimierung | | | |
| Simulation mehrdimensionaler physikalischer Größen | | | |
| Fokus auf Produkt-/Ablaufebene mit detailliertem Komponenten-/Bauteilverhalten | | | |

Legende:

Gut erfüllt

Teilweise erfüllt

Nicht erfüllt

Auf diese Weise gelingt es, die Simulation feingranularen Bauteilverhaltens mit dem Produktkontext zu einem ganzheitlichen Verhalten zu verbinden. Herkömmliche multiphysikalische Modelle sind dazu nicht in der Lage, da ihre Modellbeschreibung zu generisch ist. [91, 92]

In Tabelle 3 sind diese Möglichkeiten detailliert bezeichnet. Auf Bauteil- und Prozessebene werden insbesondere FEM- und CFD-Modelle verwendet, die z. B. Festigkeits- und Funktionalitätsnachweisen dienen. Während multiphysikalische Modelle aufgrund ihrer generischen Beschreibung dafür keine Konkurrenz darstellen, werden mittels FMU durch den Import von domänenspezifischen Modellen in ein multiphysikalisches Modell neue Anwendungsfelder möglich. Durch das Umgebungsmodell für die FMU werden die Randbedingungen der FMU realistischer, sodass reale Belastungen besser simuliert werden können. Somit können bessere Aussagen über die Erfüllung von Anforderungen getätigt werden. Bei rein domänenspezifischer Herangehensweise können lediglich Versagensgrenzen und Eigenschaften ermittelt werden, die statisch und vom Systemverhalten unabhängig sind. [100]

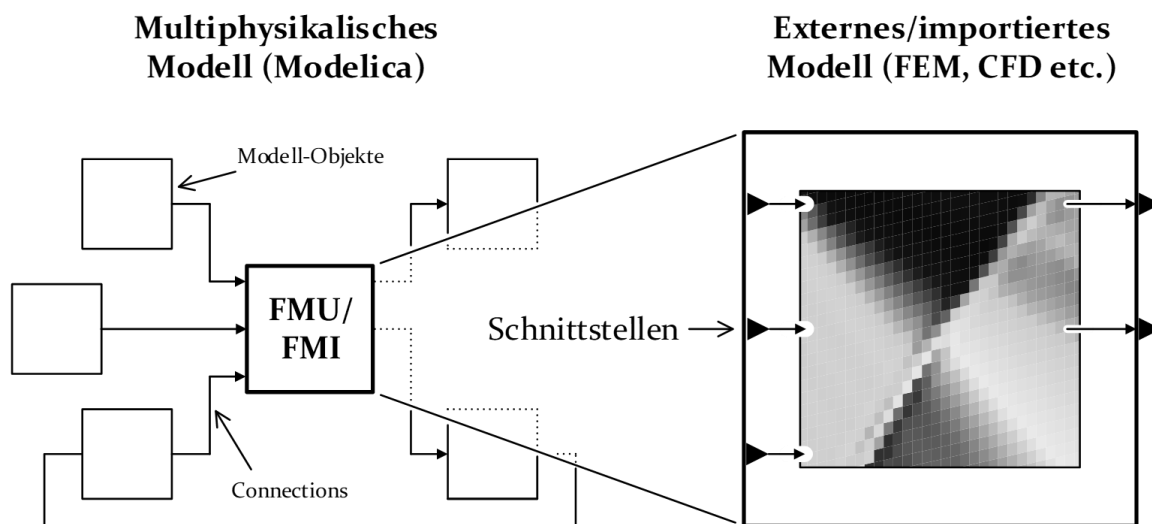


Bild 19: Integration einer FMU bzw. Co-Simulations-Schnittstelle in ein multiphysikalisches Modell [102]

Die Qualität der Simulationsergebnisse multiphysikalischer Modelle wird zudem durch den Import detaillierter Modelle mittels FMU höher, da Prozesse genauer abgebildet werden können. Dadurch lassen sich das systembedingte Fehlverhalten aufdecken sowie quantifizierte Aussagen über die Fehler und ihre Ursachen treffen. Die bei der Berechnung von multiphysikalischen Modellen typischerweise vernachlässigte Ortsabhängigkeit der Variablen kann mittels FMU-Import außerdem überwunden werden. Durch eine flächige bzw. räumliche Berechnung der physikalischen Zustände werden realistische mechanische, thermische oder elektrische Effekte genauer berücksichtigt. [101]

Es lässt sich zusammenfassen, dass die erwähnten Synergieeffekte aus der Verbindung domänenspezifischer Modelle, wie sie für Komponenten oftmals in feiner Granularität verfügbar sind, und multiphysikalischer Produktmodelle resultieren. Deshalb wird im Metamodell in Kapitel 4 eine Methodik beschrieben, die die Integration dafür geeigneter Schnittstellen in das flexibel konfigurierbare Basismodell ermöglicht.

Die Interdisziplinarität, die sich aus der Integration domänenspezifischer und multiphysikalischer Modelle mittels des FMI-Standards ergibt, lässt sich durch die Implementierung von Schnittstellen erreichen, wie in Bild 19 dargestellt ist und im Metamodell genau beschrieben wird. Im linken Teil der Abbildung ist das multiphysikalische Modell skizziert, dem eine solche Schnittstelle verliehen ist. Im rechten Teil der Abbildung ist das zu importierende bzw. mittels FMI und Co-Simulation zu orchestrierende Modell mit seinen Informationsschnittstellen detailliert, über die die während der Simulation berechneten Zustandsgrößen transportiert werden. [102]

Eine Anbindung von multiphysikalischen Modellen über FMI ist sehr nützlich für HiL-Simulationen zwecks Funktionstest von elektronischer Steuergeräte. Über eine entsprechend an die Signale anpassbare, kompatible Schnittstelle lässt sich diese Konfigurationsmöglichkeit in das flexibel konfigurierbare Basismodell integrieren. Dadurch lässt sich das multiphysikalische Umgebungsmodell auf die für die Tests nötige Echtzeit-Hardware exportieren und an die HiL-Komponente bzw. -Baugruppe anbinden.

2.3.4 Multiphysikalische Modelle als Umgebung für Hardware-in-the-Loop-Tests

Wenn sich fortgeschrittene mechatronische Systeme effizient und in Laborumgebungen entwicklungsbegleitend testen lassen, ist die Absicherung der Funktionalitäten besser zu gewährleisten. Feldtests großer Anlagen und Produkte sind oftmals mit einem hohen Platzbedarf verbunden und im Betrieb energieintensiv sowie emissionsbehaftet, was Tests erschwert und damit den Erfolg der Produkte gefährdet. Zudem gelingt der Versuch oftmals nicht, wenn noch nicht alle Baugruppen und Komponenten den entwicklungsseitigen Reifegrad für physische Tests besitzen. Abhilfe schaffen isolierte HiL-Tests mit simulierter Umgebung. Das Verhalten von Baugruppen oder Komponenten kann mittels eines virtuellen Umgebungsmodells detailliert untersucht werden. Durch die Testumgebung lassen sich viele in der Realität auftretende Betriebsfälle simulieren. Dabei wird untersucht, ob sich die Baugruppe oder Komponente gemäß den Anforderungen verhält. Durch eine umfangreiche Ausrüstung im Labor und eine vollständig überwachbare Schnittstelle lassen sich im Vergleich zu Feldtests detailliertere

Verhaltensinformationen gewinnen. Ein weiterer Vorteil dabei ist, dass das Verfahren bereits durchgeführt werden kann, bevor Prototypen existieren, sodass dadurch Entwicklungsfehler vermieden werden können. [53]

Je detaillierter dieses virtuelle Umgebungsmodell das reale Produkt abzubilden vermag, desto sicherere Aussagen lassen sich über das Verhalten der Baugruppe oder Komponente treffen. Dies liegt darin begründet, dass die Wechselwirkungen zwischen der Baugruppe oder Komponente und ihrer Umgebung realistischer simuliert werden können als bei stark abstrahierten oder vereinfachten Umgebungsmodellen. Deshalb ist es sinnvoll, ein multiphysikalisches Simulationsmodell des Produkts als ein solches Umgebungsmodell zu befähigen, das in der Lage ist, die Interaktionen der Baugruppen und Komponenten des Produkts nachzustellen.

Das Umgebungsmodell wird auf ein Echtzeitsystem übertragen und über Input/Output-Baugruppen (I/O) mit zu testenden Baugruppen bzw. Komponenten verbunden. Die Anschlüsse repräsentieren die Schnittstellen zwischen den Baugruppen bzw. Komponenten und ihren Umgebungsmodellen. Eine methodische Beschreibung zur effizienten Erzeugung dieser Schnittstellen hilft, multiphysikalische Modelle in HiL-Simulationen einzubinden [103].

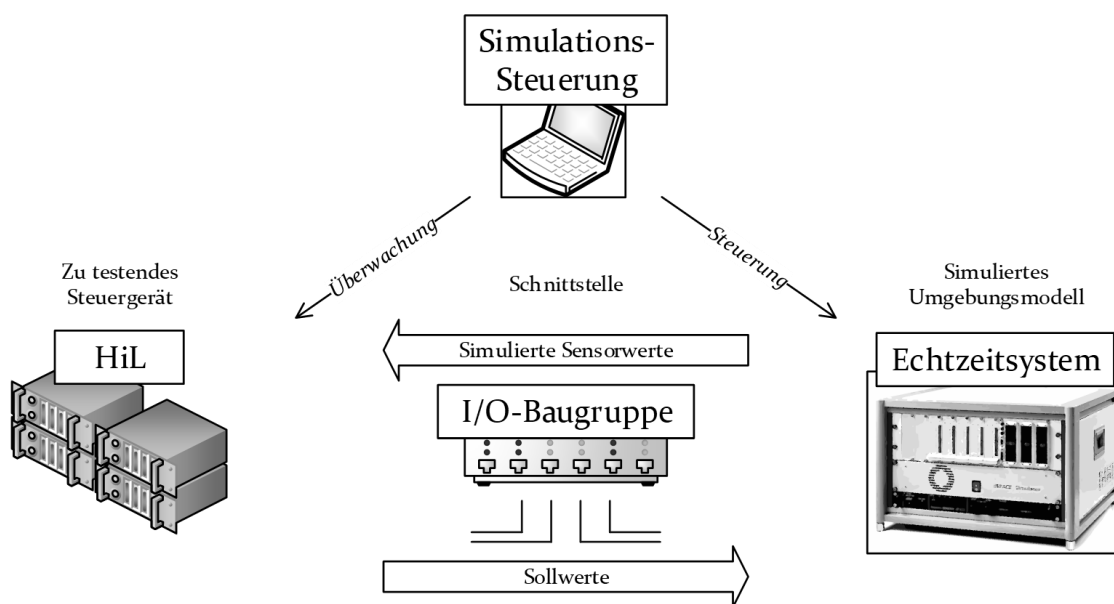


Bild 20: Aufbau von Steuergeräten im HiL-Test (Quelle: dSpace)

Der in Bild 20 dargestellte Aufbau repräsentiert eine übliche Anordnung eines Steuergeräts im HiL-Test, der häufig durchgeführt wird, um die Wirkung der Steuer- und Regel-Software auf das zu steuernde bzw. regelnde System zu prüfen. Das Steuergerät wird während des Tests betrieben, derweilen die Umgebung in Echtzeit simuliert wird. Mittels der Simulationssteuerung wird das Umgebungsmodell während der Simulation derart beeinflusst, dass gezielte Szenarien durchlaufen werden, die unterschiedlichen zu prüfenden Betriebsfällen entsprechen.

Durch Überwachung der Signale des Steuergeräts wird überprüft, ob eventuelle Fehler auftreten, die auf einen dafür verantwortlichen fehlerhaften Algorithmus zurückzuführen sind.

Module eines multiphysikalischen Umgebungsmodells können dabei optional durch FMU/FMI ersetzt werden. Somit lassen sich ebenfalls physikalische Teilmodelle integrieren, die mit beliebigen FMI-kompatiblen Werkzeugen in den jeweiligen Domänen erstellt werden [70, 104]. Auf diese Weise lässt sich ein interdisziplinäres multiphysikalisches Modell mit aufgabenspezifischer Granularität erreichen. Dieses Modell wird in Form einer Bibliothek mitsamt Lösungsalgorithmus auf das Echtzeitsystem übertragen, welches über eine I/O-Baugruppe mit dem zu testenden Steuergerät kommuniziert.

Damit Baugruppen oder Komponenten in HiL-Tests geprüft werden können, müssen multiphysikalische Umgebungsmodelle dafür über die entsprechenden Schnittstellen verfügen, die auf das Echtzeitsystem übertragen werden. Ohne eine konsequent modulare Modellstruktur mit vereinheitlichtem Informationsfluss zwischen den Modulen muss jeder Modell-Export aufwändig vorbereitet werden. Das Umgebungsmodell muss dafür hinsichtlich der Schnittstellenbildung angepasst werden, sodass Sollwerte und simulierte Sensorwerte mit der realen Umgebung übereinstimmen. Eine an reale Signale angepasste Modularisierung der Baugruppen- und Komponentenmodelle erlaubt hingegen eine effiziente Konfiguration [105].

Das Metamodell in Kapitel 4 beschreibt eine Methodik, die dem flexibel konfigurierbaren Basismodell eine weitere Konfigurationsmöglichkeit zum FMU-Export virtueller Umgebungsmodelle für HiL-Simulationen verleiht. Die Methodik kann ebenfalls zum FMU-Import und zur Modellkopplung durch Co-Simulation verwendet werden. Dadurch wird eine durchgängige Anbindbarkeit multiphysikalischer Produktmodelle an ihre Entwicklungsumgebung geschaffen.

2.3.5 Dynamische Vernetzung von Modellen

Wie auch bei realen mechatronischen Systemen müssen multiphysikalische Modelle elektronischer Baugruppen und Komponenten informationstechnisch miteinander verbunden werden, damit zwischen ihnen Kommunikation stattfinden kann. Diese Aufgabe wird bei mechatronischen Produkten von Feldbussen verkörpert, die die Signale für Sensoren und Aktoren zur Steuerung und Regelung führen. Damit die Simulationsmodelle von mechatronischen Produkten angeregt werden können, müssen ebenfalls Busmodelle verwendet werden, die die dafür nötigen Informationen zwischen den Modellmodulen transportieren. Nachfolgend wird deshalb evaluiert, welche Möglichkeiten in multiphysikalischen Simulationswerkzeugen zur Verfügung stehen und inwiefern ihre Funktionalitäten sich für die Modellierung fortgeschrittener mechatronischer Systeme eignen. [10, 106]

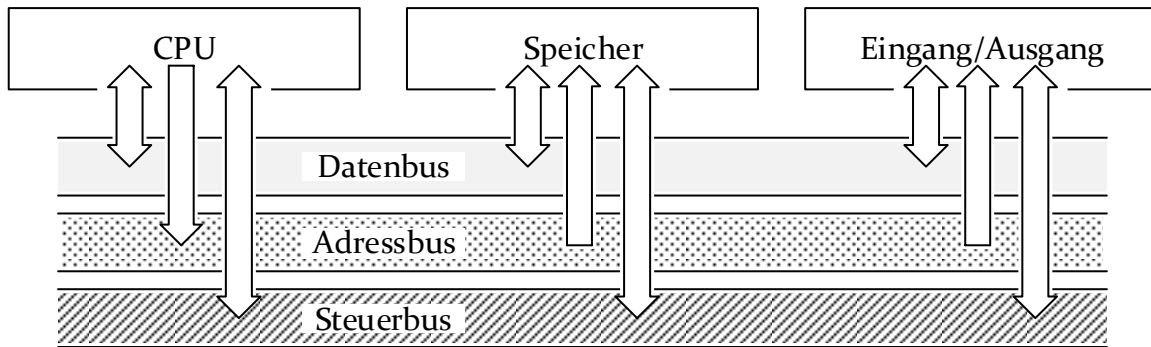


Bild 21: Bus nach von Neumann [107]

In Bild 21 ist die ursprüngliche Architektur eines Busses nach von Neumann beschrieben. Dabei teilt sich der Bus in drei Bereiche. Die zu transportierenden Daten werden im Datenbus kommuniziert. Für die korrekte Zuordnung von Empfänger und Sender ist der Adressbus zuständig. Die Regeln, nach denen die Daten übertragen werden, werden über den Steuerbus vorgegeben. Der Datentransport findet zwischen Speicher und CPU statt. Über den Eingang wird die Maschine gesteuert, während dem Benutzer über den Ausgang Daten visualisiert werden. Für die richtige Zuweisung von Empfänger und Sender wird eine Zuordnung angewendet, bei der Empfänger und Sender eindeutige Adressen erhalten. [107]

Die beschriebene Funktionalität ist zur Nachbildung der Steuerung auch für multiphysikalische Modelle von mechatronischen Produkten erforderlich. Darüber hinaus ist eine realistische Umsetzung der Funktionen von Feldbussen dazu nötig, informationstechnische Umgebungsmodelle an reale Feldbusse einzubinden. Dies ist erforderlich, wenn in realen Produkten mehrere Steuergeräte vorliegen, aber nur ein einzelnes getestet werden soll. In diesem Fall müssen die fehlenden Steuergeräte durch ein Simulationsmodell ersetzt und an den realen Feldbus angebunden werden.

Ein in Modelica beschriebenes Busmodell stellt eine zentralisierte Kommunikationsmöglichkeit zwischen den Modellmodulen bereit. Beispielhafte Anwendungen wurden u. a. von PARYANTO et al. für die Energiesimulation von Industrierobotern sowie von DAMPSEY et al. im Automobilbereich durchgeführt [26, 108]. Der Funktionsumfang des Busmodells ist jedoch zu eingeschränkt. Seine Funktion beschränkt sich auf die Zusammenfassung von Signalen zur Steigerung der Bedienfreundlichkeit. Die Funktionalitäten des vorhandenen Ansatzes sind in Tabelle 4 zusammengefasst und dem Bedarf gegenübergestellt, der durch ein in Kapitel 4 vorgestelltes Busmodell adressiert wird.

Die ersten drei Aspekte sind bereits erfüllt. Alle weiteren Eigenschaften werden durch den aktuellen Modellansatz jedoch nicht erfüllt. Dieser ermöglicht keine Anpassung der Busmodell-Konfiguration an die Komplexität des multiphysikali-

schen Modells, was jedoch für ein flexibel konfigurierbares Basismodell erforderlich ist. Da mit den verschiedenen Modellkomplexitäten, die mit dem Basismodell darstellbar sind, auch geänderte Steuerungsfunktionalitäten einhergehen, muss das Feldbusmodell entsprechend daran anpassbar sein. Somit kann sichergestellt werden, dass Lese- und Schreibrechte sowie Busadressen den Busteilnehmern korrekt zugewiesen werden.

Tabelle 4: Eigenschaften und Defizite des Modelica-Busmodells [90, 109, 110]

| Eigenschaft | Verkörperung durch bisherigen Ansatz |
|---|--------------------------------------|
| Zusammenfassung von Signalen möglich | ● |
| Zentraler Zugriff auf angeschlossene Signale möglich | ● |
| Zuweisung von Bus-Signalen und angeschlossenen Signalen möglich | ● |
| Parametrische Anpassung an Modellkomplexität möglich | ○ |
| Adresszuweisung von Teilnehmern möglich | ○ |
| Funktionsabhängige Kommunikation möglich (Master/Slave) | ○ |
| Kopplung mit realen Feldbussen für HiL-Simulation möglich | ○ |

Für die individuelle Ergänzung eines Kommunikationssystems für jedes mit einem Basismodell erzeugten Simulationsmodell für verschiedene Produktvarianten bieten multiphysikalische Modellierungssprachen grafische Modellierung an. Dadurch können Busmodelle effizient ergänzt werden. In diesem Fall müssen Steuer- bzw. Regelalgorithmen nur ein einziges Mal vorbereitend mit den dafür zugeordneten Busadressen in Verbindung gebracht werden. Durch eine eindeutig zugewiesene Adresse jedes Teilnehmers im Busmodell kann es sich an variable Modellkomplexitäten anpassen. Fortgeschrittene mechatronische Systeme, die sich u. a. durch eine bedarfsabhängig variable Steuerungsfunktionalität auszeichnen, erfordern außerdem eine Anpassung der Kommunikation an diese verschiedenen Funktionalitäten. Demnach ist es für das Busmodell erforderlich, dass verschiedene Teilnehmer sich flexibel als Master bzw. Slave konfigurieren können. Auf diese Weise ist es möglich, dass je nach Konfiguration unterschiedliche Teilnehmer Signale schreiben dürfen (Master), während die anderen Teilnehmer nur Lesezugriffsrechte haben (Slaves). [90, 109, 110]

Im Metamodell in Kapitel 4 wird ein Feldbusmodell eingeführt, welches die geforderten Funktionalitäten erfüllt. Das Busmodell vervollständigt das Kommunikationssystem eines mit einem Basismodell erstellten, variabel komplexen Simulationsmodells durch grafische Modellierung und Parametrierung. Aufgrund seiner Funktionalität ist das Feldbusmodell an reale Busse angelehnt und lässt sich entsprechend zwecks HiL-Simulation an diese anbinden. Auf diese

Weise gelingt beispielsweise die Anbindung eines realen Train Communication Networks (TCN) an multiphysikalische Waggonmodelle, wodurch ein einzelnes Steuergerät mittels eines Echtzeitsystems in HiL-Simulationen getestet werden kann.

2.3.6 Modellierungsmethodik

Es gibt nur wenige allgemeingültige Methoden, die den Modellierungsprozess mechatronischer Produkte mit multiphysikalischen Modellierungssprachen beschreiben. Die detaillierteste und am häufigsten zitierte Methode ist von FRITZSON beschrieben [27, 82, 18]. In Bild 22 ist der Prozess in das V-Modell der Softwareentwicklung überführt dargestellt.

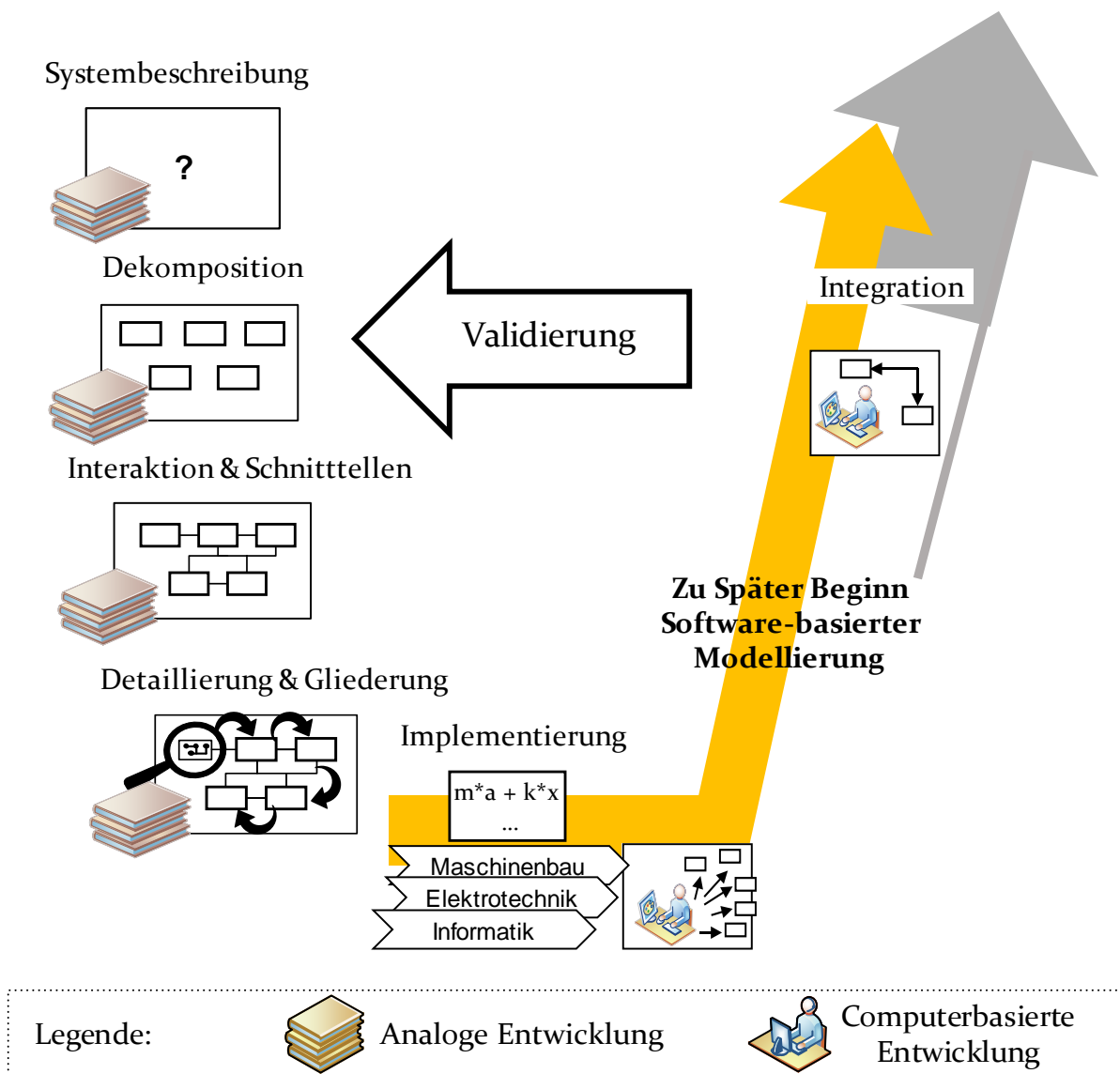


Bild 22: Entwicklungsprozess eines multiphysikalischen Simulationsmodells [27, 82, 18, 111]

Im linken Schenkel des „V“ ist die sukzessive Entwicklung eines Modells des zu simulierenden Systems beschrieben, welche grafisch und textbasiert vollzogen wird. Im Scheitelpunkt findet die Erstellung der multiphysikalischen Modelle im Modellierungswerkzeug statt. Dabei wird das vorher manuell entworfene Modell in Form eines Software-Modells dupliziert. Im rechten Schenkel des „V“ findet die Integration und Validierung der Module bzw. Modelle statt.

Das Vorgehen weist zwei wesentliche Verbesserungsbedarfe auf. Zum einen ist es inkonsistent, da die in grafischer Form bzw. textuell vorliegenden Ergebnisse der Entwicklungsschritte während der Implementierungsphase im Modellierungswerkzeug wiederholt werden müssen, damit das digitale Modell des zuvor analog erstellten Entwurfs entsteht. Die nachträgliche Integration ist die digitale Nachbildung der analog entworfenen Modul-Interaktion und Schnittstellen.

Zum anderen mangelt es den resultierenden Modellen an wichtigen Funktionalitäten. Demnach fehlt die methodische Einbindung objektorientierter Prinzipien, um mittels eines einzigen generischen Basismodells Simulationsmodelle effizient an die variable Komplexität und Konfiguration verschiedener Produktvarianten anpassen zu können. Der beschriebene Prozess erfordert für jede Variante die Erstellung eines eigenen Modells, wobei Redundanzen auftreten.

Damit in Entwicklungsumgebungen vorhandene Werkzeuge und Modelle an multiphysikalische Simulationsmodelle angebunden werden können, bedarf es außerdem einer methodischen Beschreibung für die Integration von FMI. Dadurch gelingt die Steigerung der Interdisziplinarität in der PE.

Des Weiteren bleibt die Ähnlichkeit aller mechatronischer Systeme im Prozess unberücksichtigt. Somit weisen mechatronische Systeme in der Regel Feldbusse auf, über die die steuerungsseitige Kommunikation des Produkts stattfindet. Die Berücksichtigung eines flexibel an die Komplexität und Konfiguration anpassbaren Feldbusmodells sollte in den Prozess integriert werden, damit die Steuerfunktionen möglichst detailgetreu abgebildet werden können. Dies ist nötig, um heterogene Simulationsszenarien durchzuführen, wodurch sich viele virtuelle Testfälle abdecken lassen. Außerdem ist ein realistisches Feldbusmodell unverzichtbar, wenn multiphysikalische Modelle als Umgebungsmodelle für Baugruppen oder Komponenten in HiL-Simulationen getestet werden sollen. Dann können die Modell-Module an den realen Bus angebunden werden, was den Test einzelner Steuergeräte ermöglicht.

Für die Ergänzung der fehlenden Eigenschaften ist eine Modifikation des Prozesses sinnvoll, die ein zentrales Basismodell stellvertretend für eine Produktkategorie zum Ziel hat. Dieses Basismodell soll die durch multiphysikalische Modellierungssprachen zur Verfügung stehenden objektorientierten Funktionalitäten zur Integration der fehlenden Funktionalitäten nutzen. Das Basismodell soll mittels Konfiguration ermöglichen, die nötigen Produktvarianten mitsamt

unterschiedlicher Konfigurationen und Steuerungsszenarien virtuell nachzustellen und als Umgebungsmodell für Steuergeräte in HiL-Simulationen zu fungieren. Dafür müssen zunächst Methoden zur Erreichung dieser Funktionalitäten entwickelt werden, die auf den beschriebenen Grundlagen multiphysikalischer Modellsprachen basieren.

2.4 Fazit

Die hohen Flexibilitätsanforderungen fortgeschrittener mechatronischer Systeme erfordern adäquate multiphysikalische Simulationsmodelle der Produkte. Dann können Produktkompositionen entwicklungsbegleitend durch Simulationen virtuell validiert werden. Die Entwicklung fehlerfreier Baugruppen wird weiter unterstützt, wenn effektive Umgebungsmodelle für HiL-Simulationen erzeugt werden können, wozu sich ein multiphysikalisches Produktmodell eignet.

Tabelle 5: Handlungsbedarf bei der Entwicklungsbegleitenden Validierung mechatronischer Produkte durch Simulation

| Handlungsfeld | Stand der Funktionalitäten | Zusätzlich angestrebte Funktionalitäten |
|---------------------------------------|--|--|
| Modellflexibilität | <ul style="list-style-type: none"> • Modularisierung • Generalisierung • Tausch von Objekten | <ul style="list-style-type: none"> • Basismodell • Individuell mittels Basismodell konfigurierte Simulationsmodelle |
| Anbindung an die Entwicklungsumgebung | FMI/FMU | <ul style="list-style-type: none"> • Einbindung von FMI/FMU in die Konfigurationsmöglichkeiten des Basismodells • Schnittstelle für Anbindung realer Busse |
| Unterstützung von Modul-Tests | <ul style="list-style-type: none"> • HiL-Simulation • Produktspezifische multiphysikalische Modelle | <ul style="list-style-type: none"> • Konfiguration des Basismodells für HiL-Simulation |
| Kommunikation | <ul style="list-style-type: none"> • Signalverbindungen • Rudimentäres Busmodell • Kein realistisches Steuerungsmodell | <ul style="list-style-type: none"> • An spezifische Simulationsmodelle anpassbares Feldbusmodell • Realistische Steuerungsfunktionalitäten |
| Modellierungsprozess | <ul style="list-style-type: none"> • Zu großen Teilen analog • Keine Berücksichtigung von Produktflexibilität • Keine Integration eines Kommunikationssystems • Keine Schnittstellenbeschreibung | <ul style="list-style-type: none"> • Durchgängig digitaler Entwicklungsprozess • Durch Erzeugung eines Basismodells Adaption von Produktflexibilität • Integriertes Feldbusmodell • Integrierte Schnittstellen für Modellkopplung/-transport bzw. HiL-Simulation |

Multiphysikalische Modellsprachen sowie Werkzeuge zur Simulation ihrer Modelle ermöglichen eine objektorientierte und dadurch modulare Art der Modellbildung. Die Möglichkeiten durch die modellspracheneigenen Methoden, insbesondere die des werkzeugübergreifenden, quelltextoffenen Modelica, ermöglichen die Umsetzung vieler Eigenschaften fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Diese Funktionalitäten werden allerdings nur erreicht, wenn die Methoden effizient kombiniert werden. Eine Dokumentation entsprechender Kombinationsmöglichkeiten und den resultierenden Funktionalitäten steht noch aus und wird in dieser Arbeit vorgenommen.

Der Handlungsbedarf, der durch Kapitel 4 aufgegriffen wird, ist in Tabelle 5 zusammengefasst. Zunächst werden Methoden entwickelt, die auf den Prinzipien objektorientierter Modellentwicklung basieren. Dadurch wird ein flexibel konfigurierbares Basismodell erreicht, welches produktspezifische multiphysikalische Simulationsmodelle erzeugen kann. Diese sind per FMI und über Busschnittstellen an die Entwicklungsumgebung anbindbar. Ein Feldbusmodell ermöglicht realistische Steuerungsmechanismen. Die Simulationsmodelle eignen sich für HiL-Simulationen als Umgebungsmodell. Ein angepasster Modellierungsprozess zur durchgängig digitalen Entwicklung eines solchen Basismodells vervollständigt das Kapitel.

3 Längsdynamik- und Energieuntersuchung von Triebzügen

Der analytische Fokus des Simulationsframeworks, das in Kapitel 4 vorgestellt wird, liegt auf der Längsdynamik von Triebzügen. Erhöhte Personenaufkommen führen zu einer steigenden Komplexität der Fahrzeuge. Zum einen reagieren Betreiber und Hersteller darauf durch steigende Waggonzahlen. Andererseits muss für einen wirtschaftlichen Betrieb mittels einer modularen Konfiguration flexibel auf schwankende Passagierzahlen reagiert werden können. Die notwendige komplizierte Steuertechnik und oftmals die großen Energien aufgrund hoher Waggonanzahlen können zwischen den Waggonen Schwingungen in Längsrichtung verursachen. Dafür sind neben trägen Massen Verzögerungszeiten zwischen dem Einsetzen der verschiedenen Antriebe und Bremsen verantwortlich, die durch Signallaufzeiten sowie physikalisch bedingt sind. Darüber hinaus gibt es äußere physikalische Ursachen, wie z. B. Witterungseinflüsse. Das Ziel des Simulationskonfigurators für Triebzüge ist die Simulation von Kräften und Beschleunigungen bei verschiedenartig verursachten Längsschwingungen. Die Modelle ermöglichen außerdem energetische Untersuchungen während Fahrscenarien, die neben den Schwingungssimulationen in Kapitel 6 durchgeführt werden. Dadurch sollen die steuerungsbedingten Betriebskosten reduziert werden.

In diesem Kapitel wird zunächst eine Übersicht über die aktuelle Situation der simulativen Untersuchung von Längsdynamik und energetische Betriebsoptimierung gegeben. Damit ein Verständnis über die zum Einsatz kommenden Modelle entstehen kann, wird dieses Kapitel mit den Grundlagen der im Fokus stehenden Zugtechnik weitergeführt.

3.1 Stand der Forschung

Dieses Unterkapitel ist in zwei Abschnitte aufgeteilt, die die relevanten Vorarbeiten für die Anwendungen des Zug-Simulationsframeworks in Kapitel 5 enthalten. Dabei adressiert Abschnitt 3.1.1 die darin erwähnten Schwingungsuntersuchungen, während Abschnitt 3.1.2 die bisherigen Arbeiten im Bereich der Energieuntersuchung von Zügen darstellt, die ebenfalls in Kapitel 5 aufgegriffen werden.

Im Bereich der Schienenfahrzeugentwicklung gibt es unterschiedliche Validierungsmethoden, die der Erfüllung von Anforderungen verschiedener Interessensgruppen dienen. In Bild 23 ist eine Übersicht über sämtliche Engineering-Methoden in der Eisenbahnbranche und ihre Anwendungsfelder gegeben. Die fettgedruckten Simulationsmethoden betreffen dabei die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationsstudien. Es geht daraus hervor, dass keine Anwendungsfelder vertreten sind, bei denen die Betriebskosten durch Ressourcenverbrauch untersucht werden, was in Abschnitt 5.2.2 durchgeführt wird. In

den folgenden Abschnitten wird eine Detailübersicht über verwandte veröffentlichte Studien zusammengefasst.

| | | | | Anwendungsfeld | Methode | | | | |
|-----------------|----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------------------|
| | | | | | Eigenwertanalyse | Quasistatische Analyse | Simulation | | |
| | | | | | | | Gerade Strecke | Konstanter Kurvenradius | Vollständiges Kurvenprofil |
| Auslegung | | | | Schwingverhalten | X | | X | | |
| Risikobewertung | Kundenanforderungen | Zulassungsprozesse | Sicherheit | Waggonschwingungen in Kurven | | X | | X | |
| | | | | Entgleisungssicherheit | | X | | X | X |
| | | | | Spurführungskräfte | | | X | X | |
| | | | | Stabilität | X | | X | | |
| | | | Fahreigenschaften | | | X | X | | |
| | | | Streckenlast | | X | | X | | |
| | | | Fahrkomfort | | | X | X | X | |
| | | Externe Untersuchungen | Verschleiß | | X | | X | | |
| | | | Nicken, Wanken, Wogen | | | X | X | X | |
| | | | Zuladungseinflüsse | | | X | X | X | |
| | Belastungskollektive | | | | X | X | X | | |

Bild 23: Übersicht der Anwendungsfelder und Validierungsmethoden im Eisenbahn-Engineering [112]

3.1.1 Dynamiksimulation

Das waggonübergreifende physikalische System des Zuges ist schwingfähig, da die mechanischen Kupplungen zwischen den Waggons Verformungen und Relativgeschwindigkeiten zulassen, die zu Zug- und Druckkräften führen. Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen Steuerung, Aktorik und dem aus Feder-Dämpfer-Elementen sowie Massen bestehenden schwingfähigen System können Längsschwingungen entlang des gesamten Zugs angeregt werden, die zu kritischen Betriebszuständen und verringertem Fahrkomfort führen können. Die im Laufe der letzten Jahrzehnte stark gestiegenen Möglichkeiten numerischer CAE-Verfahren erlauben die Simulation dieser oftmals nichtlinearen Prozesse, die analytisch nicht ausreichend genau beherrschbar sind. Im Fokus lagen meist laterale und vertikale Dynamiken innerhalb der Waggons. [113]

Ein Modell des Feder- und Dämpferverhaltens der Fahrgestelle in vertikaler Richtung aufgrund von Anregungen durch u. a. Fahrbahnunebenheiten wurde anhand von Messdaten validiert. Hiermit können kritische Frequenzen und Resonanzen analysiert sowie die Gleichmäßigkeit der Radaufstandskräfte und somit die Entgleisungssicherheit bewertet und verbessert werden. [114]

Des Weiteren wurden Bewegungen quer zur Fahrtrichtung und Kräfte durch die Spurführung simuliert, welche u.a. in Kurvenfahrten auftreten. Durch Nachbildung der Geometrie von Rad und Gleis wurde der Sinuslauf untersucht, welcher durch die abgeschrägten Radprofile entsteht [115]. Neben Komfort- und Sicherheitsaspekten stehen dabei die Verschleißreduzierung von Rad und Schiene im Fokus [116].

Die steigenden Geschwindigkeiten und Waggonanzahlen führten zu stärker werdenden Längsschwingungen und einem gesteigerten Bedarf nach Simulation. Kombiniert mit der nach wie vor eingesetzten, reaktionsträgen pneumatischen Bremse ergeben sich besondere Probleme in Bezug auf die Längsdynamik, die insbesondere bei langen Güterzügen schon im Untersuchungsfokus stand. Die zeitlich versetzt wirkenden Bremsen führen zu zeitlich unterschiedlichen Bremskräften in den Waggons, aus denen Längsschwingungen resultieren. CHOU et al. haben die entstehenden Kupplungskräfte simuliert und mögliche Entgleisungsgefahren untersucht. [117]

Das Verhalten der Kupplungen in Güterzügen mit ausgeprägtem Spiel und Coulombscher Reibung unterscheidet sich jedoch stark von den in dieser Arbeit betrachteten, in Hochgeschwindigkeitszügen vorhandenen Kupplungen [112]. Im Bereich des Fahrkomforts wurde von LING et al. laterale, vertikale und longitudinale Dynamik modelliert [118]. Im Untersuchungsfokus standen rhythmische Anregungseffekte, wie z. B. das Überfahren von Bahnschwellen.

Längsschwingungen aufgrund von zu unterschiedlichen Zeitpunkten einsetzenden Bremskräften sind bekannt und waren bereits die Ursache kritischer Betriebsszenarien von Güterzügen. Im Jahr 2010 haben NASR et al. Simulationsergebnisse zu variierten Totzeiten bei Bremsmanövern bei langen Güterzügen veröffentlicht, worin die Kupplungskräfte simuliert wurden. Dabei hat sich ergeben, dass sie mit steigenden Totzeiten überproportional ansteigen. [119]

Von COLE et al. wurden in Simulationen von langen Güterzügen mit dieselelektrischen Lokomotiven unterschiedlich schnelle Traktionskraftanstiege untersucht, was in Bild 24 veranschaulicht ist. In Bild 24a sind die normierten Zugkräfte und in -b die maximal auftretenden Kupplungskräfte aufgetragen. Dabei wird die Zugkraft stufenweise angehoben, indem pro Anstieg ein konstanter Wert zusätzlicher Schubkraft angewendet wurde. Die unterschiedlich schnellen Anstiege wurden mittels kürzerer Intervalle zwischen den Schubanstiegen erreicht. Die Untersuchungen ergaben, dass im Intervall von fünf bis 0,1 Prozent pro Sekunde ein Maximum bei der simulierten Kupplungskraft bei einem Prozent pro Sekunde

auftrat. Die Untersuchungen sind auf den Normalbetrieb moderner Triebzüge jedoch nicht übertragbar, da Schubkraft nicht in Stufen, sondern stufenlos aufgebracht wird. Die rhythmisch angewendete Zugkraftsteigerung kann als Resonanzanregung des schwingfähigen Zugverbands betrachtet werden. Die bei einem Prozent pro Sekunde steigende Zugkraft hat mutmaßlich einen Rhythmus, dessen Frequenz in der Nähe einer Eigenfrequenz des Systems liegt und somit eine Resonanz anregt. Dieser Effekt ist bei linear steigender Zugkraft nicht zu erwarten, die bei Triebzügen aufgebracht wird. [120]

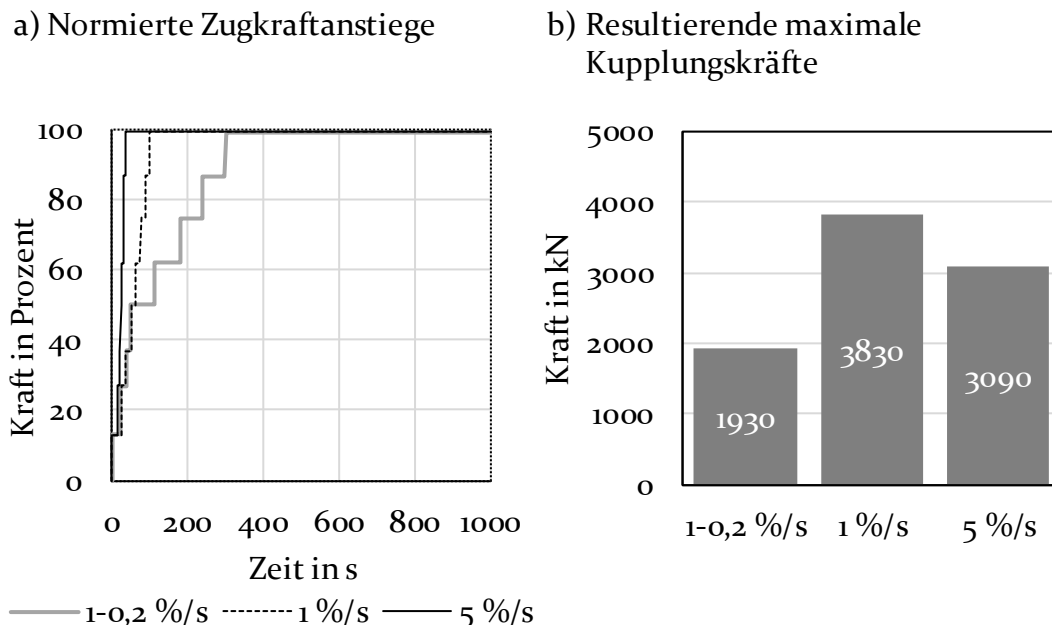


Bild 24: Stufenweise ansteigende Traktionskräfte und resultierende Kupplungskräfte [120]

In einer kürzlich vorgestellten Veröffentlichung von COLE et al. werden umfangreiche Ergebnisse zu verschiedenen Fahrscenarien langer Güterzüge vorgestellt. Darin wird ein detailliertes Kupplungsmodell für lange Güterzüge eingeführt, dessen detailliertes Verhalten eine realitätsgetreue Abbildung von Kupplungs- bzw. Kollisionsszenarien erzielt. Das dort vorgestellte mechanische Grundmodell wird mittels gekoppelter Simulation durch ein eigens entwickeltes Stimulationsmodell angeregt. Auf diese Weise werden verschiedene Stimuli angewendet, wie z. B. Traktions- und Bremskräfte sowie Kurvenkräfte etc. In Unfallszenarien werden Kupplungskräfte untersucht. [121]

Von der amerikanischen Federal Railroad Administration wurde das Programm TEDS (Train Energy and Dynamics Simulator) entwickelt, das die Simulation von Lokomotivzügen beherrscht. Mittels TEDS lassen sich Zugmodelle modular aufbauen und nachträglich erweitern. In der Bibliothek des Simulationsframeworks sind Modelle unterschiedlicher Wagentypen vorhanden. Der Simulator verfügt über eine grafische Benutzerschnittstelle (GUI) und eine zentrale Steuerung. Neben den Fahrwiderständen, Streckendaten, mechanischen Kupplungen und

dem Bremssystem sind die Zugkräfte modelliert. Ziel von TEDS ist die Simulation von Kopplungsvorgängen, Kollisionen, Zugtrennung sowie Druckverläufen im pneumatischen Bremssystem. [122]

An der Universität zu Florenz wurden Anfahrts- bzw. Bremsrucke von Untergrundbahnen simuliert. Im Vergleich zu dieser Arbeit sind die dort betrachteten Bahnen Lokomotivzüge ohne verteilte Traktion. Dafür wurde ein Kupplungsmodell zwischen den Waggons verwendet, bei dem eine geschwindigkeitsabhängige Dämpfung mit einer Hook'schen Feder parallelgeschaltet ist. Das in dieser Arbeit verwendete Modell enthält eine realistischere Kupplungsmodellierung, bei der in der Realität auftretende, nichtlineare Steifigkeiten abgebildet werden. [123]

Ebenfalls an der Universität zu Florenz wurde von FRILLI et al. ein objektorientiertes Zugmodell entwickelt, welches verschiedene Systeme von Güterzügen bis hin zu Hochgeschwindigkeitszügen repräsentieren kann, deren detaillierte Architektur nicht weiter beschrieben wird. Bisweilen wurden Evaluationsergebnisse veröffentlicht, die die Simulationsergebnisse von Bremsvorgängen mittels verschieden starker Bremskraftanforderungen unter Voraussetzung einer statischen Verteilung aus motorischen und pneumatischen Bremsanteilen behandeln. Der Fokus liegt neben den Leistungsverlusten der kombinierten Bremseinrichtungen auf der mechanischen Wechselwirkung zwischen Oberleitung und Stromabnehmer. [124]

Im Rahmen von Vorarbeiten des Autors wurden ebenfalls bereits Untersuchungen zu Längsschwingungen bei Triebzügen durchgeführt [P2–P4]. In einer Veröffentlichung des Autors wurde der Einfluss des zyklischen Berechnens von Sollbefehlen durch Steuergeräte auf die Anregung von Längsschwingungen untersucht. Dabei wurde eine Methodik zur Modellierung dieses Verhaltens und der physikalischen Auswirkungen eingeführt. Wechselwirkungen zwischen dem zyklischen Berechnen der Sollkräfte, die daraus resultierende unstetige Umsetzung durch die Fahrmotoren und der Zusammenhang mit der Anregung von Längsschwingungen wurden darin demonstriert. Darüber hinaus gibt es weitere Veröffentlichungen mit dem in dieser Arbeit verwendeten Modellierungsansatz der mechanischen Kupplungen, deren Anwendungen sich jedoch von dieser Arbeit unterscheiden [112, 125].

Die beleuchteten Arbeiten spiegeln umfassende Auseinandersetzungen mit der waggoninternen Dynamik sowie betriebskritischen Fahrszenarien langer Güter-Lokomotivzüge wider. Bezüglich moderner Personen-Triebzüge während des regulären Fahrbetriebs wurden bislang keine Längsschwingungsuntersuchungen veröffentlicht. Die besondere Herausforderung dabei ist die modellseitige Darstellung der komplexen Wechselwirkungen zwischen Steuerung, Bremse, Antrieb, schwingfähigem System und Umgebungsmodell.

3.1.2 Energetische Betriebsoptimierung

WU et al. haben mithilfe des selbstentwickelten Zugsimulators TDEAS (Train Dynamics and Energy Analyzer/Train Simulator) die Energieeinsparpotentiale bei langen Güterzügen durch Rekuperation untersucht, wenn mehr als eine Lokomotive eingesetzt wird. Mittels TDEAS wurde außerdem die Energiedissipation in mechanischen Kupplungen untersucht, die sich in Bezug auf andere Energieverbräuche, wie z. B. durch Fahrwiderstände bzw. Bremsmanöver, jedoch als vernachlässigbar herausgestellt haben. [126]

Am New Jersey Institute of Technology wurde ein analytisches Verfahren entwickelt, um den Energieverbrauch unter Einhaltung maximaler Traktions- und Bremskräfte und eines Maximalgeschwindigkeitsprofils über die Strecke zu optimieren, indem das Geschwindigkeitsprofil variiert wurde [127].

An der Universität zu Birmingham wurden darüber hinaus unter Vorgabe verschiedener Fahrzeiten mittels Optimierungsverfahren optimale Geschwindigkeitsprofile über die Strecke ermittelt. Die durch Energieeinsparung reduzierten Betriebskosten wurden bei der Optimierung zusätzlich Strafkosten durch Nichteinhaltung des Fahrplans gegenübergestellt [128].

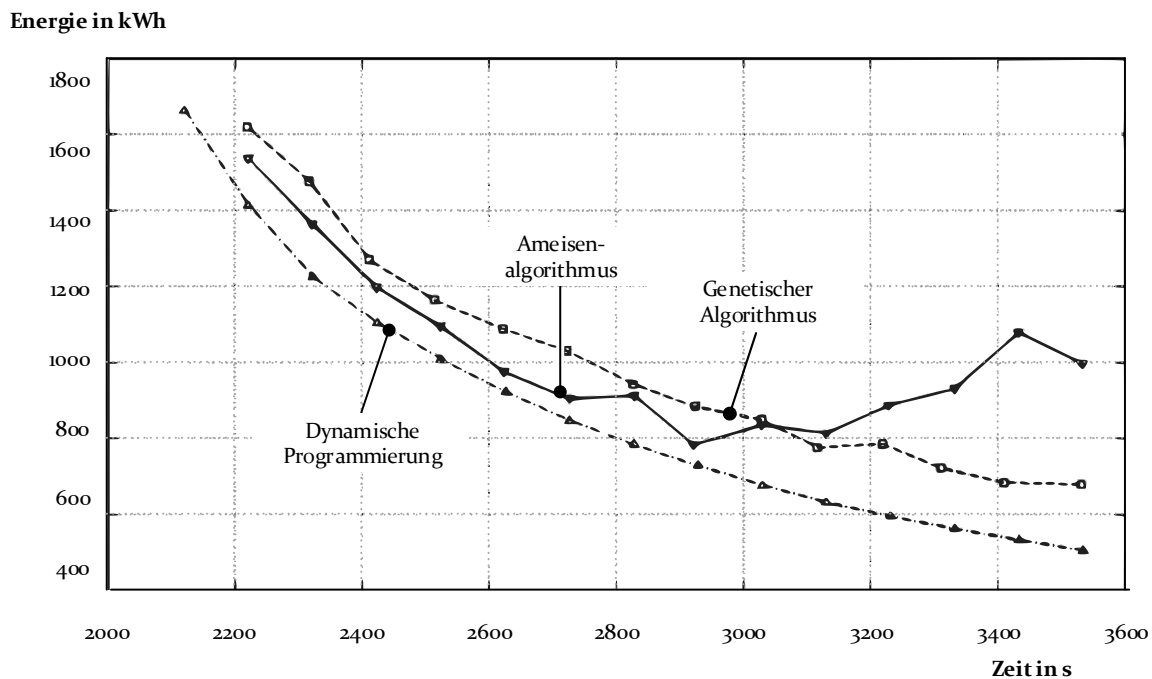


Bild 25: Analytische Fahrzeit- und Energiekostenoptimierung [128]

In Bild 25 sind die Ergebnisse der Zeit- und Energiekostenoptimierung dargestellt. Mit verschiedenen Optimierungsalgorithmen wurde das Geschwindigkeitsprofil optimiert. Dabei wurde die Randbedingung der Fahrzeit variiert. Die

Untersuchungen wurden für verschiedene Fahrzeiten durchgeführt, wodurch sich die interpolierten Kennlinien ergeben. [128]

MIYATAKE et al. haben optimierte Betriebsszenarien ermittelt, bei denen auch Rekuperation durch generatorisches Bremsen miteinbezogen wurde [129]. Dabei war ebenfalls das Ziel, optimale Geschwindigkeitsprofile zu ermitteln. Allgemein ist das Verfahren verbreitet, Geschwindigkeitsprofile unter Einhaltung von Randbedingungen zu optimieren ist. Darüber hinaus sind keine Arbeiten veröffentlicht, die sich methodisch von den bislang genannten Ansätzen abgrenzen.

Bei der Auswahl der zitierten Literatur wird deutlich, dass nur die Parameter untersucht wurden, die vom Triebfahrzeugführer durch Anpassung der Brems- und Antriebskräfte über die Zeit beeinflusst werden können. Die steuergerätebezogenen, meist unbeeinflussbaren Parameter, die das Blending von mechanischer und elektrischer Bremskraft definieren, bleiben unberührt und lassen somit die Frage unbeantwortet, welches Einsparpotenzial in ihrer Variation liegt. Wenn das verschleißbehaftete mechanische Bremsen nicht dem rekuperativen Bremsen mittels der Fahrmotoren gegenübergestellt wird, sind ganzheitliche Untersuchungen nicht möglich. Die bisherigen Analysen decken dementsprechend kein ganzheitliches Modell ab, das Verluste, elektrische Wirkungsgrade und Verschleiß gleichzeitig berücksichtigt. Im Gegensatz dazu waren bisher lediglich Energieeinsparungen das Kriterium. In Anbetracht dessen wird ein multiphysikalisches Modell benötigt, das im Vergleich zu herkömmlichen MBS-Modellen, welche lediglich durch Motor- und Bremsmodelle ergänzt sind, auch ein Steuerungsmodell besitzt, mittels dessen das Verhältnis mechanischer und elektrischer Bremskraft variierbar ist.

Ein Ziel dieser Arbeit ist es daher, das Einsparpotenzial von Triebzugeinheiten bei unterschiedlichen mechanischen und elektrischen Bremskräften unter Berücksichtigung von Zeit- und Leistungsverlusten sowie elektrischen Wirkungsgraden und Verschleißkosten zu analysieren. Dazu wird ein nach der Methode aus Kapitel 4 erstelltes, ganzheitliches multiphysikalisches Modell verwendet, was die nötigen Funktionalitäten aufweist. Abschnitt 5.2.2 greift den in diesem Abschnitt beschriebenen Handlungsbedarf auf, indem wirtschaftliche Analysen anhand von Betriebssimulationen unter Berücksichtigung von Energierekuperation und unterschiedlichen Verhältnissen motorischer und mechanischer Bremskraft durchgeführt werden.

3.2 Anregung der Längsdynamik von Triebzügen

Nachfolgend werden die für das Verständnis der in dieser Arbeit betrachteten Längsdynamik nötigen Grundkenntnisse der Schienenfahrzeug- und Schwingungstechnik erläutert. Außerdem werden die für den Modellansatz nötigen mathematischen Grundkenntnisse dargestellt.

3.2.1 Zusammenhang zwischen Kraft und Bewegung

Ein fahrender Zug kann an das mechatronische System nach der VDI-Richtlinie 2206 angelehnt als System betrachtet werden, welches mit seiner Umgebung wechselwirkt und dabei Energie und Materie austauscht. Er stellt somit ein offenes System dar, welches in Bild 26 dargestellt ist [130, S1].

Die für die Bewegung nötige Energie wird von der Umgebung aus dem Bahnstromnetz gespeist und im Zug in Traktionskräften umgewandelt. Diese werden im mechanischen Rad-Schiene-Kontakt durch Reibung übertragen und arbeiten gegen von der Umgebung eingebrachte Widerstandskräfte.

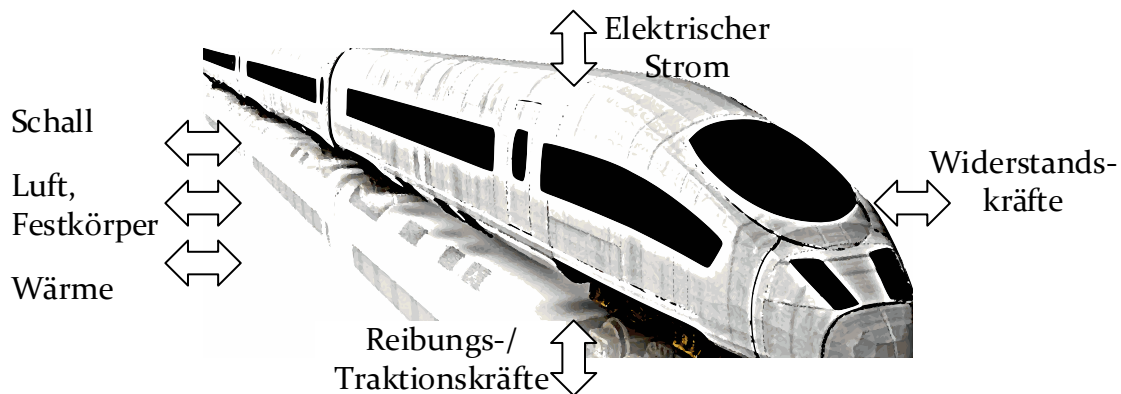


Bild 26: Zug als offenes System [130, S1]

Hierbei entstehen Wärme, Schall und Abrasion durch mechanischen Verschleiß, welche der Zug in seine Umgebung abgibt. Der Zug tauscht außerdem mit seiner Umgebung Luft und Wärme zu Kühlungs- und Klimatisierungszwecken aus. [S1]

$$F_Z = W_{\text{Fahr}} + W_B \quad (1)$$

Für die Bewegung eines Zugs in Fahrtrichtung gilt das in Gleichung 1 aufgeführte Kräftegleichgewicht aus Antriebs-, bzw. Zugkraft und der Summe aller wirkenden Widerstandskräfte. Diese bestehen, wie in Bild 28 aufgeführt, aus geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderständen W_{Fahr} und dem aus der Massenträgheit resultierenden Beschleunigungswiderstand W_B des Zugs. [S1]

Tabelle 6: Fahrzustände in Abhängigkeit der Zugkraft

| F_Z | Resultierender Fahrzustand |
|---------------------|----------------------------|
| $> W_{\text{Fahr}}$ | Beschleunigung |
| $= W_{\text{Fahr}}$ | Konstante Geschwindigkeit |
| $< W_{\text{Fahr}}$ | Verzögerung |

Aus der Höhe der Zugkraft F_Z sowie dem Verhältnis der drei Kräfte zueinander resultiert der Bewegungszustand, dessen mögliche Ausprägungen in Tabelle 6

aufgeführt sind. Für Widerstandskräfte wird der Buchstabe „W“ eingeführt, der in Eisenbahnliteratur vorwiegend Verwendung findet. [S1]

In Bild 27 sind F_Z sowie verschiedene Fahrwiderstände am Beispiel eines Hochgeschwindigkeitstriebzugs dargestellt [131]. Der Luftwiderstand steigt mit zunehmender Geschwindigkeit quadratisch an, während die maximale Antriebskraft aufgrund der Motorleistungsgrenze hyperbolisch mit steigender Geschwindigkeit sinkt, wodurch die maximal erreichbare Geschwindigkeit des Zugs beschränkt ist. [S1]

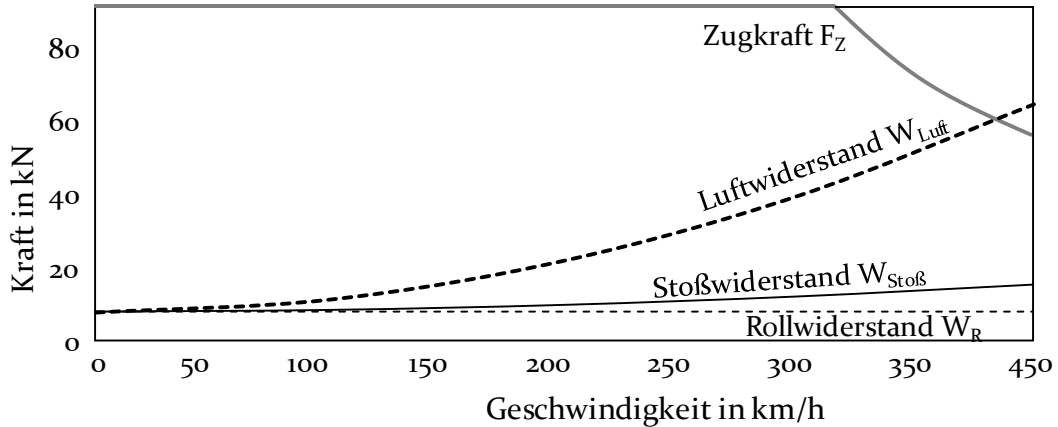


Bild 27: Fahrwiderstände am Beispiel eines Hochgeschwindigkeitstriebzugs nach [S1, 131]

Die auf den Zug in Fahrtrichtung einwirkenden Kräften bestehen aus Widerstands-, Antriebs- und Bremskräften, welche nachfolgend detailliert beschrieben werden. Des Weiteren besteht ein Zug aus mehreren, durch bewegliche Kupplungen mechanisch verbundenen Waggons. Durch Relativbewegungen der Wagen zueinander entstehen zusätzliche Längsschwingungen innerhalb des Zugs. Da diese maßgeblich durch das viskoelastische Verhalten der Kupplungen bestimmt sind, werden deren mechanischer Aufbau und Funktion ebenfalls genauer betrachtet. [S1, 131]

$$F_Z = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r} \cdot i \cdot \eta \quad (2)$$

$$W_{\text{Luft}} = \frac{(c_1 + c_2) \cdot A_i \cdot \rho}{2} \cdot v^2 \quad (3)$$

$$W_{\text{Stoß}} = c_d \cdot m \cdot v \quad (4)$$

$$W_R = f_R \cdot m \cdot g \quad (5)$$

Die Gleichungen 2-5 beschreiben die Kurven in Bild 27. Darin sind v die Geschwindigkeit, n die Drehzahl, i die Getriebeübersetzung, η der Wirkungsgrad, c_1 , c_2 , c_d sowie f_R empirisch zu ermittelnde Beiwerte, A_i die Zugquerschnittsfläche, m die Masse und g die Erdbeschleunigung.

3.2.2 Fahrwiderstände

In Bild 28 sind alle bei einem fahrenden Zug auftretenden Widerstandskräfte dargestellt. Der durch die Umgebung einwirkende Fahrwiderstand ist hierbei in mehrere Arten unterteilt, welche sich durch ihre Größe, Geschwindigkeitsabhängigkeit und Zustandekommen unterscheiden lassen [131]. W_{Str} ist streckenabhängig.

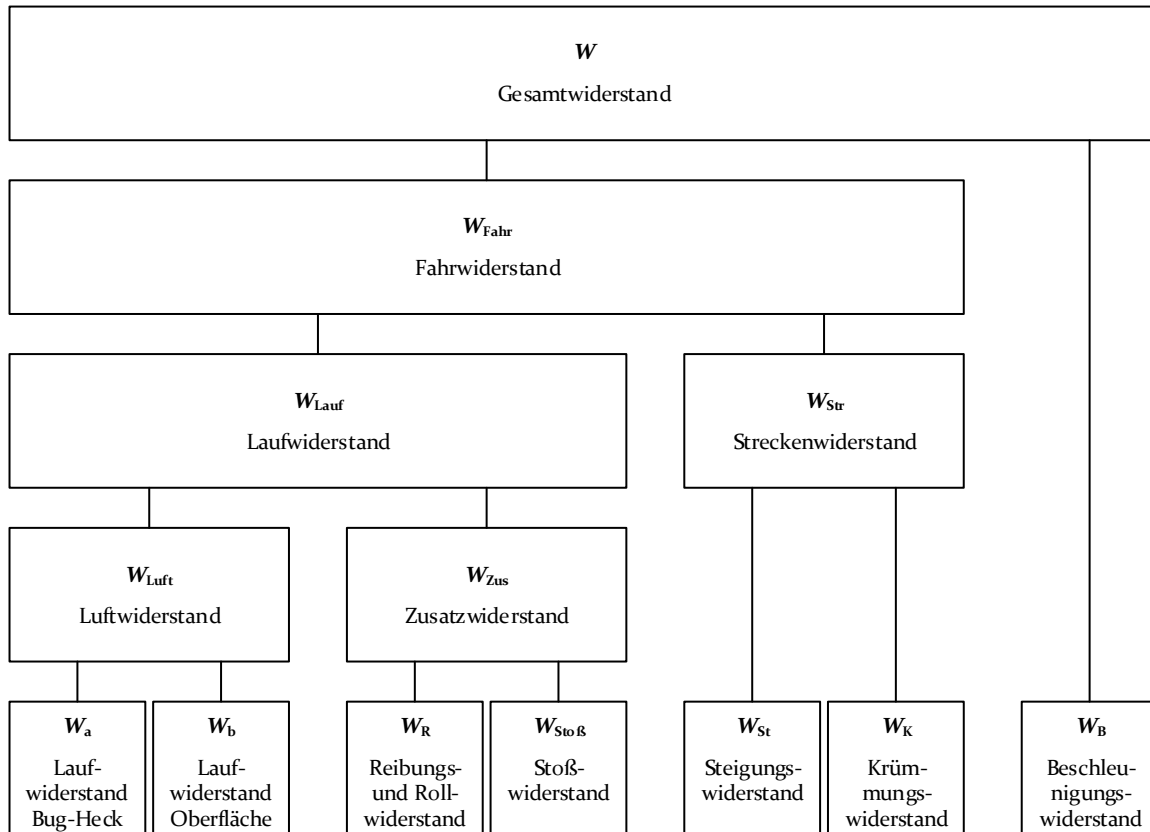


Bild 28: Fahrwiderstandskräfte nach [131]

Für die ganzheitliche Berechnung von Fahrwiderständen gibt es verschiedene Modelle. Entscheidend ist die Wahl der richtigen Einflussfaktoren. Der Fahrwiderstand W_{Fahr} setzt sich gemäß der Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI) aus folgenden Anteilen zu Gleichung 6 zusammen [132].

$$W_{Fahr} = k_0 + k_1 \cdot v + k_2 \cdot m + k_3 \cdot v \cdot m + k_4 \cdot f_t \cdot v^2 + k_5 \cdot f_t \cdot v^2 \cdot m \quad (6)$$

Dabei sind die Faktoren k_0 bis k_5 von der geometrischen und funktionalen Gestaltung des Zugs abhängig. Die beiden Faktoren k_4 und k_5 fließen in den quadratisch mit der Geschwindigkeit wirkenden Luftwiderstand ein. Durch die an der Oberfläche der Wagen vorbeiströmende Luft während der Fahrt entsteht Reibung. An Bug und Heck bildet sich zudem wegen Ausbildens eines Über- bzw. Unterdrucks ein zusätzlicher Widerstand. Als Folge sind die Luftwiderstände an den End-

wagen höher als an mittleren Wagenteilen. Bei der Verteilung des Luftwiderstands (Faktoren k_4 , k_5) wird zwischen Bug, Heck und Mittelwagen unterschieden. f_t ist ein Faktor zur Berücksichtigung von Fahrten in Tunneln. [S1, 131, 132]

Der Beschleunigungswiderstand W_B entsteht aufgrund der Trägheit der zu beschleunigenden Massen und kann entsprechend Gleichung 7 berechnet werden. Hierbei ist m die translatorische Masse des Zugs. Der Faktor λ dient zur Berücksichtigung weiterer Trägheitsmomente, wie z. B. der rotatorischen Massen.

$$W_B = m \cdot \lambda \cdot a \quad (7)$$

Er ist abhängig von der Drehzahl, Geometrie und Masse der drehenden Teile. λ ist bei Waggonen mit angetriebenen Drehgestellen aufgrund der höheren Trägheitsmomente größer als bei Laufwagen (LW). Zusätzlich ist λ zuladungsabhängig. [S1, 131]

3.2.3 Grundlagen des Antriebs

Die Aufgabe der Antriebsmaschinen im Zug ist die Generierung von Zug- und Bremskräften. Die Übertragung dieser Zugkräfte erfolgt über den Rad-Schiene-Kontakt und ist begrenzt durch die Reibkraft, welche abhängig vom Kraftschlussbeiwert μ und der Gewichtskraft des Zugs sind. Bild 29 zeigt die maximal möglichen Radzugkräfte F_Z sowie Fahrwiderstände W_{Fahr} bei unterschiedlichen Steigungen s , Beschleunigungen a und Geschwindigkeiten v [131]. [S1]

Nur bei steigungs- und beschleunigungsfreier Fahrt ($s = a = 0$) kann der Zug seine Maximalgeschwindigkeit v_{max} erreichen, da die motorbedingte Leistungsgrenze nicht überschritten wird. Die gestrichelte Linie bewegt sich hingegen über die Leistungsgrenze hinaus, sodass auf dem Schnittpunkt von Zugkraft und Leistungsgrenze die Maximalgeschwindigkeit unter den gegebenen Werten für s und a erreicht ist.

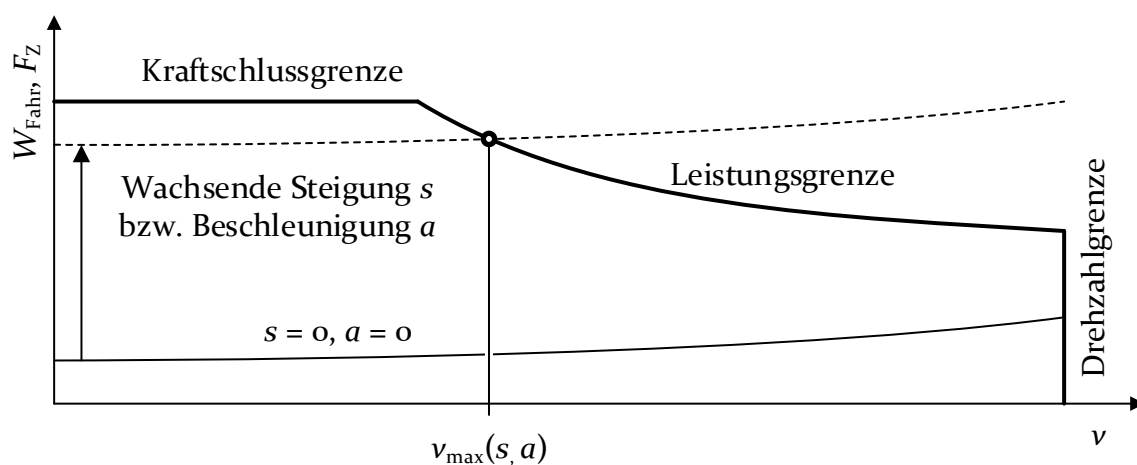


Bild 29: Lastgrenzen und Fahrwiderstände [131]

Die hier betrachteten Fahrmotoren stellen ihre maximale Leistung über einen bestimmten Geschwindigkeitsbereich zur Verfügung. Im Bereich $F_Z = \text{const.}$ wird die Leistung linear mit der Geschwindigkeit angehoben, um ein Schleudern der Räder zu verhindern. Die größte umsetzbare Zugkraft ist dabei ebenso durch den maximal möglichen Kraftschlussbeiwert μ_{\max} begrenzt. Entsprechend der Reibkraft $F_R = \mu \cdot m \cdot g$ ergibt sich für niedrige Geschwindigkeiten daher ein Bereich konstanter maximaler Zugkraft (Kraftschlussgrenze). Der Faktor μ ist abhängig vom Zustand der Schiene und liegt in der Regel zwischen 0,06 für schmierige Schienen und bis zu mehr als 0,3 für trockene und gesandete Schienen. μ sinkt mit steigender Geschwindigkeit leicht, wodurch sich in der Realität eine abfallende Kraftschlussgrenze ergibt statt einer geraden Kennlinie wie in

Bild 29 dargestellt ist [131, 133]. Da bei konstanter Maximalleistung und dem Zusammenhang für Leistung und Geschwindigkeit $P = F_Z \cdot v$ sich die Zugkraft proportional zu $\frac{1}{v}$ verhält, fällt sie mit steigender Geschwindigkeit entlang der Leistungsgrenze hyperbolisch. Oberhalb der Drehzahlgrenze ist auslegungsbedingt keine Geschwindigkeitserhöhung mehr möglich.

3.2.4 Grundlagen des Bremssystems

Züge verfügen über mehrere kombinierbare Bremssysteme. Die herkömmlichen Druckluftbremsen sowie Motorbremsen wirken über den Rad-Schiene-Kontakt. Aufgrund hohen Verschleißes und der Beschädigungsgefahr der Schienen erfordern Zulassungen durch das Eisenbahn-Bundesamt die Einhaltung eines maximalen Kraftschlussbeiwerts, der sich an der UIC-Richtlinie 544-1 orientiert. Der Wert bewegt sich typenabhängig zwischen dreizehn bis 17 Prozent, bezogen auf die Eigengewichtskraft. Zur Einhaltung der erforderlichen Höchstbremswege bedürfen Schnellzüge teilweise weiterer Bremsausrüstung, die direkt auf die Schienen wirkt. [134, 135]

Die ebenfalls verschleißbehaftete Magnetschienenbremse funktioniert mittels eines magnetischen Bremsblocks, der auf die Schiene herabgesenkt wird und durch Magnetisierung eine Anpresskraft erzeugt. Durch Reibung zwischen dem Block und der Schiene wird zusätzliche Bremskraft generiert. Darüber hinaus vermögen Wirbelstrombremsen das Einbringen verschleißfreier Bremswirkung; die durch einen Elektromagneten ins Gleis induzierten Wirbelströme üben eine Kraft entgegen der Fahrtrichtung auf den Magnet aus. Die Fahrgeschwindigkeit wird außerdem durch die Fahrwiderstände verzögert, was bei der Systemauslegung berücksichtigt wird [131].

Bei der elektrodynamischen (ED) Bremse werden die Fahrmotoren generatorisch betrieben. Die so rekuperierte Energie wird entweder in das Versorgungsnetz zurückgespeist oder durch Bremswiderstände in Wärme umgewandelt. Die ED-Bremse ist nahezu zeitverzögerungs- und abgesehen vom Radabrieb, Getriebe- sowie Motorverschleiß frei von Verschleißteilen und wird deshalb und wegen

des Energierückspeisungspotentials bevorzugt eingesetzt. Neben der Strombeschränkung der Motoren kommt die ED-Bremse schnell aufgrund der begrenzten Leistung angetriebener Achsen an ihre Grenze. Um auch bei höheren Geschwindigkeiten die für die gewünschte Verzögerung benötigte Bremskraft zu erreichen, werden daher bedarfsgerecht zusätzlich mechanische Bremsen verwendet, was als Bremsblending bezeichnet wird, bei dem es verschiedene Kombinationsmöglichkeiten der Bremsarten gibt. Je nach Betreiberwunsch können beispielsweise leistungs- oder verschleißoptimierte Strategien umgesetzt werden. Darüber hinaus gibt es auch unterschiedlich graduierte Kompromisslösungen zwischen den beiden Strategien, die in dieser Arbeit simulativ in Bezug auf ihre Wirtschaftlichkeit untersucht werden. [S1]

Die pneumatische Bremswirkung kann rein mechanisch-pneumatisch, indirekt genannt, sowie elektropneumatisch (EP) erreicht werden, d. h. elektronisch unterstützt. Bei der nicht elektronisch unterstützten Bremsung wird die Information des Bremsbefehls durch das Entlüften der durch den gesamten Zug verlaufenden Hauptluftleitung übertragen. Die Steuerventile der Waggons wandeln diesen Druckabfall in einen Anstieg des Bremszylinderdruckes um, zu dem sich die Bremskraft in etwa proportional verhält. Die Übertragung des Druckabfalls dauert bei langen Zügen viele Sekunden, bis sich in den Bremszylindern des letzten Waggons ein wirksamer Druck aufgebaut hat. Die Problematik wurde durch CHOU et al. adressiert, wie bereits in Abschnitt 3.1.1 beschrieben wurde. An den Steuerventilen sind zusätzlich elektronische Schalter installiert. Im Falle von EP-Unterstützung werden diese Schalter durch die Informationsverarbeitung des Zugs angesteuert und veranlassen die Betätigung des Bremsventils. Auf diese Weise kann die Reaktion der Bremsventile deutlich beschleunigt werden. Für den Notfallbetrieb muss jedoch die einwandfreie Funktion der indirekten Bremse nachgewiesen werden. Daraus ergibt sich die Motivation zur multiphysikalischen Simulation der aus den langen Verzögerungen resultierenden Längsschwingungen. Dadurch lässt sich während der Entwurfsphase die Systemauslegung bewerten. [117, S1, 131]

Wie aus Abschnitt 3.1.1 bereits hervorging, verursacht das pneumatische Bremssystem von Zügen, was im Regelbetrieb zum Einsatz kommt, häufig Längsschwingungen. Dafür können einerseits die langsamen Reaktionszeiten, andererseits die starken Fluktuationen der Reaktionszeiten in den verschiedenen Waggons ursächlich genannt werden. Im Abschlepp- oder Notfallbetrieb kann die Längsdynamik zusätzlich verstärkt werden, da die elektromagnetischen Schalter an den Steuerventilen nicht verwendet werden können. Dadurch wird indirekt gebremst.

Über die motorischen und pneumatischen Bremsen hinaus bleiben die weiteren genannten Bremsarten in dieser Arbeit unberücksichtigt. Aufgrund selten erfüllter Anforderungen an die Trasse, die zur Nutzung notwendig sind, und dem

ebenfalls selten auftretenden Einsatzbedarf deckt diese Annahme die meisten Betriebsfälle ab.

3.2.5 Leittechnik

Die Ansteuerung von Zügen geschieht über einen Fahrschalter, der im führenden Waggon installiert ist. Die Fahrbefehle werden über das vorwiegend zum Einsatz kommende TCN, welches aus zwei hierarchisch angeordneten Feldbussen besteht, an die Steuergeräte der Fahrmotoren und Bremsen weitergeleitet. Bis die Aktoren die befohlenen Kräfte und Momente umsetzen, durchlaufen die dafür verantwortlichen Signale teilweise mehrere Rechenzyklen der Steuergeräte und müssen zwischen und über die Busse weitergeleitet werden. Diese Prozesse benötigen je nach Ort im Zug unterschiedliche Zeiträume, die von Millisekunden bis hin zu Sekunden dauern können. Durch die daraus resultierenden verschiedenen Reaktionszeitpunkte der Aktoren kann es zu Relativbewegungen zwischen den Waggons kommen, die zu Längsschwingungen führen können.

Das TCN wurde seit 1990 durch ein internationales Komitee aus Abgeordneten von über 20 Ländern erarbeitet, u. a. einige europäische Länder, USA, Japan und China. Das Ziel war, einen international gültigen Kommunikationsstandard für Züge einzuführen, der die Kommunikation deutlich vereinfachen sollte. Die TCN-Architektur wurde von der Schweizer Bundesbahn seit 1997 in größerem Umfang eingesetzt. Im Jahr 1999 wurde es zur IEC-Norm 61375-1. Die Nutzung von TCN ermöglicht eine flexible Konfiguration von Zügen, sodass Zugverbände nicht unveränderlich aufgebaut sein müssen. Darüber hinaus lassen sich mehr Daten transportieren, z. B. Diagnosedaten etc. [136, 137]

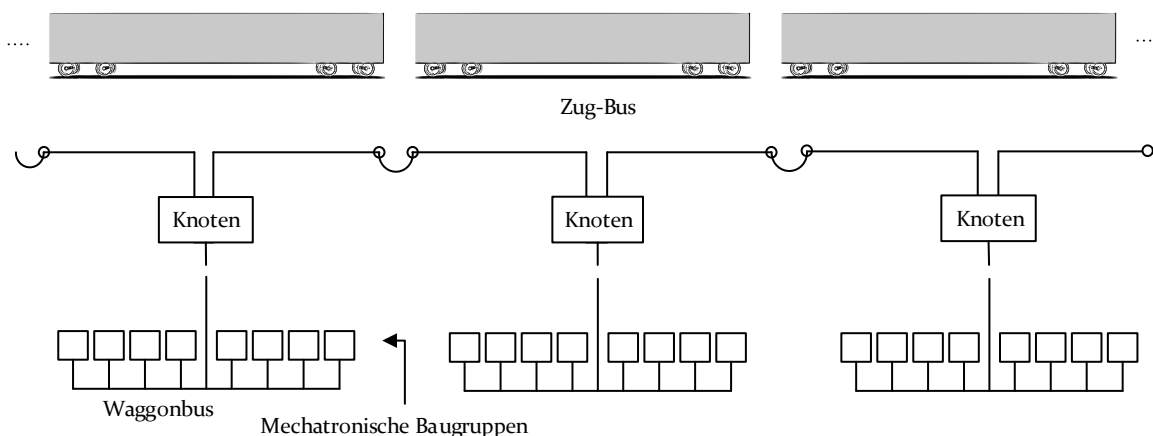


Bild 30: TCN-Architektur [137]

In Bild 30 ist die TCN-Architektur dargestellt. Das TCN umfasst die beiden genannten Arten von Feldbus. Der Zug-Bus verbindet die unterschiedlichen Waggons miteinander, während die waggoninternen Komponenten über den Waggon-Bus miteinander verbunden sind. Mittels der Kombination über die beiden Busse ist ein zugweiter Informationstransport möglich. Diese Architektur wird durch den Simulationskonfigurator für Triebzüge aufgegriffen und somit eine zentrale Ansteuerung der Zugmodelle über ein Fahrschaltermodell ermöglicht. Dadurch wird die Parametrierung unterschiedlicher Fahrspiele im Vergleich zur Einzelparmetrierung der jeweiligen Fahrmotormodelle deutlich vereinfacht. [137]

Für die zentrale Ansteuerung der Motor- und Bremsmodelle des Zugsimulators steht ein Steueralgorithmus zur Verfügung, der anhand der Sollzug- bzw. -bremskraft aus dem Fahrschaltermodell die umgesetzten Momente und Kräfte berechnet. Darüber hinaus wurde ein TCN-Modell erstellt, das über ein Feldbusmodell die Signale an die teilnehmenden Waggonmodelle übermittelt. Zudem ermöglicht das Feldbusmodell die Anbindung des Simulationskonfigurators an ein reales TCN für HiL-Simulationen von Steuergeräten.

3.3 Längsschwingungen in Triebzügen

Dieses Unterkapitel widmet sich der waggonübergreifenden Längsdynamik von Triebzügen. Es werden die als Feder-Dämpfer-Elemente wirkenden mechanischen Kupplungen zwischen den Waggons vorgestellt sowie die mathematischen Grundlagen der Schwingungen behandelt.

3.3.1 Schwingfähige Bauteile in Zügen

Zum mechanischen Verbinden der einzelnen Waggons eines Zugs sowie mehrerer Züge werden Kurzkupplungen und automatische Mittelpufferkupplungen eingesetzt. Im Hochgeschwindigkeitsbereich für Reisezüge hat sich die Scharfenbergkupplung des Typs 10 seit 2002 als Standard im TSI etabliert. Sie fungiert als vertikal starre und longitudinal schwingungssensitive Verbindung mit einer gemeinsamen Übertragung von Zug- und Druckkräften und ermöglicht ein vollautomatisches Kuppeln und Entkuppeln. Sie wird zum Verbinden von zwei Zügen an deren jeweiligen Kopfwaggons verwendet. [S1, 138]

Die einzelnen Waggons innerhalb eines Zuges werden durch Kurzkupplungen verbunden. Sie stellen eine semipermanente Verbindung dar, welche nur durch Lösen von Schraubverbindungen getrennt werden kann. Bei beiden Arten verfügt jeder Waggon jeweils über eine Kupplungshälfte, welche mit dem entsprechenden Gegenstück des zweiten Waggons verbunden wird. Zum besseren Verständnis des physikalischen Verhaltens werden nachfolgend Aufbau und Funktion beider für diese Arbeit relevanten Kupplungsarten erläutert. [S1, 138]

Frontkupplung

Bild 31 zeigt den Aufbau einer automatischen Mittelpufferkupplung der Bauart Scharfenberg Typ 10 des Herstellers Voith. Der Kupplungskopf (1) beinhaltet einen Kuppelverschluss mit Arretierung im Kupplungskopfgehäuse und stellt die mechanische, elektrische und pneumatische Verbindung mit der Kupplungshälfte eines weiteren Kopfwaggons her. [S1]

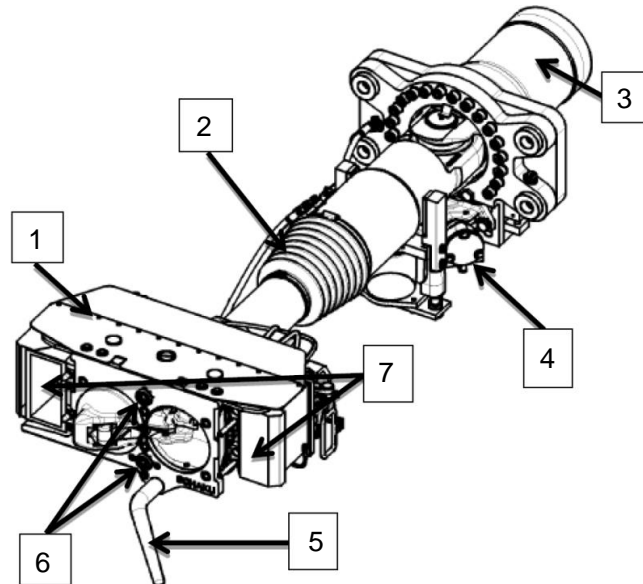


Bild 31: Automatische Mittelpufferkupplung Scharfenberg Typ 10 [S1, 138]

Die Kupplungsstange (2) verbindet den Kupplungskopf mit dem Lagerbock (3). Die Kupplungsstange federt sowie dämpft Stöße ab und ist maßgeblich für das dynamische Feder-Dämpfer-Verhalten der Kupplung verantwortlich. Sie besteht aus einem gashydraulischen Dämpfer und einer Reibungs- sowie Ringfeder. Die Verbindung zum Lagerbock erfolgt über ein Sphärolager, das kardanische Bewegungen erlaubt. Der Lagerbock verbindet die Kupplungsstange mit dem Wagenkasten des angrenzenden Waggons. Er leitet auftretende Kräfte an diesen weiter. Ein als Sollbruchstelle ausgeführtes Verformungsrohr baut die Energie zu starker Stöße durch irreversible Verformung ab, welche den Arbeitsbereich der Kupplungsstange überschreiten, und schützt somit den Waggon vor Beschädigungen. Eine Mittenstelleinrichtung (4) zentriert die Kupplungshälfte im entkuppelten Zustand zur Begünstigung des Koppelvorgangs. Für das Koppeln in Kurven oder bei vertikalem Versatz ermöglicht ein zusätzlicher Greifer (5) eine Annäherung der Kupplungshälften.

Die Luftkupplungen (6) stellen eine dichte Pneumatikverbindung zwischen zwei Waggons her. Analog dazu ermöglicht die elektrische Kupplung (7) das Schließen und Trennen der elektrischen Verbindung zweier Fahrzeuge. [S1, 138]

Kurzkupplung

Bild 32 zeigt den Aufbau einer Kurzkupplung. Die semipermanente Verbindung zweier Kupplungshälften erfolgt über eine Schalenmuffenverbindung (1). Als energieverzehrende Sollbruchstelle dient ein Verformungsrohr mit Kegelring (2), welches den Arbeitsbereich übersteigende Stoßkräfte durch plastische Verformung abbaut. Eine Anschraubplatte (3) stellt eine starre Verbindung zum Wagenkasten her. Die Verbindung zum Verformungsrohr erfolgt über zwei um die Anschraubplatte angeordnete und verspannte Gummifedern (4). Die waggonseitige Gummifeder überträgt somit nur Zug- sowie die kupplungsseitige nur Druckkräfte [139]. Als kardanisches Gelenk ermöglichen die Gummifedern laterale Bewegungen der Kupplung während des Betriebs und bestimmen deren Feder-Dämpfer-Verhalten [115]. [S1]

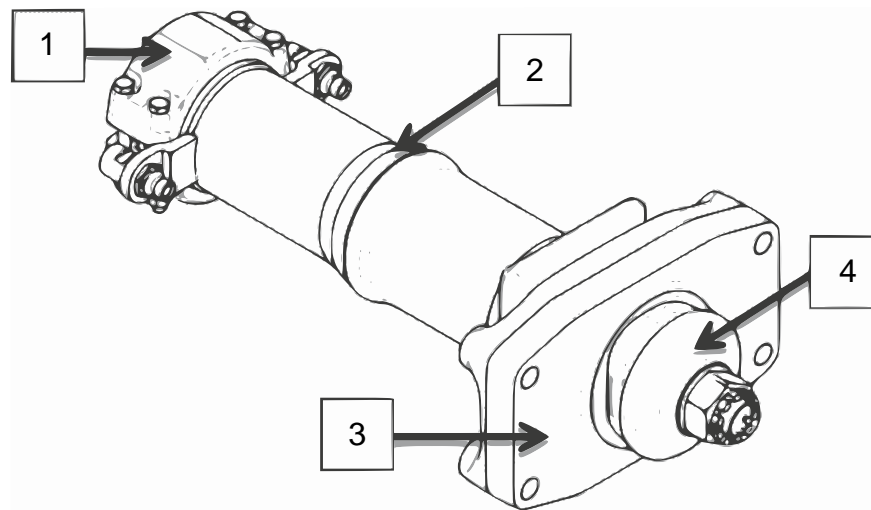


Bild 32: Kurzkupplung [S1, 138]

Für die Verbindung nah aneinander angeordneter Waggons innerhalb eines Zugs bestimmt, sind Kurzkupplungen deutlich kürzer und verfügen über einen entsprechend kleineren Arbeitsbereich als Mittelpufferkupplungen. Dementsprechend geringer sind der Energieverzehr bei Bewegung und die daraus folgende Dämpfungswirkung ausgeprägt. [S1]

Aufgrund der Primär- und Sekundärfederung der Waggons können sie über die von äußeren Kräften verursachten Längsschwingungen hinaus entlang aller drei Raumrichtungen schwingen, was in Bild 33 dargestellt ist. Dabei können sich die Radsätze relativ zu den Drehgestellen sowie die Drehgestelle zum Wagenkasten bewegen. Es hat sich gezeigt, dass insbesondere Nickbewegungen Kräfte auf die Kupplungen ausüben können, deren Frequenzen im Bereich von drei Hz liegen und damit sich mit Eigenfrequenzen der Längsschwingformen entlang der mechanischen Kupplungen zwischen den Waggons überschneiden können [112].

Diese Schwingungen können in speziellen Betriebsszenarien, bei denen ungewöhnlich hohe Eigenfrequenzen angeregt werden, die in dieser Arbeit betrachteten Längsschwingungen weiter verstärken.

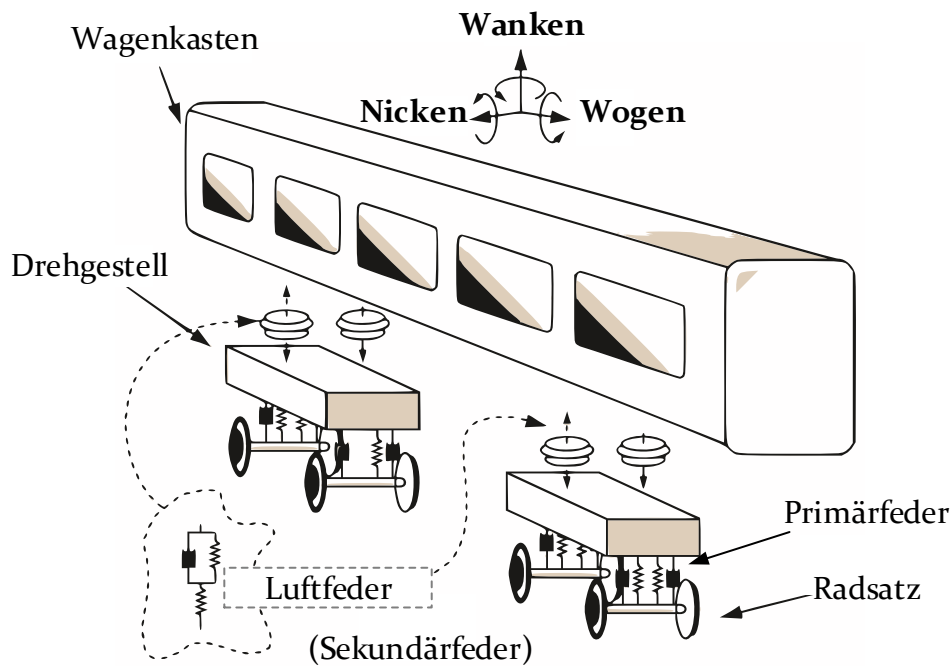


Bild 33: Freiheitsgrade des Waggons [140, 141]

Die vorgestellten mechanischen Kupplungssysteme werden in Kapitel 5 aufgegriffen. Die dort verwendeten Modelle von automatischen Mittelpufferkupplungen und Kurzkupplung basieren auf den hier vorgestellten Funktionsprinzipien und werden darin anhand von Simulationsfällen für spezielle Triebzugtypen validiert.

3.3.2 Herleitung der Bewegungsgleichungen

Schwingungen werden nach Beanspruchungsart in Längs-, Torsions-, oder Biegeschwingung sowie nach ihrem Entstehungsmechanismus in freie, erzwungene oder selbsterregte Schwingungen unterschieden. Die Schwingfrequenz mit dazugehöriger Schwingform sind bei einer freien Schwingung durch die Systemparameter bestimmt. Sie werden als Eigenfrequenz bzw. Eigenform bezeichnet. Bei erzwungenen Schwingungen führen dem schwingfähigen System äußere Kräfte Energie zu, was die resultierende Schwingfrequenz beeinflusst. [S1, 142]

Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Längsschwingungen geradlinig angeordneter Mehrkörpersysteme betrachtet. Zunächst wird die Bewegungsgleichung eines in Bild 34 dargestellten Einmassenschwingers hergeleitet. Anschließend werden Mehrmassenschwinger mit mehreren Freiheitsgraden betrachtet, wie sie den hier betrachteten Zügen ähneln.

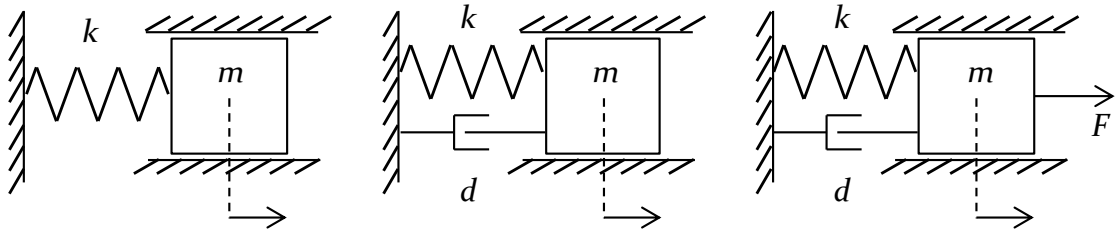


Bild 34: Einmassenschwinger [S1, 143]

Zunächst wird der ungedämpfte Einmassenschwinger in Bild 34a betrachtet. Gemäß dem Grundsatz der Energieerhaltung ist die Gesamtenergie dieses Systems zeitlich konstant. Sie kann aus der kinetischen Energie der Masse m und der in der Feder mit Federsteifigkeit k gespeicherten potentiellen Energie entsprechend Gleichung 8 berechnet werden.

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 \quad (8)$$

$$(m \cdot \ddot{x} + k \cdot x) \cdot v = 0 \quad (9)$$

$$\ddot{x} + \frac{k}{m} \cdot x = 0 \quad (10)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (11)$$

$$f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} \quad (12)$$

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{f} \quad (13)$$

Dabei gilt der Zusammenhang $v = \dot{x}$. Da in einem als reibungsfrei angenommenen System die Gesamtenergie konstant ist, ergibt durch die Ableitung nach der Zeit und Umformung Gleichung 9. Da diese Gleichung für beliebige v erfüllt sein muss, gilt Gleichung 10. Dabei sind die von den Systemparametern abhängigen Größen der Eigenkreisfrequenz ω (Gleichung 11), der Eigenfrequenz f (Gleichung 12) und der Periodendauer T (Gleichung 13) gültig.

Ungedämpfte Schwingssysteme mit Energieerhaltung treten in der Realität nicht auf, da stets durch Dämpfung Bewegungsenergie in Wärme umgewandelt und dem System somit Energie entzogen wird, was als Dissipation bezeichnet wird. Typische Arten von Dämpfung sind Materialdämpfung durch innere mikroskopische Verformungen, Reibungsdämpfung durch makroskopische Relativbewegungen von Reibpartnern und die viskose Dämpfung. Diese ist geschwindigkeitsabhängig und entsteht durch Reibung in viskosen Flüssigkeiten oder Gasen.

In Bild 34b ist das gleiche Modell um einen geschwindigkeitsproportionalen, viskosen Dämpfer mit der Dämpferkonstanten d und der Dämpferkraft F_D (Gleichung 14) erweitert dargestellt. Die Bewegungsgleichung dieses Systems lässt sich hier analog zu Gleichung 10 zu Gleichung 15 bestimmen.

$$F_D = d \cdot v \quad (14)$$

$$\ddot{x} + \frac{d}{m} \cdot \dot{x} + \frac{k}{m} \cdot x = 0 \quad (15)$$

$$\delta = \frac{d}{2 \cdot m} \quad (16)$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (17)$$

$$\ddot{x} + 2 \cdot \delta \cdot \dot{x} + \omega^2 \cdot x = 0 \quad (18)$$

$$x(t) = B \cdot e^{\lambda \cdot t} \quad (19)$$

Mit der Abklingkonstante δ (Gleichung 16) und der Substitution aus Gleichung 17 ändert sich die Bewegungsdifferentialgleichung in Gleichung 18. Mit dem Lösungsansatz aus Gleichung 19 ergibt sich die Lösung der Differentialgleichung (Gleichung 20). Werden der Lösungsansatz sowie seine erste und zweite zeitliche Ableitung in Gleichung 18 eingesetzt, ergibt sich Gleichung 20. Dabei sind λ der Eigenwert, t die Zeit und B eine beliebige Konstante.

$$B \cdot \lambda^2 e^{\lambda \cdot t} + 2 \cdot \delta \cdot B \cdot \lambda \cdot e^{\lambda \cdot t} + \omega^2 \cdot B \cdot e^{\lambda \cdot t} = 0 \quad (20)$$

$$\lambda^2 + 2 \cdot \delta \cdot \lambda + \omega^2 = 0 \quad (21)$$

$$\lambda_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega^2} \quad (22)$$

$$D = \frac{\delta}{\omega} \quad (23)$$

Nach Kürzen um Gleichung 19 folgt die charakteristische Gleichung 21, welche die Lösungen aus Gleichung 22 besitzt. Zur Fallunterscheidung wird der dimensionslose Dämpfungsgrad D (Gleichung 23) eingeführt. Für diesen können drei verschiedene Fälle unterschieden werden.

Es handelt sich im Fall $0 < D < 1$ um ein gedämpftes System, wobei $D \ll 1$ als schwach gedämpft und $D < 1$ als stark gedämpft bezeichnet wird [144]. Für dieses kann die gedämpfte Eigenkreisfrequenz ω_d zu Gleichung 25 bestimmt werden, wobei T_d die gedämpfte Periodendauer ist.

$$\omega_d = \sqrt{\omega^2 - \delta^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{\omega}\right)^2} = \omega \sqrt{1 - D^2} \quad (24)$$

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} \quad (25)$$

T_d wird als quasiperiodisch bezeichnet. Für den Fall, dass gilt $\omega_d = \omega$, ist das System ungedämpft.

Bei einer Dämpfung von $D = 1$ liegt der aperiodische Grenzfall vor, bei dem definitionsgemäß keine Schwingungen auftreten und das System am schnellsten energiefrei ist. Im Fall von $D > 1$ findet ein aperiodisches Ausklingen statt, welches als Kriechvorgang bezeichnet wird; aufgrund der starken Dämpfung wird die Energie langsamer absorbiert als im aperiodischen Grenzfall. Zum besseren Verständnis zeigt Bild 35 beispielhafte Abklingverhalten einer anfänglichen Anregung.

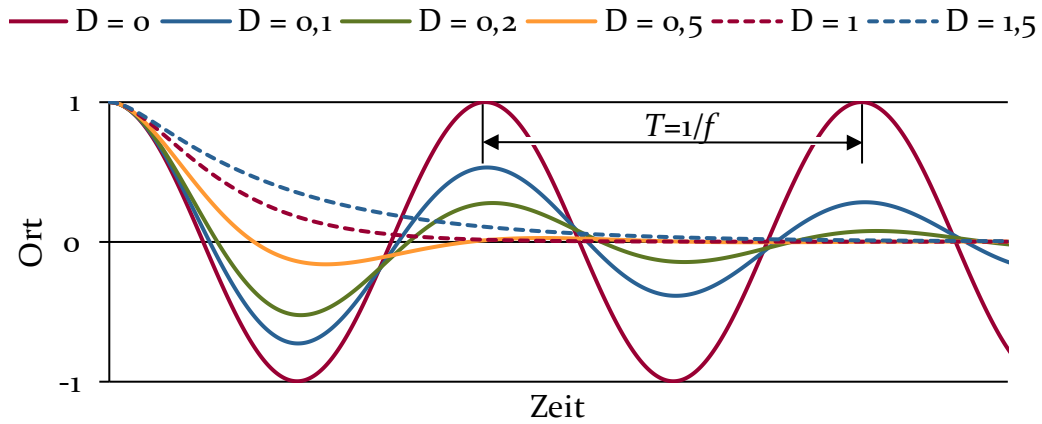


Bild 35: Einfluss des Dämpfungsgrads auf Schwingungen [143, S1]

Für den in dieser Arbeit relevanten Fall gelten $D < 1$ und damit $\delta^2 - \omega^2 < 1$ (vgl. Gleichung 22). Daraus resultieren die beiden komplex konjugierten Lösungen aus Gleichung 26. Dabei berechnet sich ω_d entsprechend Gleichung 27. Demnach ist für diesen Fall die Schwingungsfrequenz für $D < 1$ niedriger als bei ungedämpften Schwingungen. Für $D \ll 1$ unterscheiden sich die Frequenzen jedoch kaum. Bei mechanischen Zugkupplung gilt $D < 0,2$, was zu einer um ca. 2,0 Prozent kleineren gedämpften als ungedämpften Eigenkreisfrequenz führt [S2].

$$\lambda_{1,2} = -\delta \pm j \cdot \sqrt{\omega^2 - D^2} \quad (26)$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega^2 - D^2} = \omega \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{D}{\omega}\right)^2} = \omega \cdot \sqrt{1 - D^2} \quad (27)$$

Durch Überlagerung der beiden Lösungsfunktionen aus Gleichung 26 und Einsetzen von Gleichung 24 ergibt sich die Lösung (Gleichung 28) der Bewegungsgleichung (Gleichung 18). Mithilfe der Euler'schen Formel lässt sich Gleichung 28 reell in Form von Gleichung 29 schreiben.

$$x(t) = e^{-\delta t} \cdot (B_1 \cdot e^{j\omega_d t} + B_2 \cdot e^{-j\omega_d t}) \quad (28)$$

B_1 und B_2 sind beliebige Integrationskonstanten. Werden die Ansätze aus Gleichung 30-31 mit den reellen Konstanten E_1 und E_2 angewendet, ergibt sich die rein reelle Lösung (Gleichung 32).

$$x(t) = e^{-\delta t} \cdot ((B_1 + B_2) \cdot \cos(\omega_d t) + (B_1 - B_2) \cdot j \cdot \sin(\omega_d t)) \quad (29)$$

$$B_1 = E_1 + j \cdot E_2 \quad (30)$$

$$B_2 = E_1 - j \cdot E_2 \quad (31)$$

$$x(t) = e^{-\delta t} \cdot (2 \cdot E_1 \cdot \cos(\omega_d t) - 2 \cdot E_2 \cdot \sin(\omega_d t)) \quad (32)$$

$$C_1 = 2 \cdot E_1 \quad (33)$$

$$C_2 = -2 \cdot E_2 \quad (34)$$

$$x(t) = e^{-\delta t} \cdot (C_1 \cdot \cos(\omega_d t) + C_2 \cdot \sin(\omega_d t)) \quad (35)$$

$$x(t) = A \cdot e^{-\delta t} \cdot (C_1 \cdot \sin(\omega_d t) + \varphi_0) \quad (36)$$

Durch die Substitutionen mittels der weiteren Konstanten C_1 und C_2 in Gleichung 33-34 ergibt sich die Bewegungsfunktion der Masse m in Gleichung 35. Darin nimmt der Term $e^{-\delta t}$ mit der Zeit ab.

Außerdem lässt sich die Bewegungsfunktion in Abhängigkeit der Amplitude A und des Nullphasenwinkels φ_0 beschreiben (Gleichung 36, Bild 36). Dabei stellt der der Term $\pm A \cdot e^{-\delta t}$ die Einhüllende dar, während $C_1 \cdot \sin(\omega_d t) + \varphi_0$ die harmonische Schwingung beschreibt.

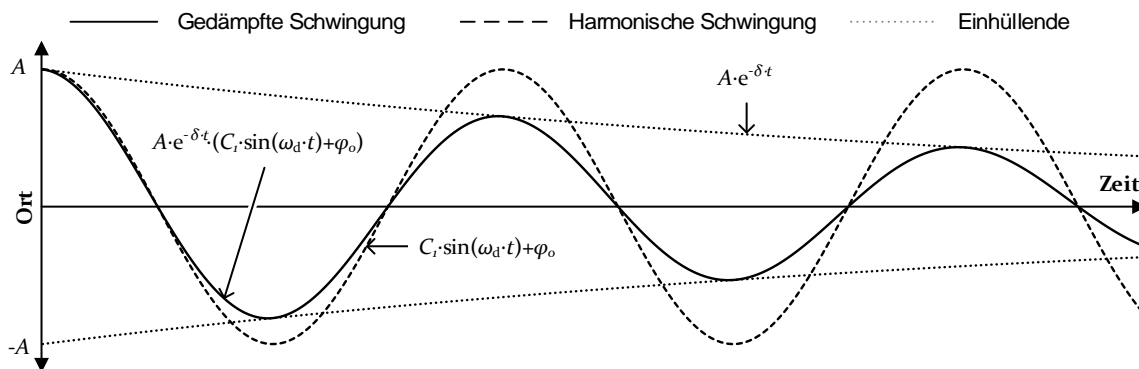


Bild 36: Schwach gedämpfte Schwingung ($D \ll 1$) [143]

Das grundlegende physikalische Verhalten der in den Waggonen des Triebzuges erregbaren Schwingungen wurde vorhergehend eingeführt. Anhand der dargestellten Gleichungen wird ersichtlich, wie die sinusförmigen Schwingungen und ihr Abklingverhalten durch geschwindigkeitsabhängige Dämpfung zustande kommt. Dieses Verhalten ist maßgeblich für die in Zügen vorkommenden Längsschwingungen und das im Simulationskonfigurator für Triebzüge implementierte Modellverhalten.

Die zuvor hergeleiteten Gleichungen für einen Einmassenschwinger werden nachfolgend auf ein System mit mehreren Freiheitsgraden erweitert, welches auch als gekoppeltes Schwingssystem bezeichnet wird. Bild 37 zeigt einen Mehrmassenschwinger mit n Freiheitsgraden. Dabei sind k_i die jeweiligen Federsteifigkeiten und x_i die Orte der Massen m_i .

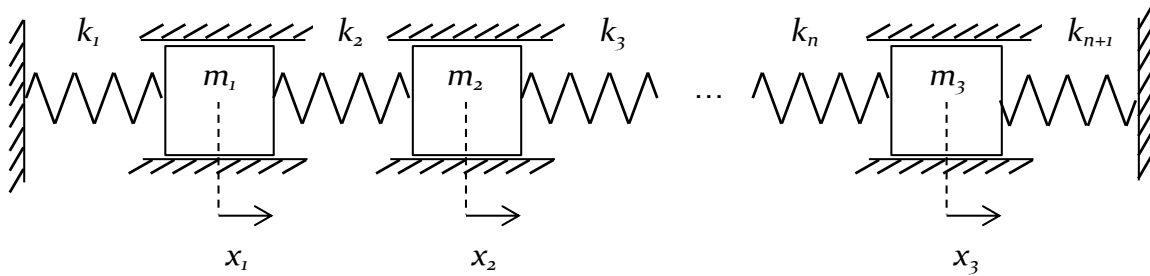


Bild 37: Ungedämpfter Mehrmassenschwinger [143, Si]

Zur leichteren Verständlichkeit wird zunächst wieder von einem ungedämpften System ausgegangen. Analog zu Gleichung 9 ergibt sich mit der Massenmatrix \mathbf{M} (Gleichung 38), Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} (Gleichung 39) und dem Verschiebungsvektor \mathbf{x} (Gleichung 40) in Matrizenschreibweise Gleichung 37.

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (37)$$

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & m_n \end{pmatrix} \quad (38)$$

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & -k_n \\ 0 & 0 & -k_n & k_n+k_{n+1} \end{pmatrix} \quad (39)$$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{pmatrix} \quad (40)$$

Als Lösungsansatz für Gleichung 37 kann Gleichung 41 gewählt werden. Dabei ist Gleichung 42 der Amplitudenvektor. Durch Einsetzen des Lösungsansatzes sowie seiner zweiten Ableitung nach der Zeit in die Bewegungsgleichung führt zu Gleichung 43. Da die Gleichung für beliebige t gelten muss, vereinfacht sie sich zu Gleichung 44. Nur wenn Gleichung 45 gilt, hat das Gleichungssystem nichttriviale Lösungen. Diese auch Frequenzgleichung genannte Koeffizientendeterminante ist ein Polynom n -ten Grades und löst sich zu Gleichung 46 auf.

$$\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (41)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n]^T \quad (42)$$

$$\mathbf{M} \cdot (-\omega^2 \cdot \hat{\mathbf{x}} \cdot \sin(\omega \cdot t)) + \mathbf{K} \cdot \hat{\mathbf{x}} \cdot \sin(\omega \cdot t) = \mathbf{0} \quad (43)$$

$$(-\omega^2 \cdot \mathbf{M} + \mathbf{K}) \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{0} \quad (44)$$

$$\det(-\omega^2 \cdot \mathbf{M} + \mathbf{K}) = 0 \quad (45)$$

$$a_n \cdot (\omega^2)^n + a_{n-1} \cdot (\omega^2)^{n-1} + \dots + a_1 \cdot \omega^2 + a_0 = 0 \quad (46)$$

Die Nullstellen dieser Gleichung berechnen die n Eigenkreisfrequenzen $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ des Systems. Mit steigender Anzahl n an Körpern gleicher Masse nehmen die niedrigsten Eigenkreisfrequenzen bei solchen Koppelschwingungen ab, während die höchsten Eigenfrequenzen ansteigen. Ein Einsetzen der jeweiligen Eigenkreisfrequenzen in Gleichung 44 bringt anschließend die zugehörigen Eigenschwingungsformen \mathbf{x}_i in Gleichung 47 mit dem Eigenvektor $\hat{\mathbf{x}}_i$ hervor.

$$\mathbf{x}_i = \hat{\mathbf{x}}_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t) \quad (47)$$

Diese Eigenvektoren beschreiben im eingeschwungenen Zustand jeweils das normierte Verhältnis der in den Amplituden befindlichen Energien aller Körper zueinander. Für ein System mit n Freiheitsgraden existieren ebenso viele Eigenfrequenzen mit einer jeweiligen dazugehörigen Eigenschwingform. Im Falle von Triebzügen beträgt die Anzahl $n-1$, da die äußeren Massen losgelagert sind.

Eine Erweiterung des Mehrmassenschwingers mit n Freiheitsgraden um Dämpfungen und äußere Kräfte \mathbf{F} (Gleichung 49) ist in Gleichung 48 dargestellt. Dabei ist \mathbf{D} die Dämpfungsmatrix, welche analog zur Steifigkeitsmatrix aufgebaut ist.

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{D} \cdot \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (48)$$

$$\mathbf{F} = [F_1, F_2, \dots, F_n]^T \quad (49)$$

Ein Lösen solcher Bewegungsgleichungen für Systeme mit durch äußere Kräfte erzwungenen Erregungen und n Freiheitsgraden gestaltet sich analog. Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung der Massekörper kommt es im Falle von Fremderregung bei gekoppelten Systemen zum Auftreten mehrerer Eigenformen

gleichzeitig. Dadurch treten Interferenzphänomene auf, die Koppelschwingungen genannt werden.

Von JIA wurden verschiedene Eigenformen für instationär angeregte Mehrmassenschwinger simuliert und gegenübergestellt [S2]. Es zeigte sich, dass bei Erregung höherer Eigenfrequenzen die Schwingungen aufgrund höherer Dämpfungskräfte schneller abklingen. Da die erste, niedrigste Eigenfrequenz die höchsten Amplituden und das langsamste Abklingverhalten aufweist, stellte sich diese als besonders kritisch für das Schwingungsverhalten von Zügen heraus. Dadurch könnten mechanische Kupplungen aufgrund möglicher Überschreitungen des zulässigen Arbeitsbereichs geschädigt werden.

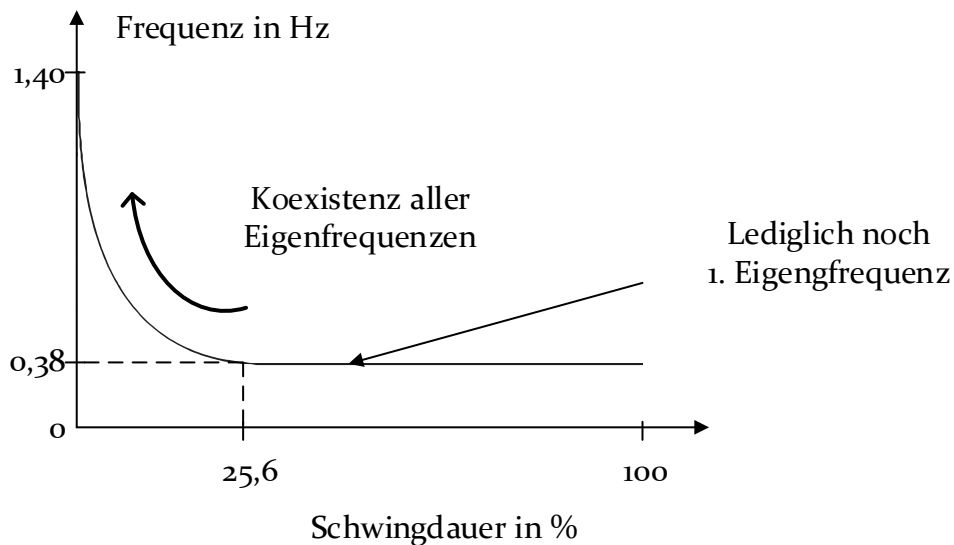


Bild 38: Abklingen höherer Eigenfrequenzen bei Koppelschwingungen für ein geradlinig angeordnetes Mehrkörpersystem [S2]

In einer Beispielsimulation hat sich die Schwingfrequenz nach bereits 25,6 Prozent der Schwingdauer auf die erste Eigenfrequenz eingeschwungen, was in Bild 38 dargestellt ist. Die dritte Eigenfrequenz ist bereits nach 12,1 Prozent abgeklungen, während alle weiteren nicht länger als 5,1 Prozent der Zeit mitschwingen. Die Daten wurden anhand eines einfachen Zugsimulationsmodells mit zwölf Waggons gleicher Masse von 52 Tonnen gewonnen, die in durch Kurzkupplungen verbundenen Einheiten bestehend aus drei Waggons aufgeteilt sind. Die vier Dreieinheiten sind mit Mittelpufferkupplungen verbunden. Die linearen Steifigkeiten betrugen für die Kurzkupplung ca. 5,5 kN/mm und für die Mittelpufferkupplung 3,1 kN/mm. Die Dämpfung der Kurzkupplung betrug ca. 461 kNs/m bzw. der Mittelpufferkupplung 260 kNs/m. [S2]

Werden zusätzlich z.B. quadratische anstatt linearer Federkennlinien verwendet, so entsteht ein nichtlineares Schwingssystem. Bei nichtlinearen Federcharakteristiken treten unendlich viele Eigenfrequenzen auf, die von der anregenden Kraft abhängig sind. Eine analytische Lösung dieser Systeme wäre jedoch zu aufwändig,

da sie nur für einfache Anregungsfunktionen bestimmt werden könnte, was bei Triebzügen nicht gegeben ist. Deshalb werden im Rahmen dieser Arbeit die Lösungen der Gleichungssysteme numerisch durch ein Simulations-Werkzeug berechnet [143].

3.4 Fazit

Die in den beiden Forschungsfeldern der Dynamik- (Bild 39a) sowie Kostenuntersuchung (Bild 39b) von Zügen recherchierten Forschungsergebnisse lassen keine fundierten Aussagen über die im Untersuchungsfokus dieser Arbeit stehenden Problemstellungen zu. Die in der Praxis unerwartet während der Fahrt auftretenden Längsschwingungen zwischen den Waggonen moderner Triebzüge beeinträchtigen den Fahrkomfort und können sich schädigend auf die mechanischen Teile auswirken. Ihre Ursachen liegen in der komplexen Wechselwirkung der Module und Komponenten sowie äußeren Anregungen, die sich überlagern. Diese sind oftmals steuerungsbedingte Totzeiten, physikalisch bedingte Verzögerungen in der mechanischen Bremse und witterungsbedingte Einflüsse auf den Rad-Schiene-Kontakt. Da die Module separat entwickelt werden, tritt resultierendes Fehlverhalten erst zutage, wenn die Züge in Betrieb gesetzt werden. Die bisherigen Forschungsergebnisse behandeln jedoch lediglich separate Schwingungsursachen, wobei der Interessensschwerpunkt auf waggointernen Schwingungen liegt.

Das elektrische Rekuperationspotential aufgrund generatorischen Bremsens moderner Triebzüge ist ein entscheidender wirtschaftlicher Faktor beim Betrieb moderner Triebzüge. Durch verschiedene Steuerungsparameter ergeben sich unterschiedliche Betriebskosten. Rein elektrisches Bremsen ist nicht zwangsläufig am kostensparendsten, weil dadurch längere Fahrzeiten in Kauf genommen werden müssen. Die können nur durch höhere Reisegeschwindigkeiten kompensiert werden, die fahrwiderstandsbedingt wiederum zu höheren Energiekosten führen. Ganzheitliche Kosteneinsparpotentiale durch unterschiedliche Bremssteuerungsparameter wurden in der bisherigen Forschung jedoch nicht untersucht, in die sowohl Stromverbrauch und -rekuperation als auch Verschleißkosten und Wirkungsgrade mit einfließen. Die betrachteten Optimierungsbemühungen stützen sich darauf, die vom Fahrer des Zugs ausgehenden Steuerbefehle an das Streckenprofil angelehnt zu optimieren, nicht jedoch die steuerungsinternen Parameter, die zu unterschiedlicher Bremskraftverteilung führen. Dies schließt das Verhältnis zwischen mechanischem und motorischem Bremsen sowie die Begrenzung der lokal an den Radsätzen wirkenden Bremskräfte mit ein.

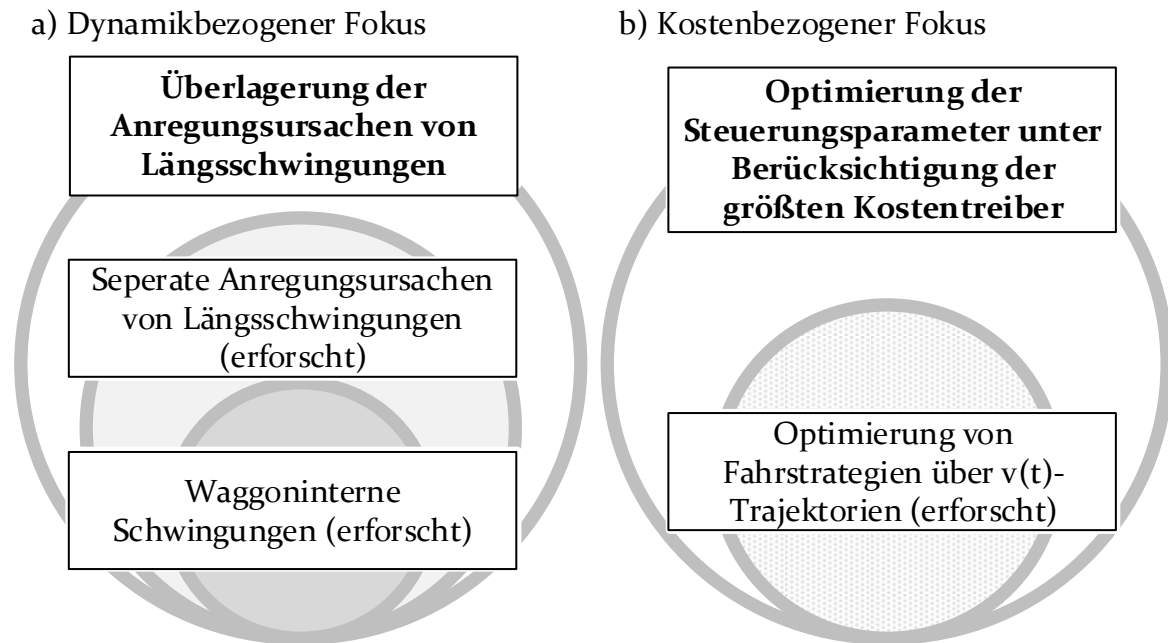


Bild 39: Ungenutztes Forschungspotential bei der Dynamik von Zügen

Die beiden in dieser Arbeit betrachteten Forschungsfelder in Bild 39a und -b erfordern ein flexibel konfigurierbares Simulationsmodell eines Triebzuges, das die zur Durchführung der Analysen notwendige Komplexität aufweist. Dafür ist die Modellierung der wechselwirkenden Komponenten des Bremssystems, des Antriebs und der Steuerung moderner Triebzüge nötig. Der dafür entwickelte Simulationskonfigurator wird in Kapitel 4 vorgestellt sowie in Kapitel 5 evaluiert.

4 Konzeption eines Metamodells für Simulationskonfiguratoren

Ziel dieses Kapitels ist die Darstellung einer Methodik, mittels der sich der Handlungsbedarf aus Kapitel 2 umsetzen lässt. Wie darin bereits erwähnt, wird die Strukturierung eines Basismodells beschrieben, mittels dessen sich Simulationsmodelle flexibel konfigurieren lassen. Dieses Basismodell ist in der Lage, verschiedene Produktkomplexitäten und -konfigurationen zu adaptieren und durch Schnittstellen in die Entwicklungsumgebung der Produkte eingebunden zu werden. Dadurch wird die Interdisziplinarität der verschiedenen Engineering-Domänen sowie die Komponenten-Validierungen mittels HiL-Simulation unterstützt.

Die Unterkapitel 4.1-4.5 beschreiben objektorientierte Methoden, die für die geforderten Funktionalitäten des Basismodells erforderlich sind. In Unterkapitel 4.6 wird ein angepasster Prozess beschrieben, nach welchem sich Basismodelle systematisch erzeugen lassen. Darin werden die Methoden der Unterkapitel 4.1-4.5 mit einbezogen.

Zur besseren Anwendbarkeit wird ein durchgängiges Beispiel anhand eines Simulationskonfigurators für Triebzüge ausgeführt. Dafür werden die Unterkapitel jeweils zweigeteilt; im ersten Abschnitt ist die allgemeingültige Methode beschrieben, während es im zweiten Abschnitt am Simulationskonfigurator für Triebzüge angewendet wird.

4.1 Erzeugnisgliederung für Simulationsmodelle fortgeschrittener mechatronischer Systeme

In diesem Unterkapitel wird eine Modellarchitektur beschrieben, die die Modellierung fortgeschrittener mechatronischer Systeme ermöglicht. Dafür werden eine an Erzeugnisgliederungen angelehnte hierarchische Struktur, die notwendigen Bestandteile sowie der Informationstransport zwischen den Gliederungsebenen erörtert.

4.1.1 Metamodell eines Basismodells

In Bild 40 ist aufgezeigt, wie Produkte als Basismodell strukturiert und zu einem simulationsbereiten Digitalen Zwilling für Produktvarianten erweitert werden. Das Basismodell mitsamt seiner Erweiterung und der hinterlegten Modelldatenbank, die die Klassen enthält, ergibt den Simulationskonfigurator.

Im Bild oben befindet sich das Produktmodell, welches sich auf den mittleren Ebenen in seine Module und auf unterster in seine Komponenten gliedert. Die Anzahl der Erzeugnisgliederungsebenen richtet sich nach der Struktur des realen Produkts und muss dementsprechend gewählt werden. Bezogen auf das

mechatronische System nach der VDI-Richtlinie 2206 beinhaltet das Basismodell auf Komponentenebene die Aktor- und Sensormodelle sowie das Modell des Grundsystems und der Steuerung. Das Kommunikationssystem sowie ein HMI-Modell, über das das Simulationsmodell gesteuert wird, werden an die Konfiguration des Basismodells angepasst, für jedes Simulationsmodell individuell ergänzt und parametrisiert. Dadurch ist die variantenspezifische Produktkomplexität effizient umsetzbar, die in Unterkapitel 4.3 beschrieben ist.

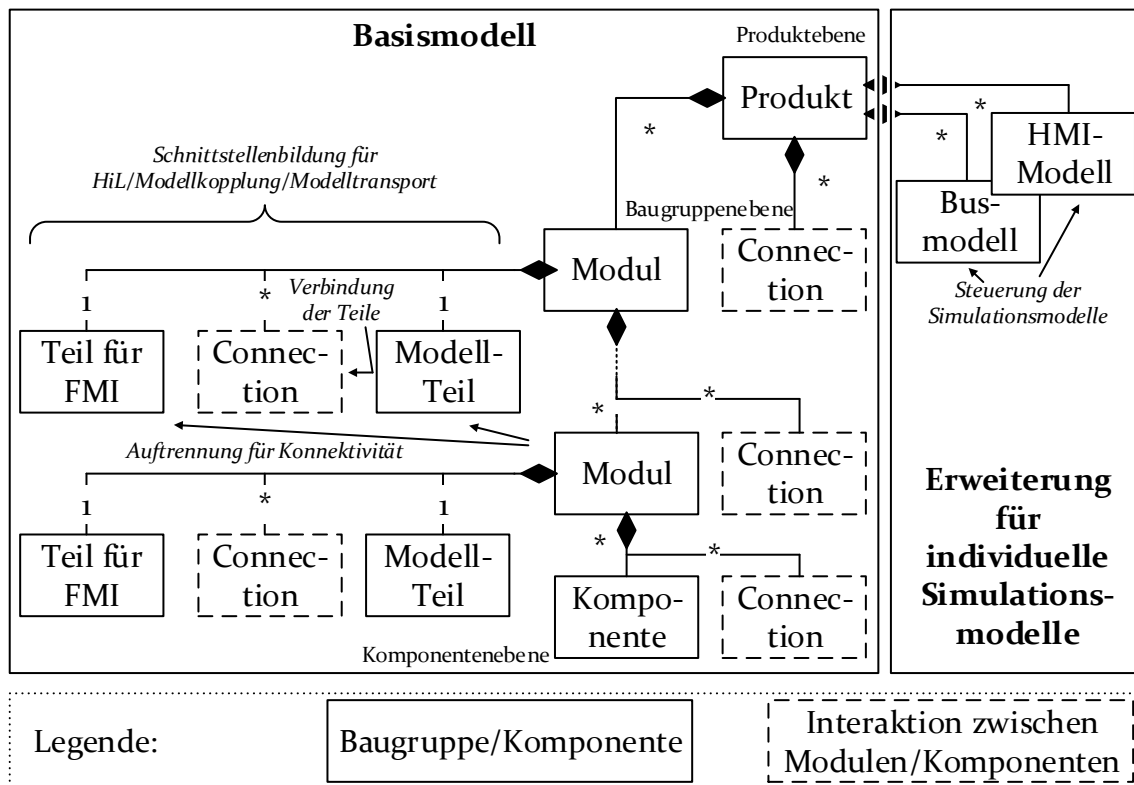


Bild 40: Erzeugnisgliederung und Struktur des Basismodells sowie individuelle Erweiterung für die Erzeugung von Digitalen Zwillingen zur physikalischen Simulation von Produktvarianten

Der im Bild als „Produkt“ bezeichnete Bestandteil ist eine Klasse, während die restlichen Bestandteile darin komponierte Objekte sind. Er repräsentiert das Basismodell. Die methodische Beschreibung für die Einbindung von Kommunikationssystem und HMI befindet sich in Unterkapitel 4.5.

Die Gleichungen und Algorithmen, die das multiphysikalische Verhalten sowie das modellierte Steuerungsverhalten beschreiben, werden auf Komponentenebene formuliert. Dadurch ist die Struktur des Basismodells von den multiphysikalischen Funktionalitäten abgetrennt. Somit besteht die Möglichkeit, zunächst die komplette Produktarchitektur und -interaktion zu entwerfen, denen die Funktionalitäten und konkreten Parametrierungen untergeordnet werden. Durch diese Trennung können die Funktionalitäten angepasst werden, ohne dass dabei die Struktur des Produktmodells beeinflusst werden muss. Sie werden in

Form der nötigen Komponenten in Erben der Baugruppen-Klassen implementiert. Diese werden ins Basismodell mittels generischer Objekte integriert und stehen dadurch für individuell konfigurierte Simulationsmodelle zur Auswahl. Auf diese Weise kann die Produktfunktionalität außerdem zu beliebigen Zeitpunkten ergänzt werden, ohne dabei alternative Funktionalitäten zu überschreiben. Die Struktur eignet sich beispielsweise, wenn neue Konfigurationen und erweiterte Funktionalitäten virtuell getestet und validiert werden sollen.

Für die Baugruppen müssen Basisklassen angelegt werden, damit die Objekte auf übergeordneter Gliederungsebene generisch instanziiert, dadurch später getauscht und somit Varianten konfiguriert werden können. Auf diese Weise wird das modular komponierte Basismodell erhalten. Dieses Verfahren wird in Unterkapitel 4.2 dargestellt.

Damit FMI für die Anbindung der konfigurierten Simulationsmodelle an die Entwicklungsumgebung gelingt, müssen Module entsprechend dem linken Teil in Bild 40 in einen FMI-Teil und das Restmodell aufgetrennt und verbunden werden. Durch den FMI-Teil kann in diesem Fall je nach Anforderung eine Modellkopplung bzw. ein Modelltransport vorgenommen oder eine Komponente in HiL-Simulationen eingebunden werden. Für den Teil bildet der „Modellteil“ das Umgebungsmodell. Auf diese Weise werden die Komponente bzw. das externe Modell in das Basismodell mit eingebunden. Das Vorgehen ist in Unterkapitel 4.4 beschrieben.

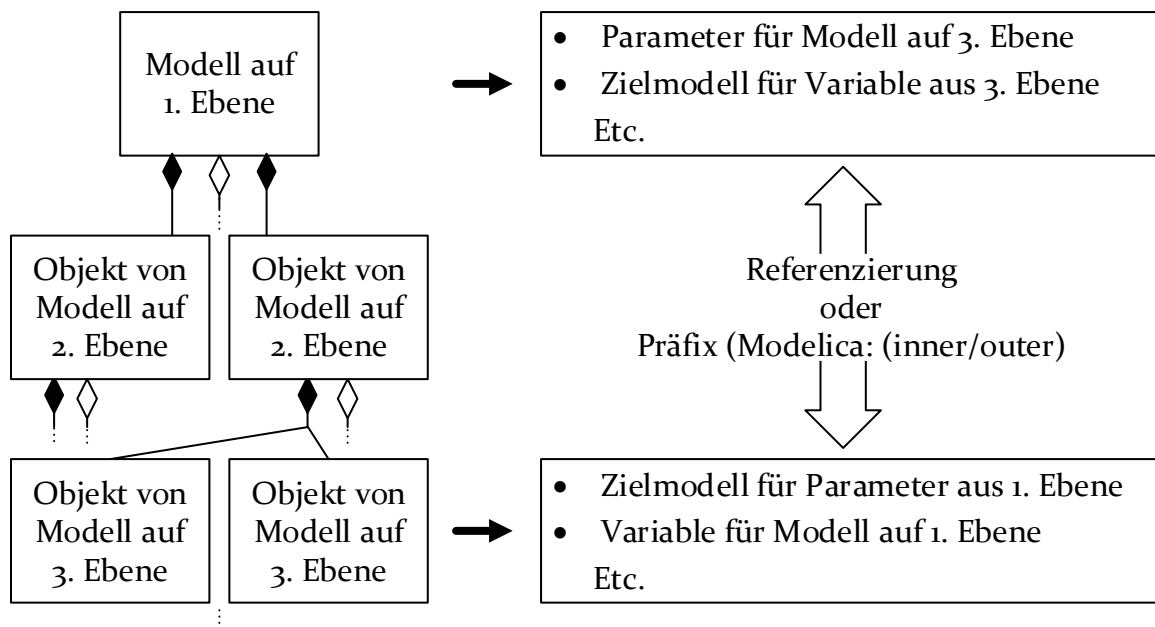


Bild 41: Informationstransport in Systemmodellen

Für eine zentralisierte Modellsteuerung über die Erweiterung des Basismodells ist es notwendig, dass dort geänderte Parameter in die unteren Gliederungsebenen weitergeleitet bzw. Variablen von dort zurückgeführt werden. Auf diese Weise lässt sich das Modell effizient über das HMI-Modell und die Parameter des Produktmodells parametrieren, ohne dass Module bzw. Komponenten gesondert angepasst werden müssen. Außerdem lassen sich dort während der Simulation die Variablen auslesen, die in den Objekten des Systemmodells berechnet werden. Dafür eignen sich die zwei in Bild 41 gegenübergestellten Methoden, die vom Autor bereits für Triebzugmodelle beschrieben wurden [P5].

Aufgrund der objektorientierten und dadurch modularisierten Modellzusammensetzung sind alle Eigenschaften eines Objekts innerhalb der Klasse bzw. des Objekts bekannt, worin sie instanziiert sind. Auf umliegender Ebene sind sie hingegen unbekannt. Deshalb müssen Eigenschaften auf verschiedenen Ebenen miteinander referenziert werden. Somit lassen sich Daten während Simulationen über die verschiedenen Erzeugnisgliederungsebenen des Modells transportieren.

In multiphysikalischen Simulationswerkzeugen steht außerdem die Möglichkeit der Definition von Präfixen zur Verfügung (in Modelica *inner* bzw. *outer*). Im Falle identischer Benennungen der Eigenschaften auf den verschiedenen Gliederungsebenen sucht das Objekt auf höherer Ebene während der Simulation den ausgewiesenen Datentyp im Zielobjekt auf niedrigerer bzw. umgekehrt. Die Anzahl der sich dazwischen befindlichen Gliederungsebenen ist beliebig. Das Verfahren stellt eine Alternative zur Referenzierung von Eigenschaften dar.

Im Allgemeinen ist die Nutzung von Präfixen zu bevorzugen, da sie effizienter als Referenzieren ist. Diese Methode ist jedoch bei der Generalisierung von Klassen unter Umständen die einzig mögliche. Wenn eine Ableitung eines Modells erzeugt wird, werden alle Eigenschaften mitvererbt. Wird in der Vaterklasse eine Instanz dieser Ableitung erzeugt, was für eine Auftrennung des Modells für die Integration von FMI nötig ist, müssen ihre identischen Eigenschaften miteinander referenziert werden. Nur dann können die in der Vaterklasse definierten Eigenschaften an ihre inneren Objekte weitergegeben werden.

Die zu Simulationsmodellen erweiterbaren, nach dieser Methodik erzeugten Basismodelle können mit variabler Komplexität und Parametrierung konfiguriert werden und sich dadurch an Produktvarianten bzw. unterschiedliche Entwürfe anpassen. Durch das eingebundene HMI-Modell sowie Busmodell lassen sich die Funktionalitäten fortgeschrittener mechatronischer Produkte in das Basismodell integrieren. Die Auftrennung der Module in einen FMI-Teil sowie das Restmodell ermöglicht die Anbindung an die Entwicklungsumgebung für HiL-Tests bzw. Modellkopplung und -transport.

4.1.2 Anwendungsbeispiel: Basismodell für Triebzüge

In diesem Abschnitt wird das Basismodell am Beispiel von Triebzügen angewendet. Dafür werden die Zugklasse sowie die generischen Basisklassen der darin enthaltenen Objekte erzeugt. Dieses Prinzip wird bis zu den waggoninternen Komponenten weitergeführt. In Bild 42 ist die Struktur des Simulationskonfigurators für Triebzüge dargestellt. Das Basismodell ist darin beliebig hinsichtlich verschiedener Typen und Simulationsmodi konfigurierbar. Für die Erstellung eines spezifischen Simulationsmodells wird ein Erbe erzeugt, konfiguriert und erweitert. Der Erbe wird mit einem Fahrschaltermodell zur Ansteuerung des Basismodells sowie einem TCN-Modell für die Kommunikation der Steuerbefehle erweitert, wodurch das funktionsfähige Simulationsmodell entsteht.

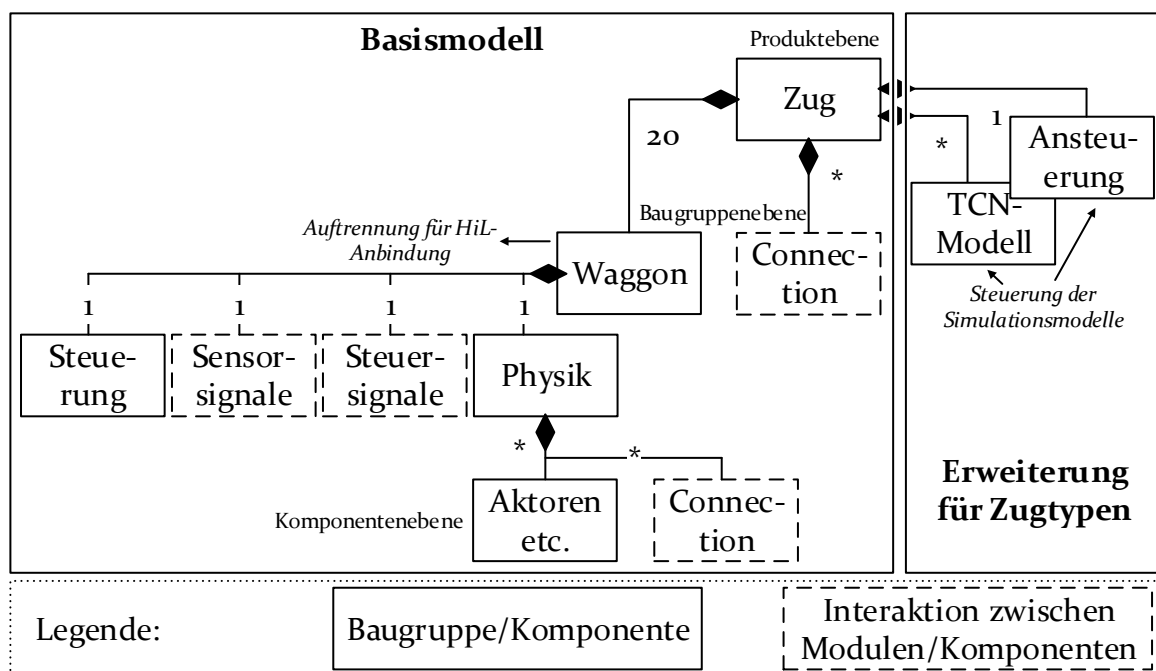


Bild 42: Basismodell und Erweiterung für den Simulationskonfigurator für Triebzüge mit bis zu 20 Waggonen

Zwischen Komponenten- und Produktebene werden Verbindungen mittels Referenzierung und Präfixen hergestellt. Auf diese Weise wird die Übermittlung von Parametern und Variablen, wie z. B. der Initialgeschwindigkeit oder der aktuellen Ist-Geschwindigkeit realisiert. Dies ist nötig, um von Produktebene aus die Simulation parametrieren sowie auf die Zustände des Modells zugreifen zu können.

Der „Physik“-Teil des Waggonmodells weist vier Fahrmotor- und mechanische Bremsmodelle für die vier Achsen auf. Die Fahrmotormodelle sind jeweils über ein Getriebe mit den Achsen verbunden. Die starren Teile des Waggonmodells umfassen rotatorische und translatorische Massen. Die Antriebs- oder Bremskräfte werden über den Gleiskontakt auf die Schiene übertragen. Das schwingungssensitive Modell einer mechanischen Kupplung stellt die kraftschlüssige

Verbindung zum Nachbarwaggonmodell dar. Es kommen ausschließlich Modelle mit einem einzigen Freiheitsgrad zum Einsatz. Dadurch wird die translatorische Bewegung der Waggonmodelle sowie die rotatorische Bewegung der antriebsbezogenen Modelle umsetzbar. Gleichzeitig wird die Modellkomplexität niedrig genug gehalten, dass die Simulationsmodelle schneller als in Echtzeit simuliert werden können, was eine Voraussetzung für die Durchführbarkeit von HiL-Simulationen ist.

4.2 Effiziente Konfigurierung von Varianten

Ziel dieses Unterkapitels ist die methodische Beschreibung, wie mittels eines Basismodells Simulationsmodelle individueller Produktkonfigurationen erzeugt werden können. Die Prinzipien von Basisklassen und generischen Objekten werden dafür zusammengeführt. Die Ausführungen basieren auf einer Vorarbeit des Autors und beschreiben im Vergleich dazu zusätzlich ein allgemeingültiges Verfahren [P1].

4.2.1 Metamodell für die effiziente Konfigurierung von Varianten

Ein großer Vorteil gegenüber Systemmodellen mit unveränderlichen Objekten ergibt sich aus der in Abschnitt 2.3.2 bereits vorgeschlagenen Nutzung generischer Klassen. Dadurch wird erreicht, dass Modelle wiederverwendet werden können und gemeinsam genutztes Modellverhalten teilweise nicht redundant implementiert werden muss. Generische Klassen ermöglichen mittels eines grundlegenden Modells die Erzeugung von Erben beliebig vieler Simulationsmodelle. Diese verschiedenen Varianten können z. B. unterschiedliche Baugruppen-Modelle enthalten. Das Vorgehen ist in Bild 43 dargestellt.

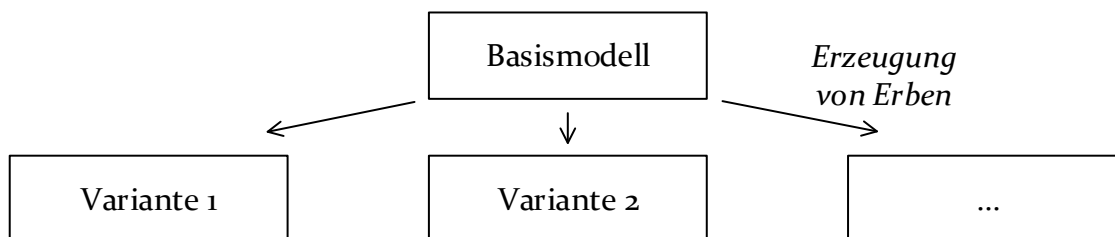


Bild 43: Konfiguration von Simulationsmodellen für Varianten ausgehend von einem Basismodell

Durch die konsequente Nutzung von Basisklassen nach Art von Bild 44 lässt sich eine durchgängige Generalisierung hinsichtlich verschiedener Konfigurationen realisieren. Dies kann beispielsweise zur virtuellen Entwurfsvalidierung sowie für HiL-Simulationen sinnvoll sein.

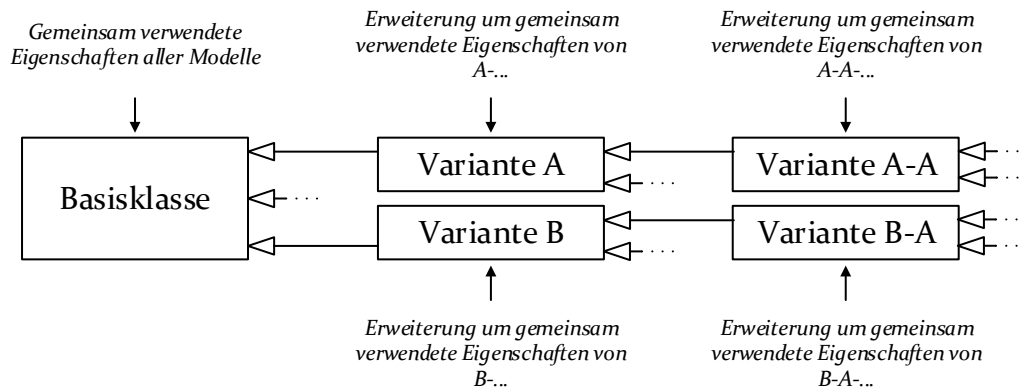
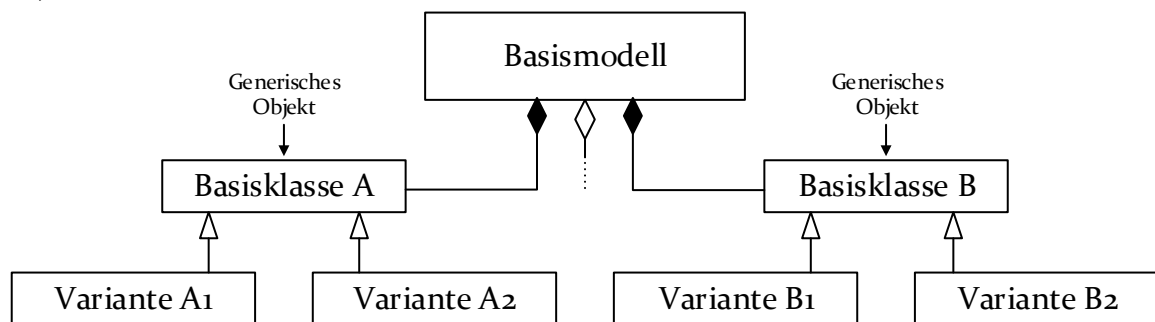


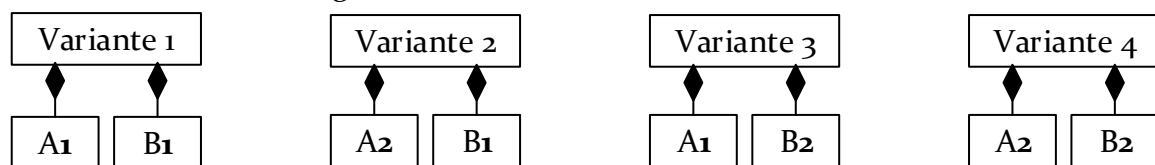
Bild 44: Strukturierung von Basisklassen hinsichtlich der Nutzung in Form generischer Objekte

Der Basisklasse werden alle Eigenschaften verliehen, die sämtliche Folgegenerationen verwenden. Diese nutzen die gemeinsamen Grundeigenschaften und fügen ihre individuellen Eigenschaften hinzu. Auf diese Weise werden sowohl Redundanzen vermieden als auch die Möglichkeit variabler Modellkomplexität geschaffen, worauf in Unterkapitel 4.3 eingegangen wird.

a) Flexibel ausbaubares Basismodell



b) Resultierende konfigurierbare Erben für Simulationen



c) Datenstruktur des Basismodells

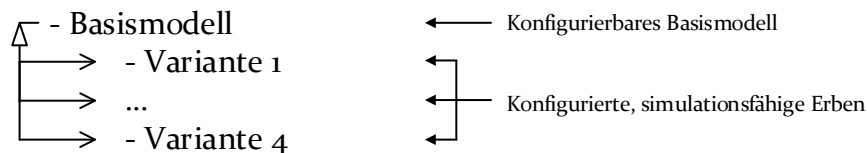


Bild 45: Basismodell durch Basisklassen mit generischen Objekten

Ab der obersten Baugruppenebene und unterhalb in der Erzeugnisgliederung werden nunmehr derartige Basisklassen als Objekte instanziiert. Dadurch wird eine konsequent modulare, effiziente Bauweise des Basismodells erreicht. Diese Objekte werden außerdem als generisch deklariert. Auf diese Weise wird erreicht, dass das Basismodell bei der Erzeugung von Erben hinsichtlich beliebiger Modulkombinationen konfiguriert werden kann.

Die Funktionalitäten werden anhand eines einfachen Basisklassenmodells mit zwei verschiedenen Baugruppen A und B in Bild 45 verdeutlicht. Darin ist ein Basismodell dargestellt, welches zwei für die Baugruppen stellvertretende Objekte von Basisklassen enthält, die als generisch deklariert sind. Sie können jeweils zwei verschiedene Varianten annehmen: Die Baugruppe A kann als A₁ bzw. A₂ konfiguriert werden, während B B₁ und B₂ annehmen kann. Wie in -a dargestellt ist, werden dafür von den Baugruppen-Basisklassen Erben für die jeweiligen Varianten erzeugt. In -b sind die daraus resultierenden Kombinationen ausgeführt, die aufgrund der im Basismodell komponierten generischen Objekte der Basisklassen konfiguriert werden können. Dafür wird für jede Kombination ein Erbe des Basismodells gebildet, wobei die gewünschte Konfiguration ausgewählt werden kann. In -c ist die resultierende Datenstruktur des Basismodells mit den dafür erzeugten Klassen aufgelistet, wie sie in der Modellbibliothek erscheinen. Für eine durchgängig modulare Bauweise von Basismodellen muss dieses Prinzip bis in die unterste Baugruppenebene durchgeführt werden.

Das Prinzip lässt sich auf beliebig viele Objekte ausweiten. Je durchdringender Module als generische Objekte von Basisklassen über die Gliederungsebenen hinterlegt werden, desto zweitaufwändiger wird die Vorbereitung der Modulkombinationen, um Simulationsmodelle zu konfigurieren, was an folgendem Anwendungsbeispiel deutlich wird.

4.2.2 Anwendungsbeispiel: Konfiguration unterschiedlicher Zugtypen

Die Methodik wird angewendet, um verschiedene Zugtypen, typeninterne Konfigurationsvarianten und die Vorbereitung von HiL-Tests zu realisieren. Am Beispiel der Waggon-Klasse wird dies näher erläutert.

In Bild 46 ist das vorher eingeführte Zugmodell aufgegriffen. Am Beispiel des Waggonmodells und der internen Module und Komponenten wird das Prinzip beschrieben. Die Waggon-Basisklasse wird als generisches Objekt im Zugmodell 20-fach instanziiert. Dadurch wird ein Zugmodell mit 20 Waggonen erhalten. Diese Waggonen lassen sich hinsichtlich beliebiger Kombinationen konfigurieren. Die hier beschriebene Trennung der Steuerung und Physik wird in Unterkapitel 4.4 näher betrachtet. Sie ist durch das Ziel motiviert, reale Steuerungs-Hardware am multiphysikalischen Zugmodell in HiL-Simulationen zu testen.

Das Steuerungs- sowie das Physik-Modell sind, wie auch das Waggon-Objekt, generische Objekte ihrer Basisklassen. Auf diese Weise lassen sich ihre Erben mittels Konfiguration auswählen. Das in der Abbildung dargestellte Basismodell erlaubt die Erzeugung von Erben für zwei verschiedene Arten von Modell, welche durch die Erben der „Steuerung“ gegeben sind. Einerseits kann ein multiphysikalisches Simulationsmodell durch Auswahl des „Steuerungsmodells“ vererbt werden. Andererseits bietet sich durch Auswahl von „FMI/FMU“ die Möglichkeit, das umgebende Restmodell („Physik“) des Waggons als Umgebungsmodell für ein reales Steuergerät in HiL-Simulation zu konfigurieren. In diesem Fall wird das Modell als FMU auf ein Echtzeitsystem exportiert. Die Schnittstellen der FMU werden über I/O-Karten mit dem Steuergerät verbunden.

Sollen unterschiedliche Zugtypen nach der Methodik für eine Simulation konfiguriert werden, werden die Module dafür von unterster bis in die oberste Gliederungsebene nach dem „bottom-up“-Prinzip komponiert [145]. Dies ist in Bild 47 exemplarisch durchgeführt. Dafür wird zunächst die Klassen-Generalisierung durchgeführt, was vertikal dargestellt ist. In diesem Rahmen werden für jede Klasse auf allen Gliederungsebenen so viele Generationen unterhalb der Basis-klassen erzeugt, bis Klassen für die typenspezifischen Komponenten, Waggons bzw. Züge existieren (in den drei Spalten jeweils die unterste Ebene).

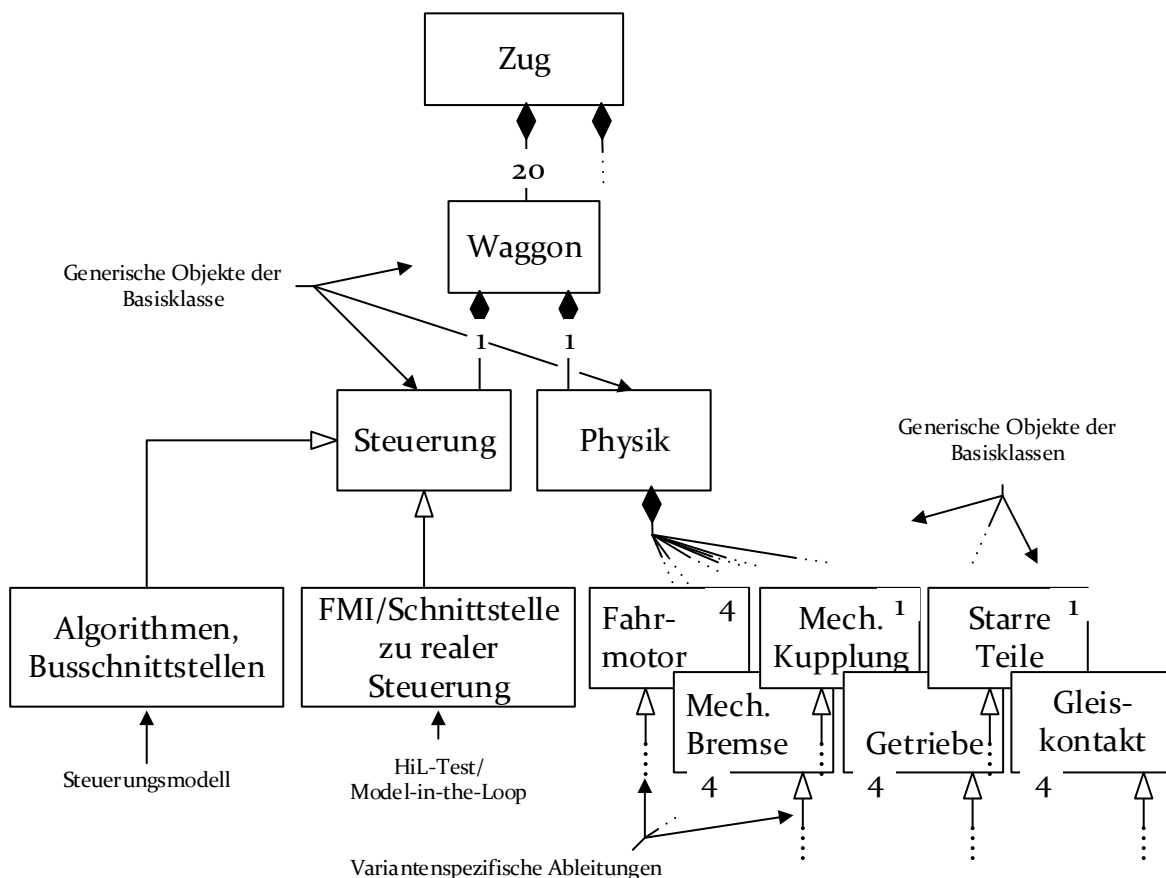


Bild 46: Generische Objekte im Zug-Basismodell, Generalisierung des Waggonmodells

Um einen bisweilen nicht erweiterten Erben zu einem Simulationsmodell zu erweitern, müssen darin die generischen Objekte der Basisklassen instanziiert und in mittels Connections verbunden werden. Beispielsweise wird die Klasse „Asynchron“ vierfach in der „Waggon“-Klasse komponiert, wodurch sämtliche Erben der „Motor“-Basisklasse in der „Waggon“-Klasse konfigurierbar sind. Die spezifischen Waggonen entstehen durch Erzeugung weiterer Generationen unterhalb der „Waggon“-Klasse. In der untersten Generation werden bei ihrer Erzeugung die in der „Waggon“-Klasse erzeugten generischen Objekte durch Auswahl der spezifischen Motoren konfiguriert (Pfeil unten links). Auf diese Weise wird bis zur Fertigstellung der individuellen Zugtypen-Modelle verfahren. Die Basis-klasse des Zugs ist das Basismodell.

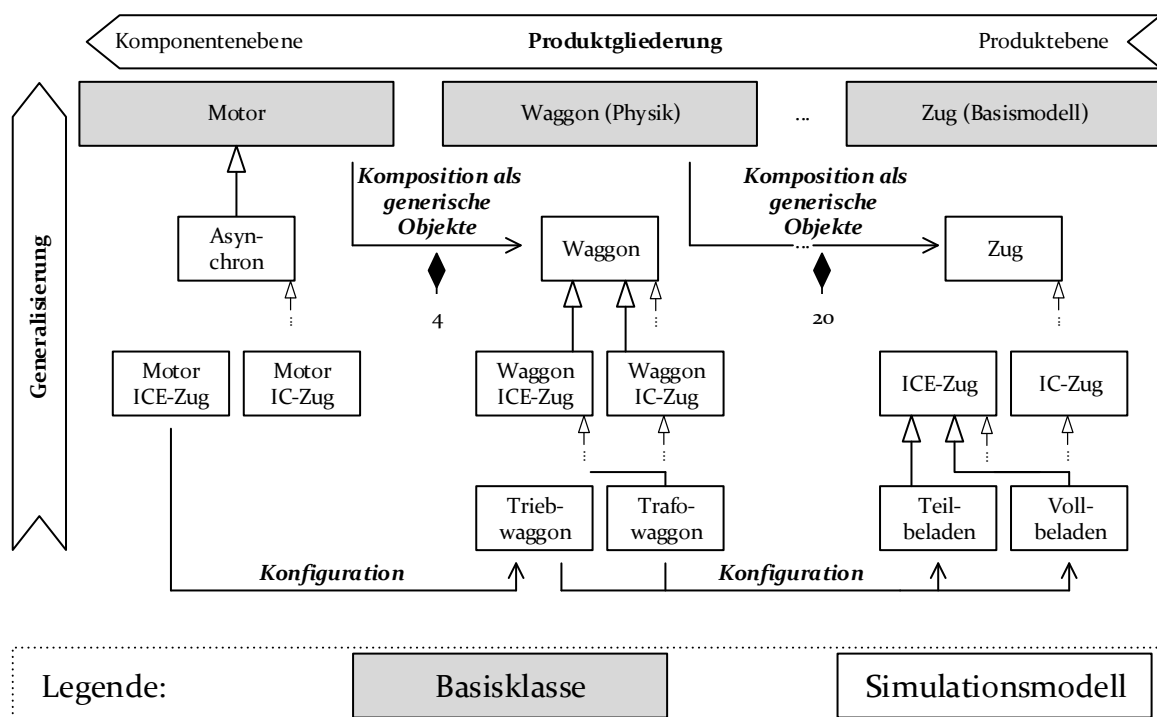


Bild 47: Sukzessiver „bottom-up“-Konfigurationsprozess der Modell-Klassen über die Erzeugnislageebenen am Beispiel unterschiedlicher Zug-Konfigurationen

Das beschriebene Vorgehen ermöglicht bisweilen ein aus 20 Waggonen bestehendes Basismodell, welches flexibel zu verschiedenen Zugtypen und Konfigurationen eines Typs ausgebaut werden kann. Die unterschiedlichen Waggonentypen können an beliebiger Position im Zugverband konfiguriert werden, da für jeden Waggon ein generisches Basisklassen-Objekt instanziiert ist. Um einen konkreten Typ zu realisieren, wird das Modell „bottom-up“ konfiguriert.

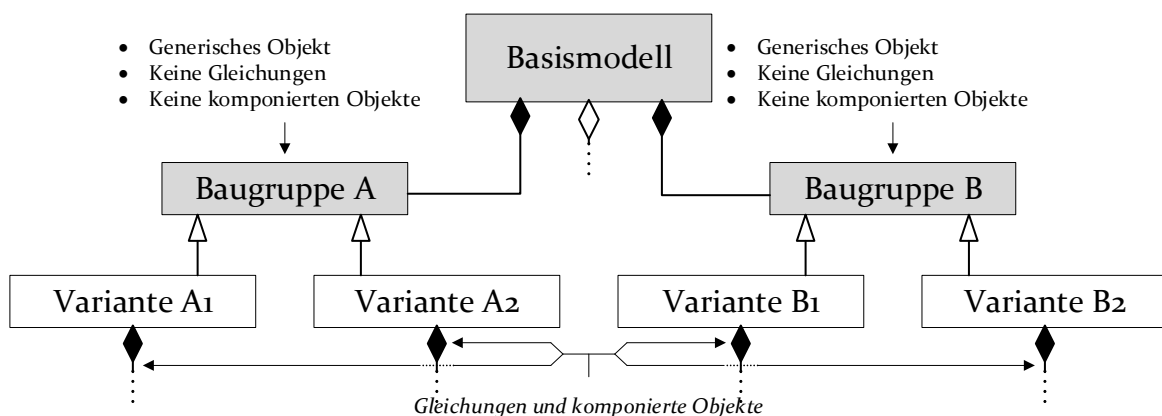
4.3 Variable Modellkomplexität

Eine variable Anzahl von Waggonen bzw. allgemein eine variable Modellkomplexität ist mittels des beschriebenen Verfahrens noch nicht möglich. Deshalb wird in diesem Unterkapitel eine Methode vorgestellt, wie diese Funktionalität mittels objektorientierter Modellentwicklung erreicht werden kann.

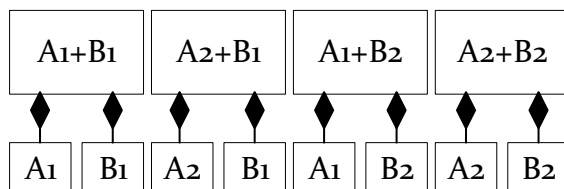
4.3.1 Metamodell für variable Modellkomplexität

Damit sich die Komplexität des Basismodells variieren lässt, wird nachfolgend eine Methode erörtert, mittels derer generische Objekte in Modellen während Simulationen entfallen können. Neben der Nutzung von generischen Objekten von Basisklassen entsprechend Unterkapitel 4.2 müssen dafür die Basisklassen frei von Gleichungen und komponierten Objekten sein. Dadurch werden die Differentialgleichungen sowie etwaige Algorithmen während der Simulation nicht mitberechnet, wenn ein Modul entfällt. Das Metamodell ist in Bild 48a dargestellt.

a) Basismodell für variable Modellkomplexität



b) Bisher mögliche Erben des Basismodells durch generische Objekte von Basisklassen



c) Zusätzlich mögliche Erben mit reduzierter Komplexität durch angepasste Basisklassen

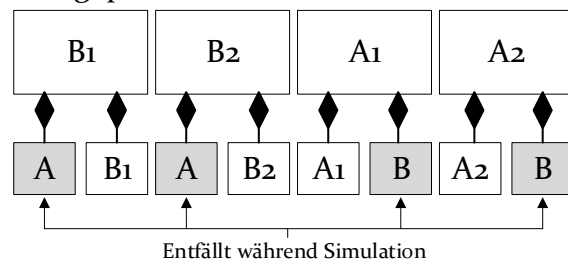


Bild 48: Gleichungsfreie Basisklassen und dadurch zusätzlich mögliche komplexitätsreduzierte Digitale Zwillinge

Wenn ein Erbe des Basismodells gebildet wird, um ein typenspezifisches Simulationsmodell zu konfigurieren, werden für A und B anstatt der Varianten A1 oder A2 bzw. B1 oder B2 deren Basisklassen an sich ausgewählt. Somit können die Objekte A und B wahlweise frei von Gleichungen und Objekten sein, was während der Simulation dem Entfallen eines Moduls entspricht. Das Prinzip lässt sich auf jeder Modellebene anwenden, sodass die Komplexität der zu modellierenden mechatronischen Systeme bis auf Komponentenebene nach Bedarf reduziert werden kann.

In Bild 48b sind die bisher möglichen Varianten aus Unterkapitel 4.2 erneut aufgegriffen und den neuen Möglichkeiten in Bild 48c gegenübergestellt, die aus der Auswahl der Basisklassen folgen. Demnach können mittels Konfiguration der Baugruppen-Basisklassen außerdem Varianten erzeugt werden, bei denen diese Module entfallen.

4.3.2 Anwendungsbeispiel: variable Waggonanzahlen im Zugmodell

Beim Simulationskonfigurator für Triebzüge kommt das Prinzip der variablen Modellkomplexität bei der Realisierung unterschiedlicher Waggonzahlen zum Einsatz. Nach dem bisherigen Stand lassen sich lediglich Züge mit einer konstanten Waggonanzahl von 20 konfigurieren. Das Modell stößt dann an seine Grenzen, wenn Zugmodelle mit weniger Waggonen konfiguriert werden sollen.

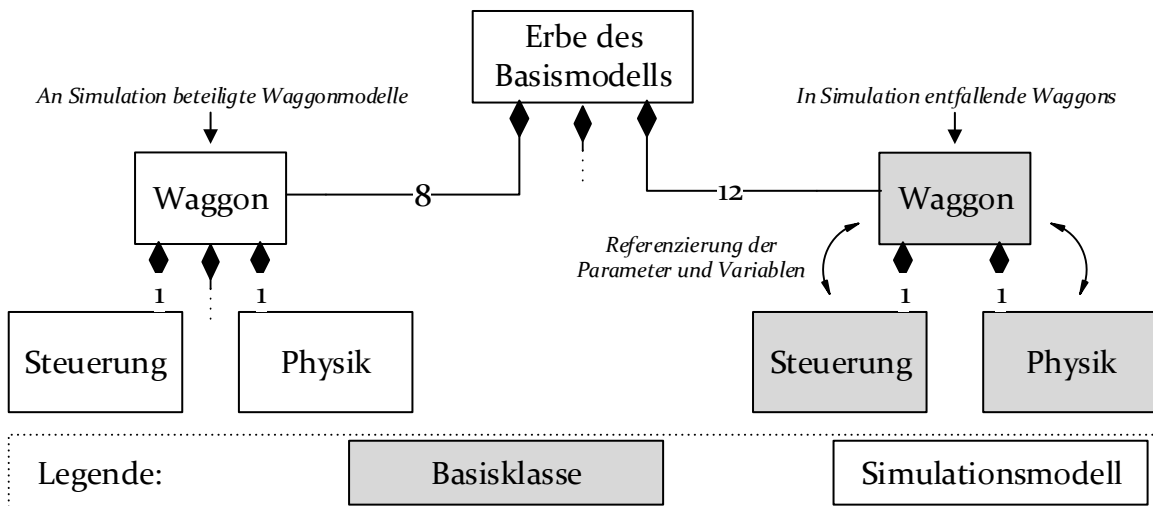
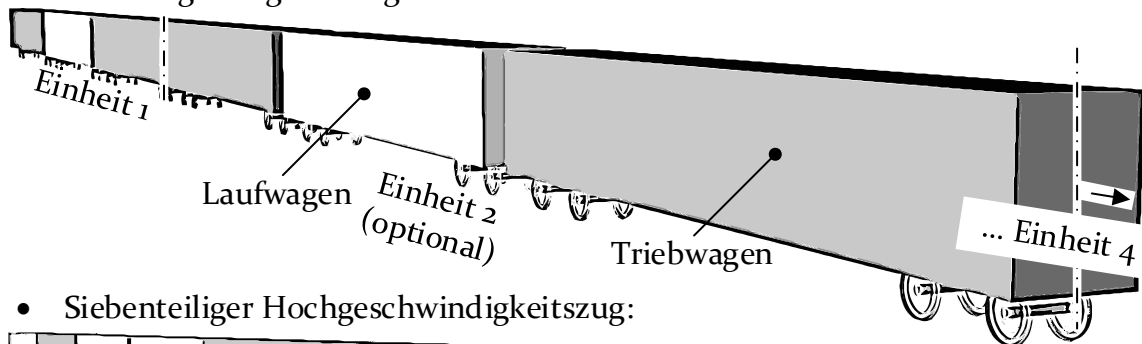


Bild 49: Konfiguration eines Erben des Zug-Basismodells für einen simulationsfähigen Digitalen Zwilling eines achteiligen Hochgeschwindigkeitszugs

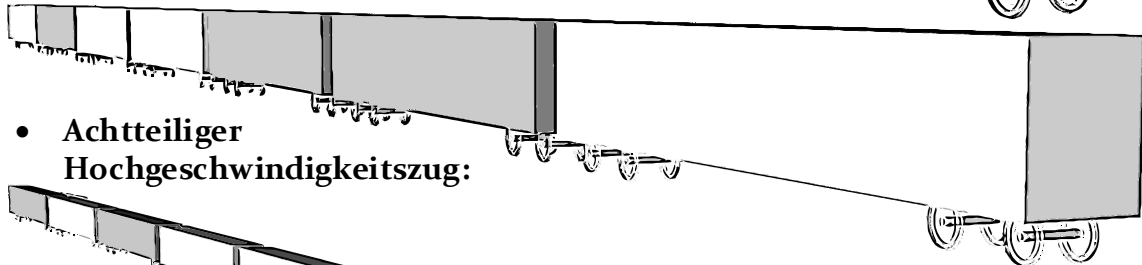
Durch Anwendung des Prinzips wird jedoch eine variable Waggonanzahl möglich, wie in Bild 49 exemplarisch für einen achteiligen Hochgeschwindigkeitszug dargestellt ist. Dafür wird entsprechend Bild 47 ein Waggontyp vorbereitet, dessen Module durch Basisklassen anstatt einem ihrer Erben konfiguriert werden. Auf diese Weise entfallen während Simulationen die Objekte der Klassen „Steuerung“ und „Physik“. Dadurch entfällt der Waggon während der Simulationen. Als dieser neue Waggontyp werden bei der Erzeugung des Erbens des Basismodells zur Abbildung eines spezifischen Zugtyps die entfallenden Waggonen konfiguriert.

Exemplarisch lassen sich acht Objekte mit Waggonmodellen sowie zwölf Objekte mit dem neuen Typ konfigurieren, die während der Simulation keine Gleichungen zum Modell beitragen. Der dadurch erhaltene Digitale Zwilling verhält sich demnach wie das Modell eines achteiligen Hochgeschwindigkeitszugs.

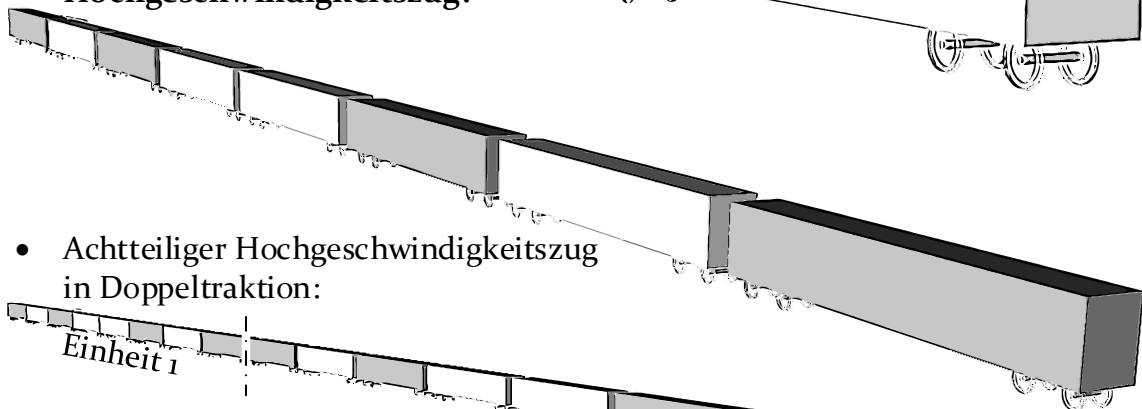
- Dreiteiliger Regionalzug in Mehrfachtraktion:



- Siebenteiliger Hochgeschwindigkeitszug:



- Achteiliger Hochgeschwindigkeitszug:



- Achteiliger Hochgeschwindigkeitszug in Doppeltraktion:

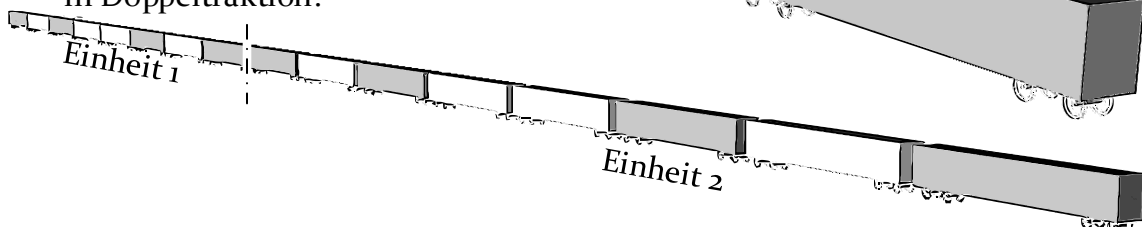


Bild 50: 3D-Repräsentationen der für betrachtete Simulationsanwendungen mittels Vererbung vom Basismodell erzeugten Triebzugmodelle

Die in Bild 50 aufgezeigten Modelle sind die dreidimensionalen Repräsentationen der in dieser Arbeit in Simulationsanwendungen zum Einsatz kommenden Zugmodelle. Die grafische Darstellung wurde gewählt, um die Unterscheidungsmerkmale hervorzuheben. Die grauen Waggonen darin sind TW, während die weißen LW entsprechen und sich von ersteren durch das Fehlen der Fahrmotormodelle unterscheiden, was durch unterschiedliche Parametrisierung umgesetzt ist. Von den unterschiedlichen Typen abgesehen können Züge in Mehrfachtraktion vorkommen, was der Kopplung mehrerer Einheiten eines Zugtyps entspricht, die mittels einer automatischen Mittelpufferkupplung vollzogen wird. Das dritte Modell von oben entspricht dem in Bild 49 dargestellten Erben des Basismodells.

4.4 Schnittstellenintegration zur Modellkopplung

Multiphysikalische Systemmodelle weisen neben der simulationsbasierten Validierung des Produktentwurfes den Vorteil auf, dass sie als Umgebungsmodelle für Systemkomponenten in HiL-Tests fungieren können. Dies liegt in ihrer Anforderung begründet, die essenziellen Produktfunktionen virtuell nachzustellen. Die herkömmlicher Weise verwendeten Umgebungsmodelle simulieren in der Regel lediglich das gezielte Auftreten von Sensorsignalen, um zu prüfen, ob die zu testenden Steuergeräte auf Stimuli korrekt reagieren. Komplexes Systemverhalten, wie bei multiphysikalischen Modellen, wird jedoch nicht berücksichtigt, die deshalb für HiL-Tests befähigt werden sollten. Zwar können die Softwarefunktionen mit einfachen Sensormodellen systematisch getestet werden. Fehlerhaftes Verhalten, welches sich jedoch nicht in den vorgesehenen Sensorwerten widerspiegelt, wie am Beispiel von Triebzügen die Längsschwingungen, bleibt bei herkömmlichen HiL-Prüfungen unerkannt.

Die in Kapitel 2 zitierten Ansätze für multiphysikalische Modelle von mechatronischen Systemen weisen jedoch viele nichtgeneralisierte und nichtgenerische Objekte auf, die zusammen das Simulationsmodell des Produkts bilden. Dadurch entbehrt das Modell einer modularen Architektur, und Modellmodule liegen oftmals nicht in einer Form vor, die die realen Schnittstellen aufweist, wie in Bild 51 dargestellt ist. Darin sind exemplarisch die zu zwei Baugruppen A und B gehörenden Modellteile eines fiktiven multiphysikalischen Produktmodells dargestellt. Diese enthalten die Objekte 1 bis 5 und sind durch Modelica-Connections verbunden. Tatsächlich können auch mehr als zwei Baugruppen vorliegen.

Wenn solche Komponenten im Modell durch reale Komponenten in einem HiL-Prüfstand ersetzt werden sollen, ist es schwierig, fragmentiert gestaltete Modelle realitätsgetreu zu modularisieren. Dafür müssen die Schnittstellen an die realen Komponenten angeglichen und generische Objekte eingeführt werden. Da fragmentierte Modelle der Ausgangspunkt für viele bereits vorhandene multiphysikalische Systemmodelle sind, muss eine Methode gefunden werden, in diese

Modelle Schnittstellen zu integrieren, die den Austausch von modularen Modellen bzw. die Kopplung mit domänenspezifischen Simulationswerkzeugen ermöglicht. Außerdem ist es empfehlenswert, Modelle derart von Anfang an zu strukturieren, damit eine möglichst effiziente Modellnutzung stattfinden kann.

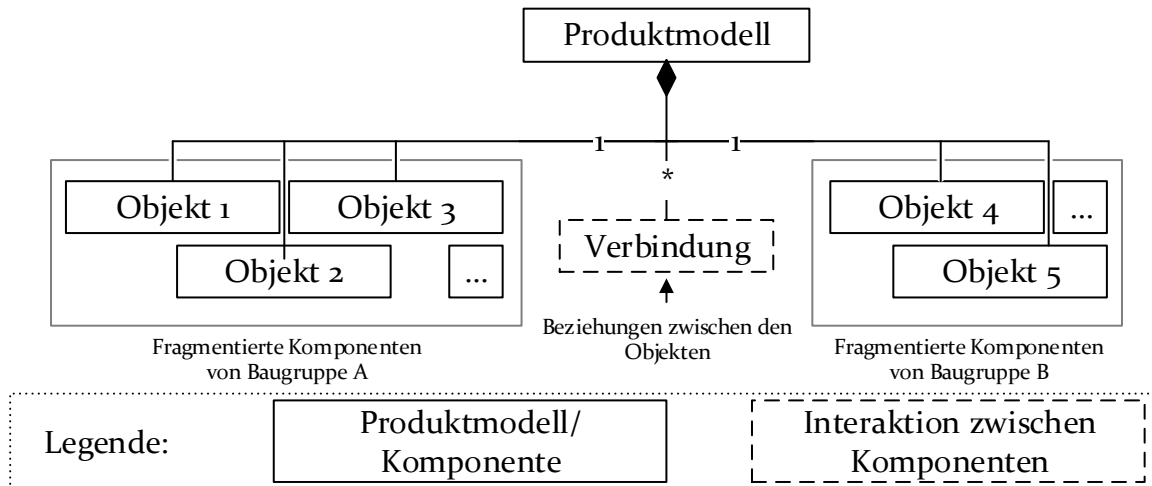


Bild 51: Fragmentierte Modellobjekte ohne für die Modellanbindung bzw. den Modelltransport notwendige Modularisierung

Um das Prinzip nachvollziehen zu können, werden nun die für Modelica typischen Modelica-Connections und -Connectors genauer vorgestellt, die eine einheitliche Schnittstellenbildung ermöglichen. Zwei oder mehr Objekte eines Modells werden an ihren Connectors über Connections miteinander verbunden, über die der Signalfluss zwischen den Komponenten stattfindet (Bild 52).

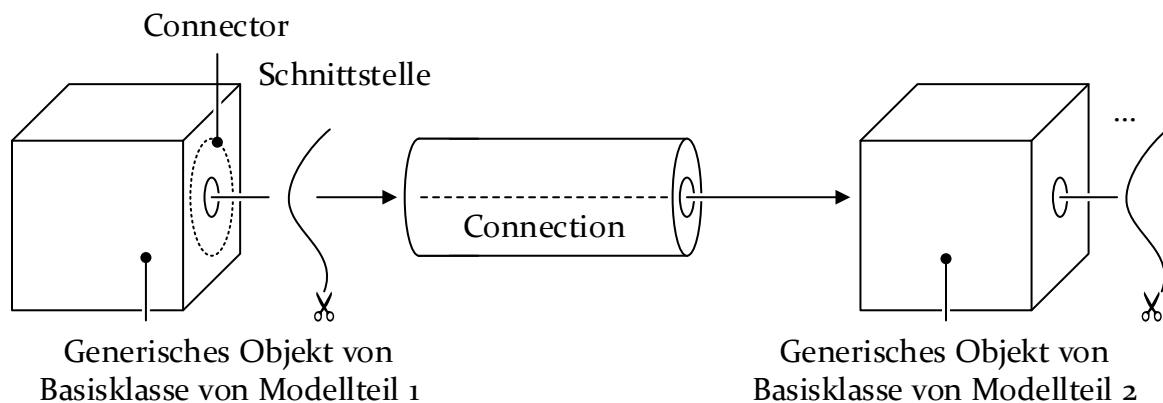


Bild 52: Modelica Connections und Connectors [18]

Durch die Bedingung, dass die Summe des Flusses aller Connectors Null ist, wird sichergestellt, dass die physikalischen Gesetze der Energie- bzw. Massenerhaltung über die Schnittstellen beachtet werden. Durch die vorgestellten Schnittstellen lassen sich physikalische Verbindungen modellieren, wie beispielsweise Bus- sowie Stromkabel, Kontaktflächen, Kraftschlüsse etc. Modelica-fremde objektorientierte Modellierungswerkzeuge weisen gleiche Funktionalitäten auf, sodass das Prinzip übertragbar ist. [146–148]

Durch die flexible Anpassung der Connections und Connectors an Modell- sowie reale Sensorsignale bzw. Steuergrößen eignet sich das Prinzip gut für die Verbindung multiphysikalischer Modelle mit den Signalen realer Komponenten und Baugruppen. Deshalb wird nachfolgend eine allgemeingültige Methodik für diesen Vorgang beschreiben.

4.4.1 Metamodell für Schnittstellen zur Modellkopplung

Das Prinzip der methodischen Modularisierung ist anhand von Bild 53 veranschaulicht. Darin wird das Beispiel aus Bild 51 aufgegriffen. Prinzipiell muss eine modulare Aufspaltung des betrachteten Systems gemäß der Module A und B vollzogen werden.

Die im fragmentierten Produktmodell enthaltenen Komponenten greifen auf Eigenschaften des Produktmodells zu. Daraus leitet sich die Methode einer gemeinsamen „Basisklasse A und B“ ab, von der die Modul-Basisklassen „Basisklasse Modul A/B“ erben und somit die kompletten Eigenschaften übernehmen. Das vorhergehende System wird dafür auf die „Basisklasse A und B“ reduziert und nimmt somit seine Eigenschaften an, die durch die Vererbung an die Modul-Basisklassen weitergegeben werden. Auf diese wird von den jeweils enthaltenen Komponenten zugegriffen. Zu diesem Zweck wird jeweils ein Objekt der Modul-Basisklassen in der gemeinsamen „Basisklasse A und B“ instanziiert. Durch Referenzierung der Eigenschaften der gemeinsamen Basisklasse mit den jeweiligen Modul-Basisklassen gelingt die Eigenschaften-Verknüpfung, ohne dass die Eigenschaften neu erzeugt werden müssen. Vorhandene Modelleigenschaften können somit effizient wiederverwendet werden.

Das Ziel der Methode ist eine durch Auswahl konfigurierbare Wahl des Simulationsmodus, wodurch optional HiL-Simulation oder Simulation eines komplett multiphysikalischen Modells durchführbar sein soll. Diese Möglichkeit ist neben der damit einhergehenden Konfigurationsflexibilität des Basismodells eine effektive Methode, HiL durch Model-in-the-Loop-Tests (MiL) vorzubereiten, was in Abschnitt 5.2.3 exemplarisch demonstriert wird. Zunächst werden dafür die Schnittstellen zwischen der Komponente und ihrem multiphysikalischen Umgebungsmodell unter Nutzung des MiL vorbereitet, getestet und validiert. Sobald das multiphysikalische Umgebungsmodell anforderungsgemäß funktioniert, kann das MiL gegen die HiL-Komponente ausgetauscht werden.

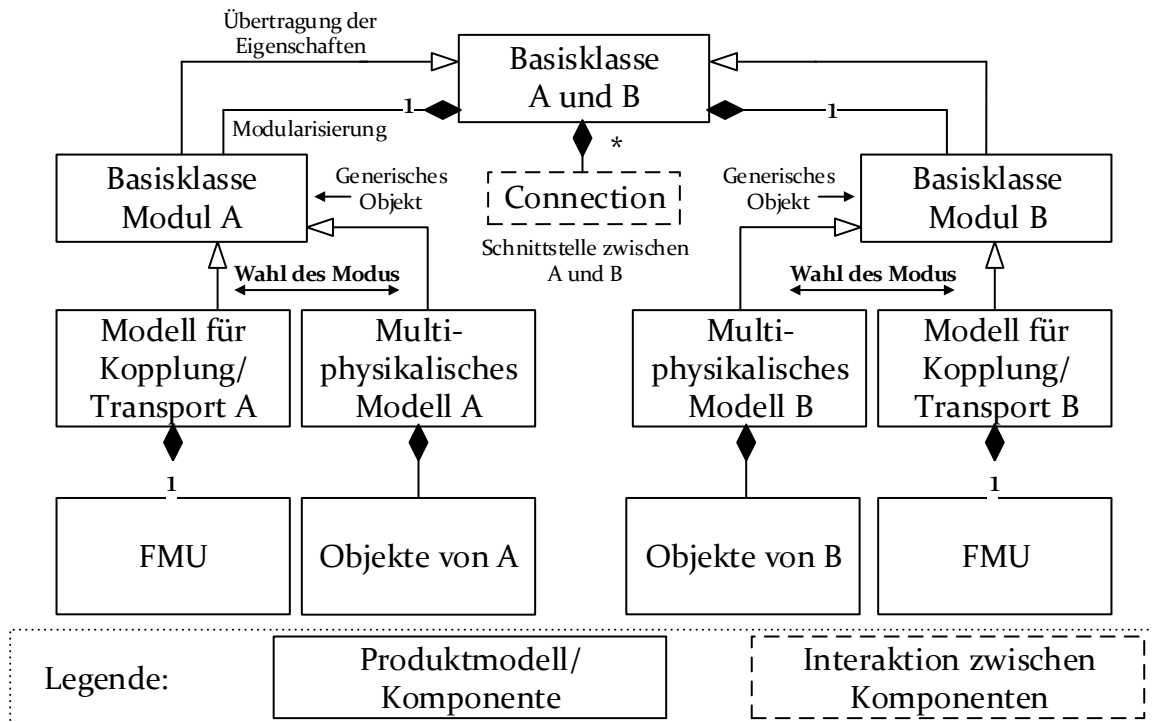


Bild 53: Aufgeteiltes Modell mit wählbaren Modulen für die konfigurationsbasierte und optionale Integration von Schnittstellen

Indem die Modul-Basisklassen als generisch deklariert werden, wird diese Moduswahl erreicht. Wird ein Erbe der „Basisklasse A und B“ erzeugt, können nämlich ihre Alternativen Erben beliebig ausgewählt werden. Somit lassen sich die multiphysikalischen Modelle (Objekte von A und B) des einen Moduls mit der FMU des anderen kombinieren. Werden die Module entsprechend der Teilung in die Steuerung und ihre Umgebung angelegt, kann die Steuerung wahlweise durch eine FMU konfiguriert werden, mittels der ein physisches Steuergerät in HiL-Simulation an das Umgebungsmodell angebunden werden kann. Die Signale der Verbindungen („Connection“) zwischen den beiden Modulen müssen entsprechend der realen Kommunikation zwischen Steuergerät und Umgebung angepasst werden. In Abschnitt 4.4.2 ist dieses Beispiel am Simulationskonfigurator für Triebzüge dokumentiert.

Abgesehen von den HiL-Möglichkeiten lassen sich auf diese Weise weitere alternative Modi in die Konfigurationsmöglichkeiten einbeziehen. Über FMI lassen sich somit auch Modelltransport und Co-Simulation realisieren, wobei der „FMU“-Teil für das externe Modell steht, welches darüber importiert oder gekoppelt werden kann.

Die Folgegenerationen der Basisklassen werden nach dem bereits in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Prinzip erzeugt. Dadurch lassen sich die Module des Basismodells variantengerecht konfigurieren, sodass das Basismodell an die geforderten Varianten anpassbar wird.

4.4.2 Anwendungsbeispiel: Auftrennung des Waggonmodells in Steuerung und umgebende multiphysikalische Modelle

Die Trennung der steuerungsbezogenen und elektromechanischen Modellteile des Waggonmodells ist bereits in Bild 46 angedeutet. In Bild 54 wird zusätzlich erklärt, wie das Basismodell für MiL- bzw. HiL-Simulationen mittels der Methode konfiguriert werden kann.

Darin sind das Steuerungs- sowie das Physik-Modul (für die multiphysikalischen Modellkomponenten) mittels der Connections verbunden, über die Signale während der Simulation ausgetauscht werden. Dabei sendet die Steuerung Soll-Antriebsmomente bzw. -Bremskräfte über zwei Connections an die Elektromechanik. Das darin enthaltene multiphysikalische Waggonmodell wird dadurch angeregt und ändert dadurch seine Ist-Geschwindigkeit und damit auch die antriebs- und abtriebsseitigen Ist-Drehzahlen. Diese werden über zwei weitere Connections an das Steuerungsmodell zurückgeleitet und repräsentieren Sensorwerte. Sie dienen der Steuerung als Berechnungsgrundlage neuer Soll-Momente bzw. -Kräfte.

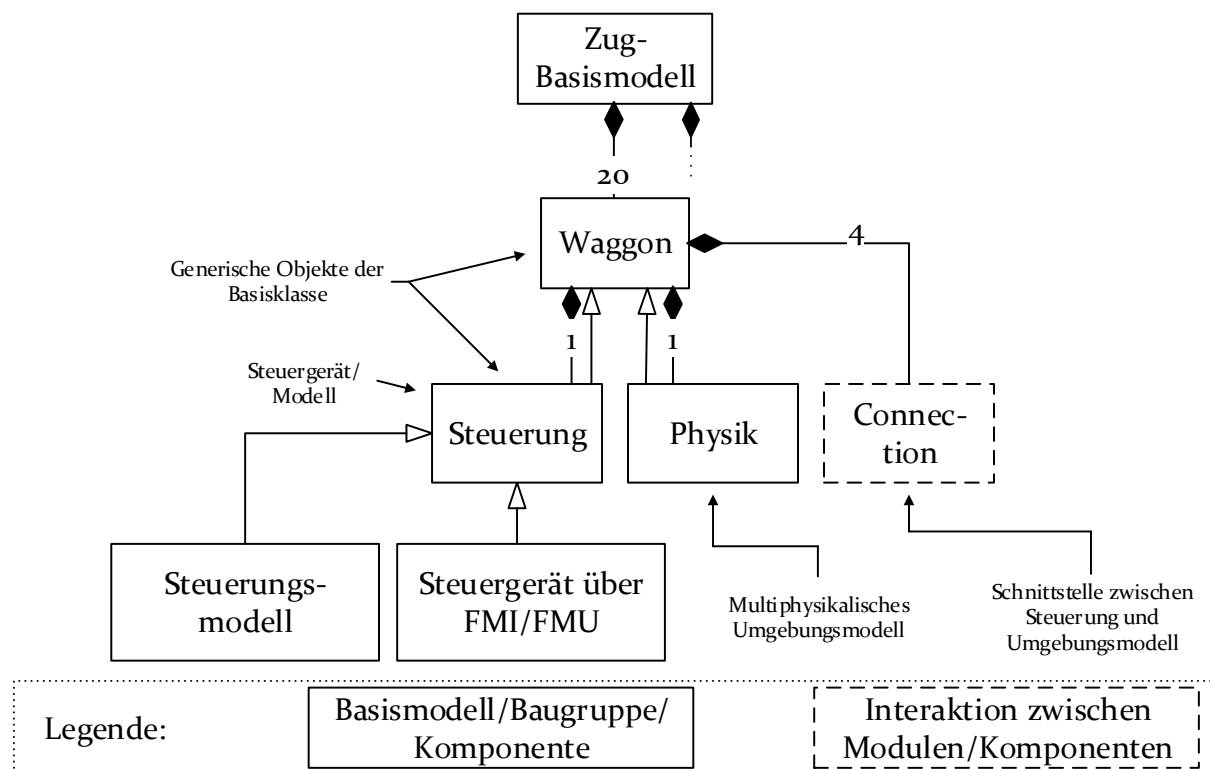


Bild 54: Modularisierung des Waggonmodells für den Modellexport zwecks HiL-Simulation der elektromechanischen Waggonmodelle als Umgebungsmodelle für Zug-Steuergeräte

Das Modelica-„Steuerungsmodell“ ist wahlweise für die Basisklasse „Steuerung“ konfigurierbar, die in der „Waggon“-Basisklasse instanziiert ist. Das Modell wird ausgewählt, wenn das multiphysikalische Zugmodell vollständig samt Steuerung simuliert werden soll. Alternativ kann ein Modell mit einer FMU ausgewählt werden. Wird ein Erbe der „Waggon“-Basisklasse erzeugt und dabei mit den entsprechenden FMU-Modulen implementiert, entsteht das elektromechanische Waggonmodell mitsamt der für die Anbindung an reale Steuergeräte notwendigen Schnittstellen als FMU. Dieser Waggonotyp wird durch Erzeugung eines Erben der Zug-Basisklasse jeweils für die Waggonen konfiguriert. Das resultierende Simulationsmodell kann auf ein Echtzeitsystem exportiert und als virtuelles Umgebungsmodell für ein reales Steuergerät in HiL-Simulation verwendet werden. In diesem Fall berechnet das reale Steuergerät ebenfalls Soll-Momente und -Kräfte, die jedoch anstatt an reale Aktoren an die virtuellen Aktoren des multiphysikalischen HiL-Modells auf dem Echtzeitsystem übergeben werden.

Damit jedoch ein einzelnes Steuergerät auf diese Weise getestet werden kann und seine gesamte Umgebung als Simulationsmodell ausgeführt werden kann, ist es erforderlich, dass die Module des Basismodells – in diesem Fall die Waggonen – gemäß Bild 40 in Abschnitt 4.1.1 über Schnittstellen für Feldbusse zur Anbindung an ein reales TCN verfügen. Dann können die übrigen Waggonmodelle in dasselbe TCN wie das zu testende Steuergerät angebunden werden, wobei die übrigen Steuergerätmodelle die restlichen Bus-Teilnehmer simulieren. Unter dieser Voraussetzung ist es für die Vorbereitung von HiL mittels MiL-Simulationen nötig, dass das Modell ebenfalls ein Feldbusmodell nutzen kann, welcher nachfolgend eingeführt wird.

4.5 Anbindung von Modulen über ein Feldbusmodell

Wie in Kapitel 2 bereits beschrieben wurde, reichen dafür herkömmliche Modelle nicht aus. Deshalb wird nachfolgend ein Feldbusmodell vorgestellt, das sich an die Teilnehmeranzahl anpassen kann und für die Signale der verschiedenen Teilnehmer und Signale eindeutige Adressen aufweist. Somit reale Feldbusse nachbildend ist das Feldbusmodell mittels I/O-Karten daran anbindbar.

4.5.1 Metamodell für das Feldbusmodell

Die Ausgangssituation ist ein Basismodell, in dem Objekte von Baugruppen-Modulen instanziiert sind. Die Basisklassen dieser Objekte müssen um eine Schnittstelle für den Anschluss an das Feldbusmodell erweitert werden.

Die Signale dieser Schnittstelle werden an die Signale des realen Feldbus angepasst und mit den Steueralgorithm Input- und Output-Daten des Steuerungsteils des Moduls verknüpft. In Bild 55 sind dies die grau hinterlegten

Objekte namens „Bus-Anschluss“. Diese Modifikation bereitet das Basismodell auf die Verbindung mit dem Feldbusmodell vor.

Werden durch Vererbung des Basismodells variantenspezifische Simulationsmodelle erzeugt, wird es um Objekte des Feldbusmodells erweitert. Die exemplarische Ausgangslage ist ein Basismodell, welches zwei „Busteilnehmer“ A und B enthält. Dieses besteht aus einem Datenfeld sowie einem weiteren „Bus-Anschluss“, der mit denen des Basismodells verbunden wird. Die Argumente m und n des Datenfelds entsprechen jeweils der Teilnehmeranzahl bzw. der Anzahl der im Feldbus geführten Signale. Jedes Signal und jeder Teilnehmer bekommen somit eine eindeutige Adresse zugewiesen. Für eine Synchronisation des Feldbusmodells mit dem physischen Feldbus in HiL-Simulationen müssen Signale und Teilnehmer jeweils in derselben Reihenfolge sein.

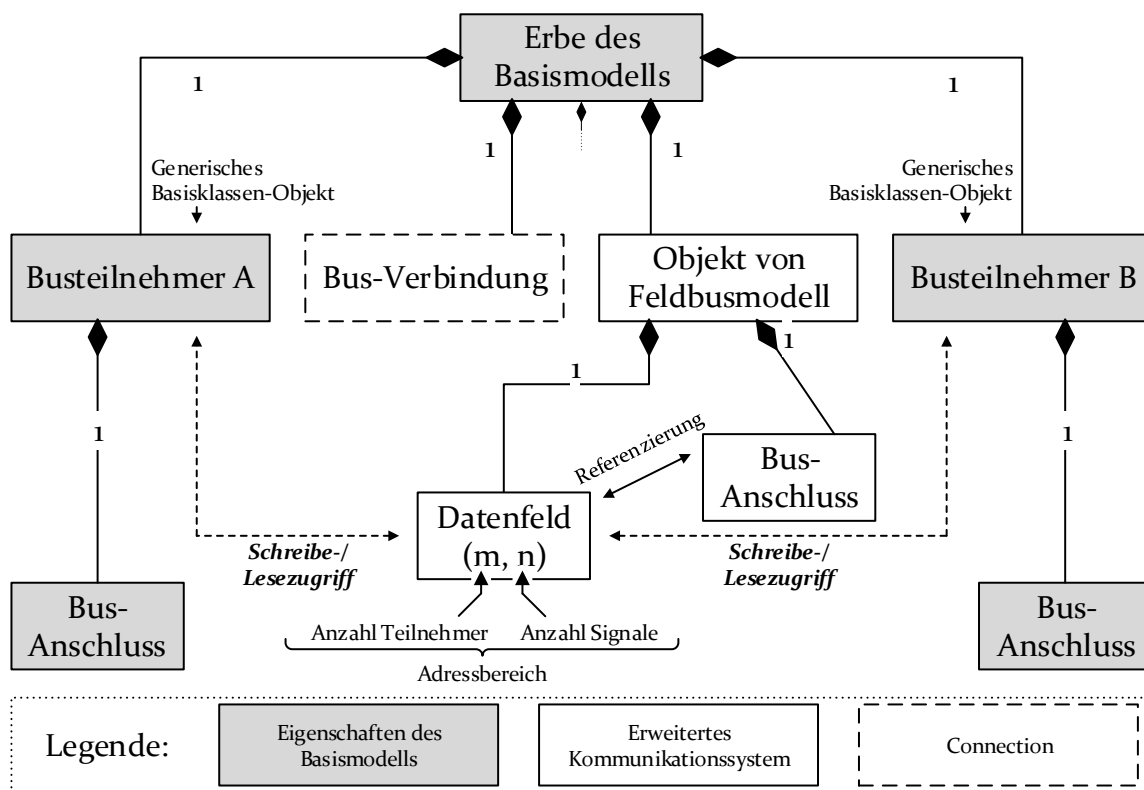


Bild 55: Multiphysikalisches Systemmodell mit eingebundenem Feldbusmodell zum Signalaustausch zwischen den teilnehmenden Modulen über Connections, Connectors und ein gemeinsam zugreifbares Datenfeld

Über die „Bus-Verbindung“ und die darüber verbundenen Objekte „Bus-Anschluss“ ist das Datenfeld mit dem Feldbusmodell sowie den „Busteilnehmern“ des Basismodells referenziert. Dadurch wird das Datenfeld für die „Busteilnehmer“ zugreifbar. Indem sie während der Simulation auf Signale ihrer Schnittstellen zugreifen, greifen sie über die „Bus-Verbindung“ direkt auf das im Feldbusmodell enthaltene Datenfeld zu. Durch Steueralgorithmen lassen sich somit gezielte Bereiche des Datenfelds adressieren, dadurch beschreiben und auslesen. Auf diese Weise lassen sich systemweit Signale speichern und lesen, wodurch sich

Steueralgorithmien umsetzen lassen. Werden Module über einen realen Feldbus angebunden, wird diese Funktionalität auf diesen angewendet, sodass auf die Input- und Output-Werte eines realen Steuergeräts zugegriffen werden kann.

Sobald das Berechnungsverfahren während der Simulation die Variablen für einen neuen Zeitschritt berechnet, werden die durch den Steueralgorithmus berechneten Größen auf das Datenfeld geschrieben bzw. aus ihm eingelesen. Das synchrone Verhalten des Busmodells und des restlichen multiphysikalischen Modells wird sichergestellt, da der Lese-/Schreibalgorithmus genauso Bestandteil der Modellgleichungen ist wie die physikalischen Differentialgleichungen. Alle Gleichungen werden pro Zeitschritt einmal ausgewertet, sodass sowohl die Daten im Datenfeld geschrieben bzw. gelesen werden als auch das physikalische Verhalten ermittelt wird, die miteinander referenziert sind. Deshalb ist es erforderlich, dass die Rechenschrittweite der Dynamik des Systems angepasst ist. Dann wird das Gleichungssystem berechenbar, und die Lösungen erreichen ausreichende Genauigkeiten. Für eine dynamisch angepasste Zeitschrittweite sorgen zur Verfügung stehende Lösungsverfahren. [149]

Auf diese Weise lassen sich Steuerungs- und Regelungsmechanismen über das Feldbusmodell realisieren. Die Kommunikation kann wegen der Adressierungsmöglichkeit je nach Aufgabe zwischen beliebigen Teilnehmern stattfinden. Dieses Verhalten wird je nach Simulationsmodus durch die Steueralgorithmien der teilnehmenden Modellmodule bzw. die HiL-Komponente definiert.

Das in diesem Modell demonstrierte Kommunikationsprinzip lässt sich auf eine beliebige Anzahl von Teilnehmern und Signalen ausweiten, die in fortgeschrittenen mechatronischen Systemen zum Teil in großer Zahl auftreten. Die Lese-/Schreibalgorithmen werden anforderungsgerecht programmiert, sodass Regelungs- und Steuerprozesse realer Systeme nachempfunden werden können. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit mehrerer hierarchisch angeordneter Bus, wie sie beispielsweise im TCN von Eisenbahnen benötigt werden.

Durch die hier dargelegte Methode zur Kommunikation zwischen den Modellteilen besteht neben der Einbindung realer Hardware in die Simulation die Grundlage zur Modellierung fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Der Ansatz unterstützt variable Modellkomplexität und erreicht eine adressbasierte Kommunikation der Teilnehmer, die sich somit unterschiedlichen Funktionalitäten bzw. Programmierungen anpassen kann. Damit eignen sich die Module des Basismodells dafür, realistische Steuerungsalgorithmien anzunehmen, wodurch es sich effizient für MiL-Anwendungen verwenden lässt, die die Vorstufe von HiL sind. Zunächst wird ein modellhafter Steuerungsalgorithmus beispielsweise in Modelica programmiert, anhand dessen das multiphysikalische Basismodell getestet und validiert wird. Ist dieser Schritt beendet, kann das MiL-Loop durch HiL getauscht werden. Dieser Prozess ist beispielhaft in Abschnitt 5.2.3 dokumentiert.

Darüber hinaus können durch Nutzung der Modellalgorithmen unterschiedlichste Simulationsszenarien zentral und effizient über ein HMI-Modell parametrisiert werden. Dadurch lassen sich bereits während der Entwurfsphase von Produkten Systemfehler virtuell systematisch suchen und ihre Ursachen beheben, bevor Folgekosten entstehen können.

4.5.2 Anwendungsbeispiel: Integration eines TCN-Modells

Ein TCN besteht immer aus zwei Feldbussen, die über die Steuergeräte der Waggonen miteinander gekoppelt sind. Die detaillierte Konfiguration verschiedener Zugtypen und -hersteller kann sich unterscheiden. Dadurch lassen sich flexible Zugkonfigurationen realisieren.

Die Motivation der hierin gewählten Konfigurationsmöglichkeiten adressiert eine flexible Zusammenfassung von beliebig vielen Waggonen zu einer Einheit innerhalb eines Zugs, dargestellt in Bild 56. Dies ist zur Modellierung der Steuerungsarchitektur des hierin betrachteten dreiteiligen Regionalzugs notwendig; drei Waggonen sind im Adressbereich eines Waggonbusses zusammengefasst. Übergeordnet wird der Zug-Bus eingerichtet, der die Fahrbefehle des Fahrshaltermodells in die Einheiten aufteilt und an die Waggonbusse weiterleitet. Bei den hier betrachteten Hochgeschwindigkeitszügen ist jedem Waggon ein eigener Waggonbus zugeordnet, wie u. a. auch dem Modell in Bild 57. Dadurch ergeben sich Einheiten, die lediglich einen Waggon umfassen. Auf diese Weise ist eine Vielzahl von realen Steuerungsarchitekturen im Modell abbildbar.

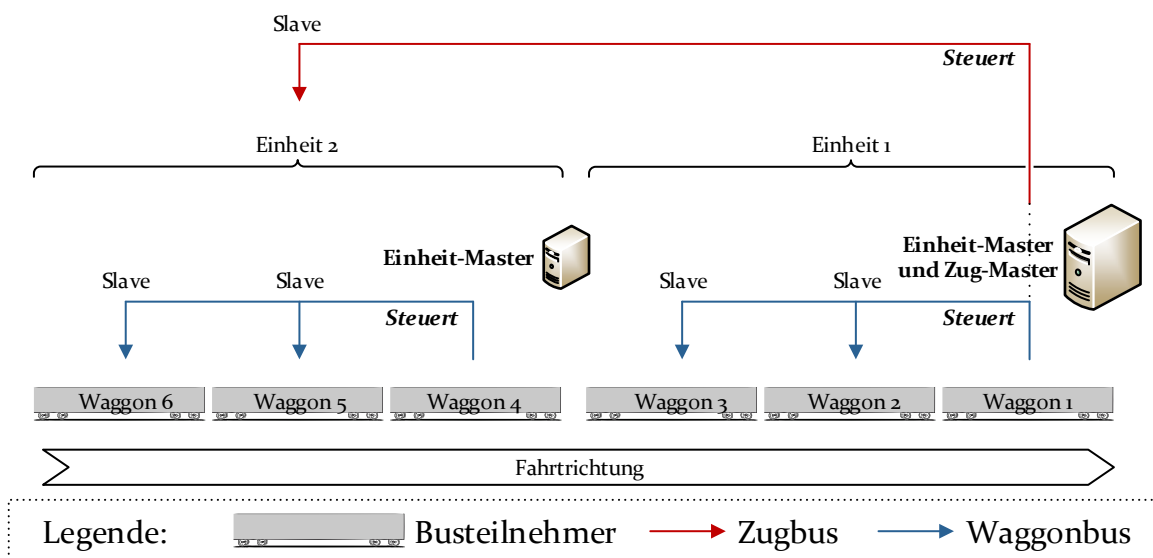
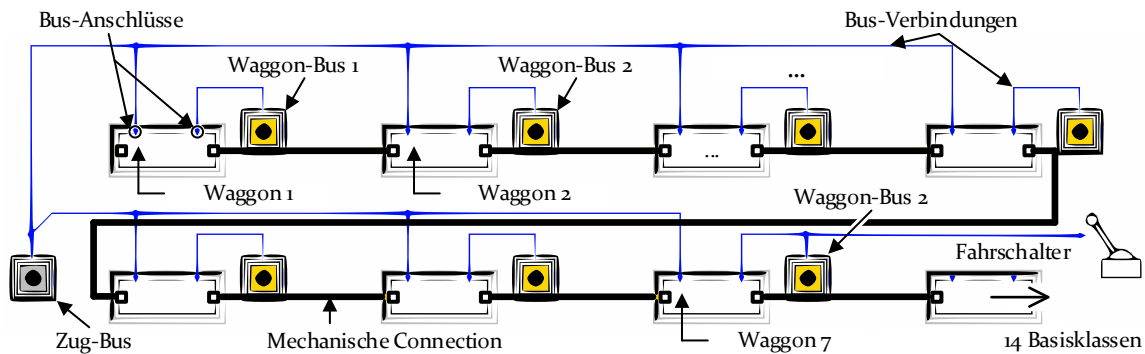


Bild 56: Steuerung eines dreiteiligen Regionalzugs in Mehrfachtraktion über das als TCN konfigurierte Feldbusmodell

a) Grafische Repräsentation der Objekte in multiphysikalischen Simulationswerkzeugen



b) UML-Darstellung

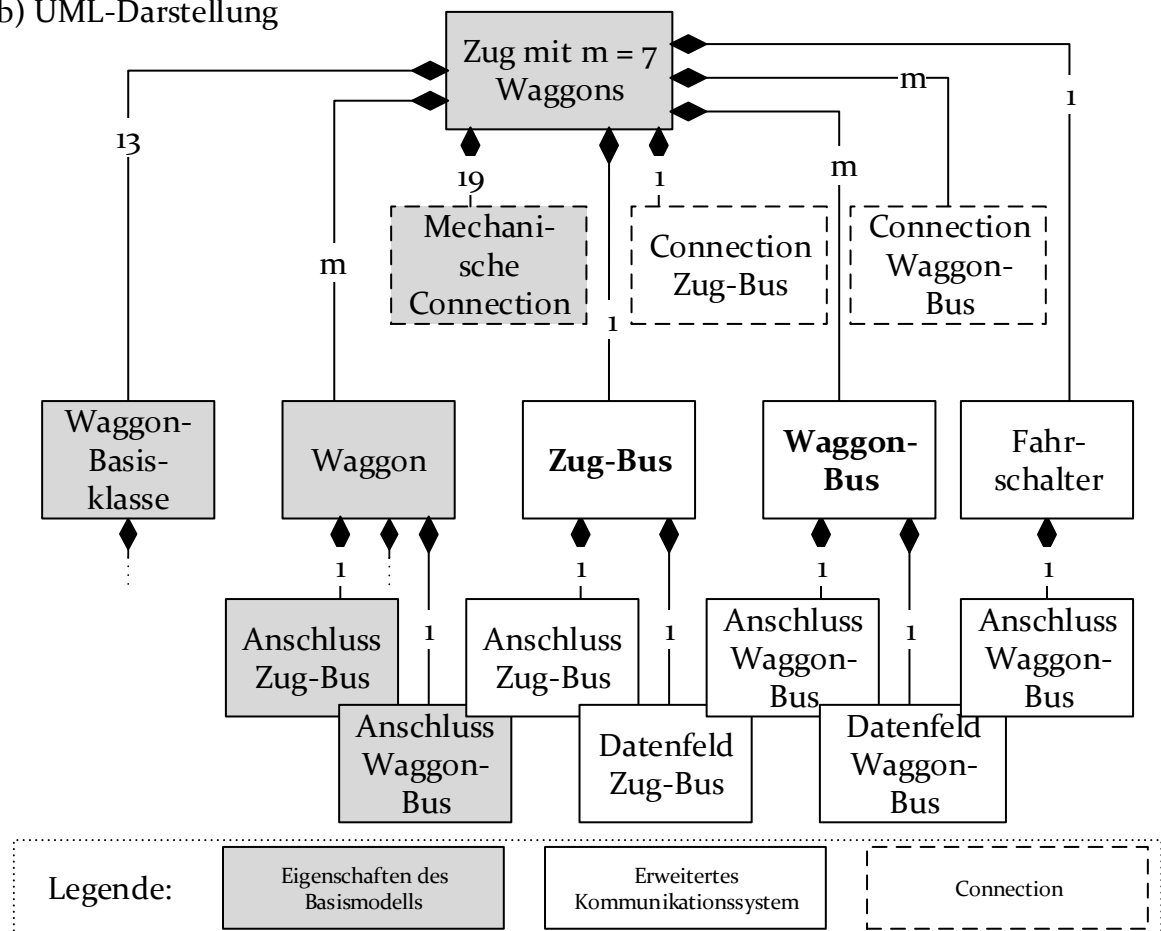


Bild 57: Konfiguration eines sieben teiligen Hochgeschwindigkeitszugs mit ergänztem TCN- („Zug-Bus“, „Waggon-Bus“) und Fahrschalter-Modell

Die Einheiten und Waggons sowie der Gesamtzug haben jeweils in ihren Bussen Master- und Slave-Funktionalitäten. Die Einheiten werden durch ihren Einheiten-Master befehligt, während der Gesamtzug durch den Zug-Master befehligt wird, welcher immer im voranfahrenden Waggon lokalisiert ist, wie auch in realen Triebzügen. Dies trifft auch auf die Einheiten-Master zu. Bei Richtungswechsel konfigurieren sie sich automatisch um. Demnach nehmen in diesem Fall

die Steuerungsmodelle der Waggon 6 und 3 anstatt 4 und 1 die Masterfunktionalität an. Der Zug-Master wird durch Parametrierung aktiv, die bei Richtungswechsel manuell vorgenommen wird. Die mit dem Richtungswechsel verbundene Änderung der Steuerungsfunktionalitäten verändert auch die Lese- und Schreibrechte auf die Busse. Diese flexible Steuerungsfunktionalität wird durch den Einsatz des Feldbusmodells umsetzbar.

In Bild 57 ist die Ergänzung eines als siebenteiliger Hochgeschwindigkeitszug konfigurierten Modells um das TCN-Modell veranschaulicht. In -a ist die Visualisierung des um das TCN-Modell individuell ergänzte Basismodell dargestellt. Im Rahmen dieser Erweiterung werden Objekte des Feldbusmodells für den Gesamtzug sowie für die Einheiten im Modell grafisch instanziiert und mit den dafür vorgesehenen Bus-Anschlüssen der Waggon über die blau dargestellten Linien verbunden, welche Modelica-Connections sind. Zug-Bus sowie Waggon-Busse unterscheiden sich durch parametrisch unterschiedliche Adresszuweisungen von den Daten im Datenfeld zu den Signalen des Steuerungsmodells in den Waggonobjekten. Sollen die Waggon-Objekte zwecks HiL-Simulation an ein reales TCN angebunden werden, müssen zunächst die Adressen an jene der spezifischen Steuerungsarchitektur angepasst werden.

Das Steuerungsmodell wird durch Hinzufügen des Fahrschaltermodells und die Verbindung mit dem Waggon-Bus des vordersten Waggon komplettiert. Das Fahrschaltermodell hat die Funktion, eine darin parametrisierte Soll-Bremskraft oder -Zugkraft auf die dafür vorgesehene Adresse im Datenfeld des Waggonbusses des führenden Einheiten-Masters zu schreiben. Diese Kraft wird durch das Steuerungsmodell während der Simulation für die Einheiten aufgeteilt und über den Zugbus an deren Master weitergeleitet. Innerhalb der Einheiten werden die Steuerbefehle in den Aktormodellen umgesetzt. Das Modell ist nach Ergänzung des TCN-Modells und Anbindung des Fahrschaltermodells simulationsfähig. Die korrekte Steuerung innerhalb der Einheiten gelingt durch Rückmeldung von simulierten Sensorwerten, wie z. B. die aktuelle Radgeschwindigkeit, auf deren Basis die Steuerungsmodelle die befohlene Kraft berechnen. Diese Größen werden in den dafür vorgesehenen Adressen der Busse geschrieben und gelesen. In Bild 57b ist die Systemarchitektur angelehnt an Abschnitt 4.5.1 dargestellt. Darin sind die zum Basismodell gehörigen Objekte grau sowie hinterlegt. Die weißen Objekte repräsentiert die individuelle Erweiterung für die variantenspezifischen Simulationsmodelle.

Mittels des vorgestellten TCN-Modells lassen sich die Steuerungsmodelle der Waggonmodelle an ein Kommunikationsmodell anbinden, mittels dessen sich unter Hinzufügen eines Fahrschaltermodells Steuerszenarien in Simulationen effizient parametrieren lassen. Dadurch lassen sich beispielsweise Bremsung, Beschleunigung und Fahrten in unterschiedliche Richtung realisieren. Außerdem lassen sich indirektes sowie EP-Bremsung simulieren. Erstes ist insbesondere für die resultierenden, starken Längsschwingungen langer Züge wichtig. Darüber

hinaus lassen sich die Waggonen über ihre Bus-Anschlüsse und I/O-Karten mit realen Steuergeräten für HiL-Simulation verbinden, wodurch sich reale Steuerungsalgorithmen in Bezug auf die Längsdynamik testen lassen. [150]

4.6 Prozess der Strukturierung multiphysikalischer Simulationskonfiguratoren

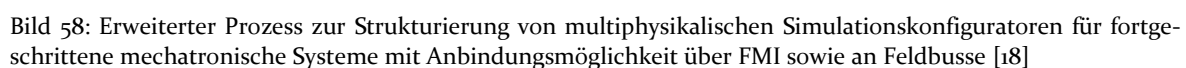
Der in Abschnitt 2.3.6 beschriebene Prozess zur Erstellung von multiphysikalischen Simulationsmodellen für mechatronische Systeme ist einerseits nicht ausreichend detailliert, andererseits lässt er wesentliche Anforderungen zur Modellierung fortgeschrittener mechatronischer Systeme unberücksichtigt. Das in den Unterkapitel 4.1 bis 4.5 erörterte Metamodell beschreibt Methoden, die die Strukturierung eines adaptiven, flexibel konfigurierbaren Basismodells ermöglichen. Mittels Vererbung und Ergänzung des Basismodells lassen sich individualisierte Simulationsmodelle fortgeschrittener mechatronischer Produkte erzeugen. Die Methoden beinhalten jedoch keinen systematischen Prozess zur sukzessiven Erstellung des Basismodells, wodurch der Kontext zwischen den Methoden nicht vollständig ersichtlich wird. Dieser Prozess wird in diesem Unterkapitel dokumentiert.

Der im Stand der Technik in Bild 22 beschriebene Prozess zur Erstellung multiphysikalischer Modelle birgt drei wesentliche Einschränkungen. Diese werden nachfolgend zusammengefasst.

- Zum einen geschieht der Entwurf analog und muss im Nachhinein im Modellierungswerkzeug wiederholt werden, wo die entworfene Struktur nachgeahmt wird.
- Des Weiteren ist keine Anpassung des Modells an Varianten möglich, bei der die Modellmodule wiederverwendet werden.
- Eine Anbindbarkeit an die Entwicklungsumgebung mechatronischer Produkte ist nicht möglich, wodurch das Potential ungenutzt bleibt, interdisziplinäre Aktivitäten während Entwicklungsprozessen zu fördern.

Der in Bild 58 beschriebene Prozess greift diese Mängel auf. Für die Durchführung der ersten beiden Schritte im V-Modell eignet sich beispielsweise SysML zur Planung der Erzeugnisgliederungsebenen sowie der zu integrierenden Schnittstellen zur Anbindung des Modells an die Entwicklungsumgebung über FMI und Feldbusse.

Im nächsten Schritt werden die Basisklassen angelegt, die die Produktarchitektur repräsentieren. Von diesen Basisklassen werden gemäß Unterkapitel 4.2 die notwendigen Klassen-Generalisierungen durchgeführt, um sämtliche Produktvarianten und -untervarianten darstellen zu können (z. B. Motor → Asynchronmotor → Asynchronmotor ICE etc.). Darüber hinaus werdend die Basisklassen



In die Basisklassen werden die modellinternen Schnittstellen erzeugt, über die die Module miteinander während Simulationen interagieren. Außerdem werden darin gemäß Unterkapitel 4.4 die Schnittstellen erzeugt, die die Bus-Anbindung sowie Kopplung des späteren Basismodells an die Entwicklungsumgebung mittels FMI ermöglichen.

In der Implementierungsphase werden die Komponenten-Klassen nach Bedarf mit Gleichungen und Objekten von Modellen des Modellierungswerkzeugs versehen, die das mechatronische Verhalten beschreiben. Im Falle des Simulationskonfigurators für Triebzüge sind dies die Komponenten und Gleichungen innerhalb des „Physik“-Teils aus Bild 46. Indem dieser Schritt zuletzt passiert,

ist die Strukturierung von der Verhaltensbeschreibung der Komponenten unabhängig. Dadurch kann das multiphysikalische Verhalten jederzeit effizient an den jeweiligen Entwurfsstand angepasst werden.

Das Basismodell wird zuletzt komponiert (rechter Schenkel des V-Modells). Dazu werden die generischen Objekte von Basisklassen entsprechend der Methode aus Unterkapitel 4.3 auf in der Gliederung höherer Ebene instanziiert und verbunden. Dieses Prinzip wird „bottom-up“ von Komponentenebene bis hin zum Basismodell des Produkt nach dem Vorgehen aus Bild 47 durchgeführt.

Tabelle 7: Unterschiede des erweiterten Modellierungsprozesses gegenüber dem herkömmlichen Prozess

| Herkömmlicher Prozess | Erweiterter Prozess |
|---|--|
| Analoge Modellentwicklung | Digitale Modellentwicklung |
| Mangelnde Konfigurierbarkeit | Flexibel Konfigurierbares Basismodell |
| Keine Schnittstellen | Schnittstellen für Anbindung an Entwicklungsumgebung |
| Nur korrektive Anwendung | Auch präventive Anwendung in der Entwicklung |
| Keine integrierten Steuerungsfunktionalitäten | Fortgeschrittenes mechatronisches Verhalten durch integriertes Feldbusmodell |
| Keine Verwendungsmöglichkeit der Modelle für HiL-Simulationen | Konfiguration von HiL-Umgebungsmodellen für variabel skalierbare HiL-Setups |

Das Basismodell steht für die Erzeugung von Erben bereit, die mittels des Feldbusmodells zu variantenspezifischen, ausführbaren Digitalen Zwillingen nach der Methodik aus Unterkapitel 4.5 erweitert werden können. Es können unterschiedliche Simulationsmodi ausgewählt werden, die eine rein multiphysikalische Simulation oder HiL-Simulation bzw. Modellkopplung oder -transport über FMI ermöglichen.

Dieses Vorgehen erweitert die Funktionalität des herkömmlichen Prozesses deutlich, wie aus Tabelle 7 hervorgeht. Die mittels des Basismodells darstellbaren Simulationsmodelle können durch das flexible Feldbusmodell die Funktionalitäten fortgeschrittener mechatronischer Systeme erfüllen. Die Modelle sind über FMI und Feldbusse an die Entwicklungsumgebung sowie durch die flexible Komplexität und Konfigurierbarkeit an sehr heterogene Varianten anpassbar. Dadurch können Entwürfe fortgeschrittener mechatronischer Produkte zukünftig effizient virtuell validiert werden.

4.7 Fazit

Aus dem Stand der Forschung gehen lediglich die grundlegenden Nutzungsprinzipien objektorientierter, multiphysikalischer Modellsprachen hervor. Damit lassen sich multiphysikalische Simulationsmodelle erstellen, die begrenzte Konfigurations- und Kommunikationsmöglichkeiten aufweisen. Dies ist durch die mangelnde Adaptionfähigkeit zur Darstellung von Varianten unterschiedlicher Komplexität sowie die fehlende Anbindungsmöglichkeit domänenspezifischer Modelle als auch physischer, mechatronischer Komponenten begründet. Darüber hinaus fehlt eine Methodik, das Steuerverhalten mechatronischer Systeme in die Simulationsmodelle zu integrieren.

Dieser Stand beschreibt eine Entwicklungsstufe, die der zu Validierungszwecken erforderlichen Simulation fortgeschrittener mechatronischer Systeme nicht mehr gerecht wird. Zur Erfüllung der an die Modelle gestellten dynamischen Anforderungen, eine große Variantenvielfalt, einen hohen Vernetzungsgrad und variable Produktkomplexitäten abzubilden, bedarf es neuer Ansätze. Solche lassen sich diesem Kapitel entnehmen.

Das darin vorgestellte Metamodell ermöglicht die Erzeugung von Simulationskonfiguratoren für fortgeschrittene mechatronische Systeme mittels eines parametrisch konfigurierbaren Basismodells. Der Mehrwert durch das Metamodell gegenüber dem Stand der Forschung ist in Bild 59 zusammengefasst. Die Simulationskonfiguratoren sind in der Lage, modulare Simulationsmodelle unterschiedlicher Komplexität mit konfigurierbaren Modelleigenschaften und einer komplexitätsadaptiven Kommunikation zwischen den Modellmodulen zu erzeugen. Dadurch nehmen die Modelle die Eigenschaften Digitaler Zwillinge an, die das mechatronische Produktverhalten simulativ nachstellen können.

Durch ein Integrationskonzept für FMI wird die Einbindung domänenspezifischer Modelle oder physischer mechatronischer Komponenten ermöglicht. Ein individuell an die Modellkomplexität anpassbares Feldbusmodell ergänzt bisher fehlende Steuerfunktionalitäten. Außerdem stellt es die Schnittstelle zu realen Bussen dar, sodass multiphysikalische Modelle mit realen Steuergeräten kommunizieren können. Entsprechend konfigurierte Modelle fungieren als ganzheitliche Umgebungsmodelle für Steuergeräte, welche sowohl die steuerungsseitige als auch physikalische Peripherie der Steuergeräte simulieren können. Auf diese Weise lassen sich Testumgebungen für Steuergeräte auf die zu testende Komponente reduzieren, sodass aufwändige Aufbauten kompletter Steuerungssysteme obsolet und die Tests effizienter werden.

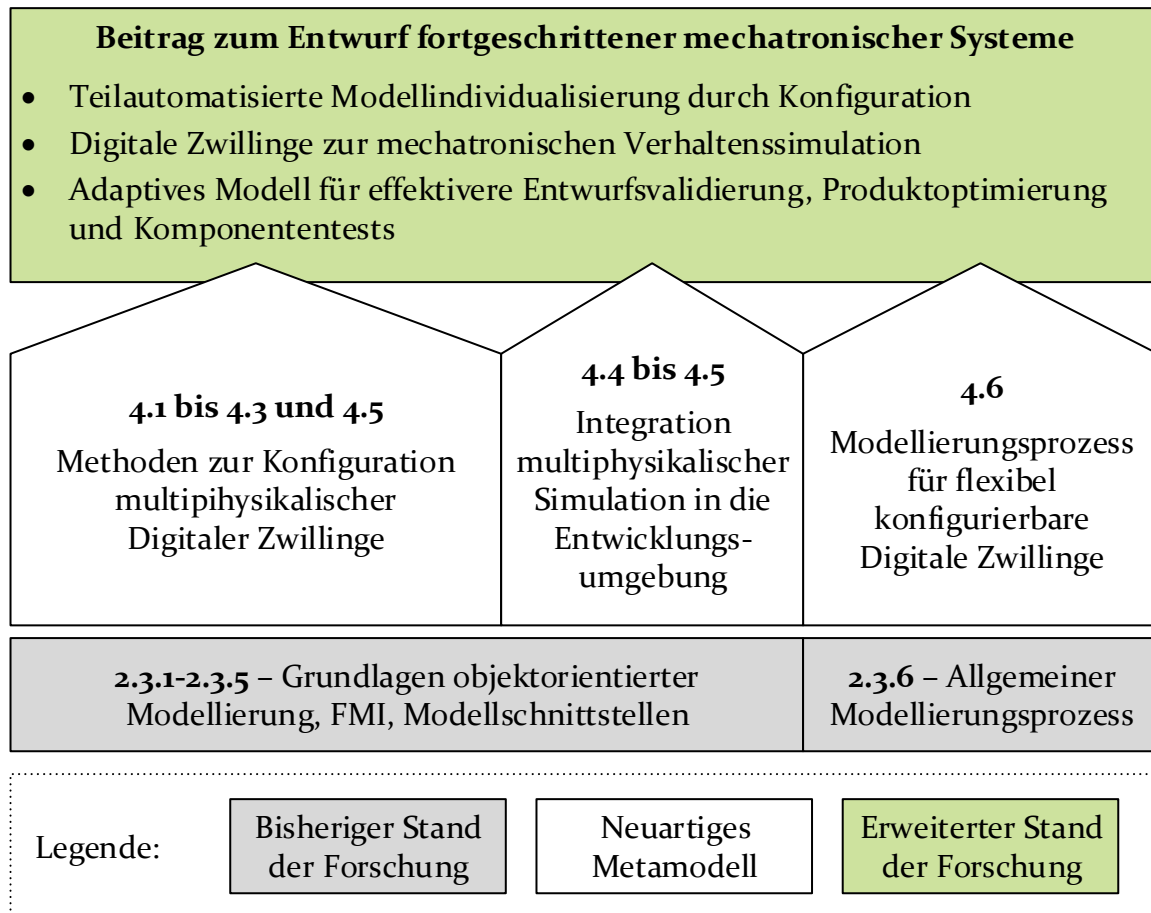


Bild 59: Beitrag zum Entwurfs fortgeschrittener mechatronischer Systeme

Durch die Simulationskonfiguratoren lassen sich Komponententests zu Zeitpunkten in PE-Prozessen mittels HiL-Simulation durchführen, zu denen noch keine Prototypen existieren. Ineffiziente Entwurfskorrekturschleifen und Ressourcenverluste aufgrund fehlerhafter Prototypen lassen sich somit reduzieren. Da durch FMI domänenspezifische Simulationsmodelle mit den multiphysikalischen Simulationsmodellen gekoppelt werden können, lassen sich diese in die Produktentwurfsvalidierung effizient miteinbeziehen und steigern die Interdisziplinarität. Auf diese Weise lässt sich das Produktverhalten feingranular simulieren, was zur Folge hat, dass sich von den Anforderungen abweichendes Verhalten und die dafür verantwortlichen Komponenten früh identifizieren und Gegenmaßnahmen ergreifen lassen. Diese lassen sich in das Modular aufgebaute Basismodell effizient integrieren und somit virtuell verifizieren.

Der Nutzen der Simulationskonfiguratoren bleibt zu untersuchen. Zwar wurden erzielbare Funktionalitäten bereits anhand der exemplarischen Strukturierung eines Simulationskonfigurators für Triebzüge aufgezeigt. Jedoch soll der anwendungsbezogene Nutzen durch Beispielsimulationen herausgearbeitet werden, was in Kapitel 5 erfolgt. In Unterkapitel 5.1 wird evaluiert, inwiefern die Genauig-

keit der generischen, multiphysikalischen Modelle zur Darstellung des Verhaltens komplexer Produkte ausreicht. Das dadurch erreichte valide Modellverhalten ermöglicht die Darstellung des Mehrwerts, der sich aus den konfigurierbaren Simulationsmodi und Produktvarianten ableitet. Entsprechende Potentiale werden in Unterkapitel 5.2 aufgezeigt.

5 Evaluierung des Metamodells anhand eines Simulationskonfigurators für Triebzüge

Die Eignung multiphysikalischer Simulationskonfiguratoren wird in diesem Kapitel am Beispiel von Triebzügen untersucht. Dabei steht der Mehrwert für die virtuelle Validierung von Produktentwürfen im Vordergrund. Der Nutzen eines multiphysikalischen Simulationsmodells hängt jedoch nicht nur von seiner Architektur ab, die das Metamodell aus Kapitel 4 beschreibt. Die darin verwendeten physikalischen und steuerungstechnischen Modelle sowie die damit verbundene Verhaltensgenauigkeit und Funktionalität sind für den möglichen Einsatzbereich ausschlaggebend. Die Architektur ermöglicht, dass verschiedene heterogene Varianten effizient erstellt werden können. Ihr physikalische Verhalten hängt jedoch von den verwendeten Gleichungen und Algorithmen ab, die ins Basismodell integriert werden und während Simulationen kontinuierlich berechnet werden.

Deshalb wird in Unterkapitel 5.1 zunächst die physikalische Eignung des Basismodells evaluiert. Mit dem konsolidierten Modell wird in Unterkapitel 5.2 exemplarisch die Modellfunktionalität untersucht, die aus den Konfigurationsmöglichkeiten hervorgeht.

5.1 Fähigkeit zur Darstellung physikalischer Effekte

In diesem Unterkapitel wird das physikalische Verhalten evaluiert. Dieser Schritt wird einer Nutzevaluierung aus dem Grund vorgezogen, dass das Basismodell die Möglichkeit zur Prognose von Längsschwingungen aufweisen muss, die in Kapitel 1 vorausgesetzt wurden. Erst nach erfolgter Evaluierung dieser Eigenschaften wird die Konfiguration verschiedener Zugtypen sinnvoll, deren Verhalten während Simulationen hinsichtlich der Anforderungen als ausreichend genau angenommen werden kann. Dieser Schritt stellt sicher, dass der Simulationskonfigurator für die angedachten Anwendungen einsatzbereit ist und ausreichend realitätsnahe Simulationsergebnisse generieren kann.

Diese Untersuchung muss für jeden Simulationskonfigurator gesondert durchgeführt werden, da hierin das spezielle mechatronische System untersucht wird, das dem untersuchten Produkt zugrunde liegt. Je nach nachzustellendem System sind individuelle Anforderungen zu formulieren, die vom jeweiligen Anwendungszweck abhängen. Die damit verbundenen physikalischen und steuerungsbzw. regelungstechnischen Funktionen müssen sich in diesen Anforderungen wiederfinden. Eine allgemeingültige Modellvalidität ist aufgrund der Modellver-

einfachungen nicht erreichbar. Deshalb und aufgrund der durch multiphysikalische Modellsprachen verfügbaren, generischen Modelle sind die Möglichkeiten entsprechend eingeschränkt.

In Abschnitt 5.1.1 wird zunächst eine geeignete Methodik identifiziert, die ein physikalisch korrektes Modellverhalten ermöglicht. Darüber hinaus wird erarbeitet, welche Anforderungen untersucht werden. Die Untersuchungen werden in Abschnitt 5.1.2 durchgeführt. Abschließend werden die Anforderungen ausgewertet.

5.1.1 Methodik und Anforderungen

Eine vollständige Validierung aller Modellmodule in Bezug auf ihre Auswirkungen auf das kinetische Systemverhalten wird nicht als zielführend angesehen. Das liegt darin begründet, dass in dem multiphysikalischen Modell sehr generische Modellmodule zum Einsatz kommen, die das reale Komponentenverhalten nur rudimentär simulieren. Ihre Aufgabe ist, das mechatronische System *Triebzug* ganzheitlich darzustellen. Dabei ist darauf zu achten, dass das Systemverhalten in Bezug auf die zu untersuchenden Zielgrößen nicht unzulässig verfälscht wird. Unsicherheiten bleiben jedoch immer übrig, da sämtliche Ursachen für die Ausprägung gemessener bzw. simulierter Größen aufgrund der Systemkomplexität in der Regel nicht in Erfahrung gebracht werden können. Die Simulationsergebnisse müssen deshalb für stichhaltige Aussagen durch experimentelle Nachstellung verifiziert werden.

Tabelle 8: Auswahl von Validierungstechniken zur Anforderungsabsicherung multiphysikalischer Simulationsmodelle [151]

| Validierungsmethode | Beschreibung | Ziele |
|-------------------------------------|---|---|
| Ereignisvalidität | Plausibilitätsprüfung von während der Simulation auftretenden Ereignissen | Verifikation der Umwelteinflüsse auf das Systemverhalten |
| Monitoring | Zeitliche Überwachung der Simulation | Visuelle Identifikation von Mustern, Auffälligkeiten und Extrema |
| Sensitivitätsanalyse | Variation von Parametern mit starkem Einfluss auf das Systemverhalten | Bewertung von Parametern für das vereinfachte Kupplungsmodell |
| Trace-Analyse | Untersuchung des Verhaltens von Sub-Modellen | Vergleich einzelner Waggonbewegungen im Gesamtsystem zur Bewertung des Kupplungsmodells |
| Vergleich mit aufgezeichneten Daten | Evaluierung von Simulationsergebnissen anhand von Messdaten | Bewertung des Modellansatzes, Parameterverfeinerung |

Von der Arbeitsgruppe Simulation (ASIM) vorgestellte Validierungsmethoden werden für hierin durchzuführende Validierungen als geeignet erachtet, weil die durch das Basismodell simulierten Prozesse, wie auch die darin enthaltenen Module, von heterogenen Teilprozessen geprägt sind. In dem Modell sind physikalische Prozesse, Abläufe und Steuerungsprozesse abgebildet, deren Validierung unterschiedliche Herangehensweisen erfordert. Für die Validierung werden anhand der Anforderungen Hypothesen formuliert. [151]

Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt auf Basis der ausgewählten Validierungstechniken in Tabelle 8. Die Untersuchungen richten sich nach den gegebenen Möglichkeiten. Diese beinhalten Untersuchungsfunktionen des Modelica-Werkzeugs, vorhandene Spezifikationen sowie Messdaten.

Die Anregung des Systems wird während der Simulationen mittels kennlinienbasierter Komponentenmodelle erreicht. Die erfolgreiche Umsetzung dieser Anregung hängt damit nicht von getrennt zu validierenden Brems- und Motormodellen ab, sondern lediglich von der korrekten Parametrierung derer Kennlinien, was einem Software-Entwicklungsprozess entspricht. Die Sicherstellung der korrekten Funktionalität der Aktoren und Steuerbefehlskette findet daher separiert mittels definierter Eingangssignale und Überprüfung der Ausgangssignale statt. Dabei wird ein „bottom-up“-Testverfahren verwendet, bei dem zunächst Module auf unterster Gliederungsebene des Modells (z. B. Signalblöcke, die in ein Motormodell integriert werden oder Steueralgorithmen etc.) bis hin zur obersten getestet werden (z. B. das Verhalten des Waggonmodells in seinem Umgebungsmodell, gefolgt von mehreren, miteinander verbundenen Waggonen etc.). Dabei wird während der Testschritte darauf geachtet, dass jeweils die erwarteten Ergebnisse resultieren. Nach Test des Gesamtmodells kann der Entwicklungsprozess als abgeschlossen angesehen werden. Auf die Dokumentation dieser Teilschritte wird mangels thematischer Relevanz nicht weiter eingegangen. Stattdessen wird von einem korrekt funktionierenden Modell ausgegangen. [152]

Aufgrund der Modellvereinfachung entfallen im Modell außerdem viele Funktionalitäten, die realen Triebzügen zu eigen sind, wie z. B. Regelungsprozesse zur Vermeidung von Schlupf, Gleiten und Schleudern der Räder, die ihren mechanischen Schutz gewährleisten. Aufgrund dessen ist eine ganzheitliche Untersuchung aller Einflüsse und Funktionalitäten realer Triebzüge ebenfalls nicht zielführend, sondern eine fokussierte Validierung ausgewählter Effekte und involvierter Baugruppen und Komponenten.

Für das Schwingverhalten ist eine Validierung des Kupplungsmodells ausschlaggebend, da dadurch das Bewegungsverhalten realer mechanischer Kupplungen nachgestellt werden soll. Daraus leitet sich die wesentliche Anforderung ab, zu prüfen, ob das vereinfachte Modell ausreicht, das komplexe Schwingverhalten nachzustellen. Diese Frage hängt neben der getroffenen Modellwahl auch mit der

Einstellung der Modellparameter zusammen. So sind oftmals sogar Komponentenspezifikationen eine Vereinfachung der Realität und an einen gebräuchlichen Modellansatz angelehnt. Die Steifigkeitsparameter der mechanischen Kupplungen liegen in den Spezifikationen beispielsweise als Kraft-Weg-Kennlinie vor, wobei in der Realität u. a. die Geschwindigkeit der Verformung einen weiteren Einfluss auf die Kupplungskraft hat. Die Modellparameter müssen deshalb oftmals iterativ kalibriert werden, bis das Modellverhalten hinreichend genau die Realität abbildet. Und auch in diesem Fall müssen Parameter zum Teil für verschiedene Simulationsfälle individuell kalibriert werden.

Darüber hinaus ist die komplexe Wechselwirkung vom Steuerungsalgorithmus und der daraus resultierenden Systemanregung sowie dem schwingungssensitiven Kupplungsmodell und den die Schwingungen beeinflussenden Massen zu validieren. Dabei gilt ein besonderes Augenmerk den nicht elektronisch unterstützten Bremsungen, bei denen besonders starke Schwingungen aufgrund von Totzeiten zwischen den Einsatzzeitpunkten der Bremsen in den unterschiedlichen Waggons resultieren. Es muss auch bewertet werden, ob das vereinfachte Steuerungsmodell fähig ist, reale Zeitversätze zwischen Aktoren ausreichend genau darzustellen. Darin werden nämlich die in Realität stochastisch auftretenden Fluktuationen der Totzeiten vernachlässigt.

Weiterhin ist fraglich, ob die kennlinienbasierten Motormodelle in der Lage sind, realistische Beschleunigungen bzw. Verzögerungen hervorzurufen. Aufgrund der sehr kurzen Reaktionszeiten und hohen Momentgradienten sowohl im Modell als auch in der Realität ist entscheidend, die richtigen Zeitkonstanten zu parametrieren, um zulässige Anfahrts- bzw. Bremscharakteristiken sowie realistische Schwingungen zu erhalten.

Aus diesen Vorüberlegungen lassen sich folgende Hypothesen formulieren, die in Abschnitt 5.1.2 untersucht werden. Nach der Untersuchung folgt eine abschließende Bewertung der Hypothesen.

- I. Die vereinfachte, deterministische Totzeitvergabe durch das Steuerungsmodell der Waggons ist geeignet, um Geschwindigkeitsänderungen von Zügen darzustellen, ohne dass dabei nicht plausible Schwingungen auftreten.
- II. Die Fahrmotormodelle induzieren aufgrund ihrer Vereinfachung keine unzulässigen Schwingungen.
- III. Bei nicht elektronisch unterstützten Bremsszenarien wird eine ausreichend realistische Anregung erreicht, sodass ein realistisches Schwingverhalten resultiert.
- IV. Das Kupplungsmodell ist im Normalbetrieb sowie in ausgewählten kritischen Fahrszenarien zur Nachstellung des physikalischen Verhaltens von Kurzkupplungen und automatischen Mittelpufferkupplungen geeignet.

5.1.2 Bewertung des Schwingverhaltens

Die Bewertung basiert auf einer Veröffentlichung des Autors [P4]. Die enthaltenen Ausführungen liefern eine Zusammenfassung der detaillierten Betrachtungen dieses Abschnitts. Die Veröffentlichung ist außerdem die Quelle der hier ebenfalls verwendeten Messdaten.

Hypothese I: ausreichend realitätsgetreue Informationsverarbeitung

Zur Untersuchung von Hypothese I wird von den zur Verfügung stehenden Daten ausgehend der Einfluss von Totzeiten auf dadurch angeregte Schwingungen untersucht. Dafür werden die relevanten Zeitkonstanten in Intervallen variiert, um das reale Steuerverhalten zu erreichen.

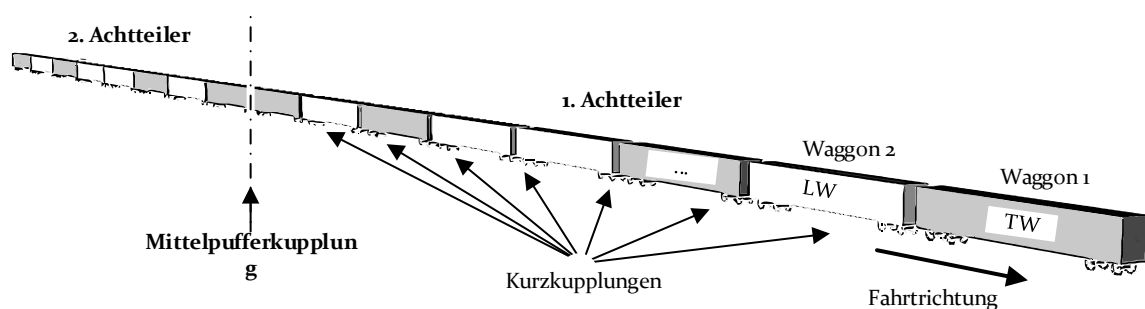


Bild 60: Konfiguration des Achtteilers in Doppeltraktion mit Mittelpufferkupplung (angelehnt an Bild 50)

Die hier betrachteten Anfahrt- und Bremsvorgänge werden an unterschiedlichen Zugtypen durchgeführt, deren Wahl sich an den vorhandenen Messdaten orientiert. Das Basismodell wird entsprechend dieser Varianten konfiguriert. In Bild 60 sind exemplarisch anhand eines sechzehnteiligen Hochgeschwindigkeitszugs die wesentlichen Konfigurationsmöglichkeiten dargestellt. Das Kupplungsmodell muss sich eignen, das physikalische Verhalten von Kurzkupplungen und automatischen Mittelpufferkupplungen nachzustellen. Sie unterscheiden sich aufgrund des unterschiedlichen Aufbaus in ihrer Feder-Dämpfer-Charakteristik sowie dem vorhandenen Hub.

Die Frage, ob das Modell sich zur Nachstellung beider Kupplungstypen eignet, wird zu Ende dieses Abschnitts durch Bewertung von Hypothese IV beantwortet. Dafür bedarf es der Verifikation der vorhergehenden Hypothesen, da dafür das Steuerungs- und Aktorenverhalten sowie die Kupplungsparameter zulässig sein müssen. Die Konfigurationsmöglichkeiten des Basismodells werden im Detail in Unterkapitel 5.2 aufgegriffen.

Die Zeitkonstanten der Motormodelle und Signalübermittlung werden anhand eines Anfahrtsvorgangs am Achtteiler untersucht, wobei ausschließlich Kurzkupplungen konfiguriert sind. Der Achtteiler in Doppeltraktion wird zur Validierung des Bremsverhaltens verwendet. Ein weiteres Bremsszenario wird anhand des Regionalzugs in Bild 50 in Vierfachtraktion untersucht. Dabei sind die

Waggons der dreiteiligen Einheiten jeweils mit Kurzkupplungen verbunden, während die Einheiten selbst mittels Langkupplungen verbunden sind.

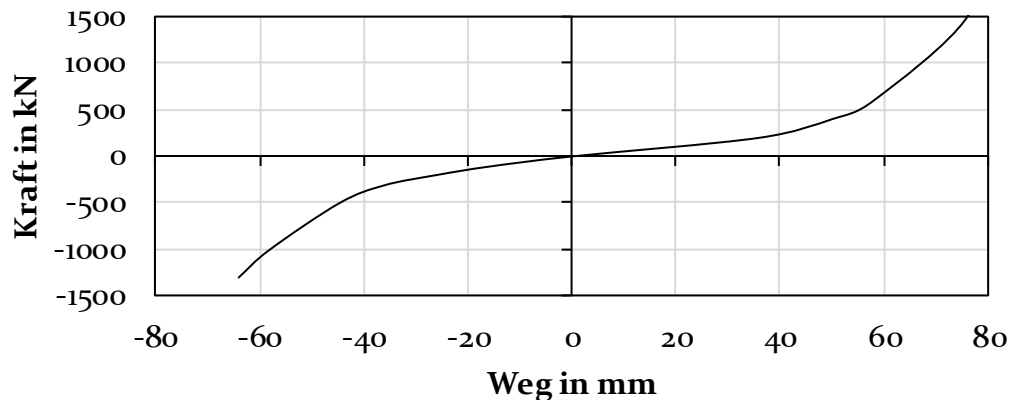


Bild 61: Exemplarische Kraft-Weg-Charakteristik einer Kurzkupplung

Für die Simulation werden Waggonmassen zwischen 55 und 59 Tonnen angenommen, was einem mittleren Beladungszustand entspricht. In Bild 61 ist die wegabhängige Kupplungskraft des verwendeten Kurzkupplungsmodells aufgezeigt. Dabei ist fraglich, wie starke sich Dämpfungseinflüsse auf die tatsächliche Kupplungskraft auswirken, die im Modell als proportional zur Verformungsgeschwindigkeit angenommen sind, und ob die vereinfachte Modellierung zur realistischen Nachstellung von Schwingungen ausreicht.

Aufgrund des gemeinsamen Modells für Kurzkupplungen und automatische Mittelpufferkupplungen ähneln sich die Kraft-Weg-Kennlinien qualitativ. Jene von automatischen Mittelpufferkupplungen zeichnet neben größeren Verformungsbereichen eine höhere Steifigkeit im Streck- als im Stauchbereich aus.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Anregung von Schwingungen haben Totzeiten in der Signalübermittlung. Die Verzögerungen sind dabei nur teilweise vorhersehbar, weil sie von der Systemkonfiguration sowie der Synchronisation der Steuergeräte abhängen. Bekannt ist jedoch, dass oftmals weiter entlegene Waggons Signale später umsetzen, da Signale mehr Instanzen in der Befehlskette passieren müssen. Im Modell wird diese Eigenschaft behelfsweise durch eine konstante Totzeit ausgedrückt, um die jeder Waggon im Vergleich zum voraneilenden Waggon verzögert wird. Die beste Übereinstimmung von Simulation und Messung ergibt sich bei 40 ms Totzeit, was durch praktische Erfahrung bestätigt ist [P4]. Um die Auswirkungen auf das Schwingverhalten zu bewerten, wird diese Zeitkonstante deshalb in der Simulation als Referenzwert angenommen sowie um +10 und -10 ms variiert.

Tabelle 9: Gemessene Schwingungen bei der Anfahrt eines achteiligen Hochgeschwindigkeitszugs [P4]

| Größe | Wert | Einheit |
|--------------------|-------|------------------|
| Maximale Amplitude | 0,119 | m/s ² |
| Minimale Amplitude | 0,049 | |
| Mittlere Frequenz | 0,641 | Hz |

Die wesentliche Zielgröße der Simulationen ist die Beschleunigung der Waggons, anhand der sich mittels Untersuchung des Sinusverlaufs die Stärke und Frequenz der Schwingungen bewerten lassen. Neben der Kupplungsmodellierung, -parametrierung, den Massen und der Höhe sowie den Gradienten der anregenden Kräfte wirken sich die Totzeiten zwischen den Waggons auf die Schwingungen aus. Da die realen Eigenschaften generisch modelliert sind, ist eine realistische Nachstellung aller nicht möglich. Dadurch lassen sich im Modell auch nicht sämtliche Ursachen für Abweichungen finden und beseitigen. Das Vorgehen zur Modellbewertung ist deshalb, zunächst bekannte Parameter zu parametrieren und mittels der Parametervariation die Änderungen der Schwingungen zu beobachten. Auf diese Weise wird zunächst offensichtlich, ob eine Übereinstimmung von Simulation und Messung allgemein erreicht werden kann. Außerdem liefern die Ergebnisse mit variierten Parametern Hinweise über die Unterschiede zwischen Modellverhalten und realem System.

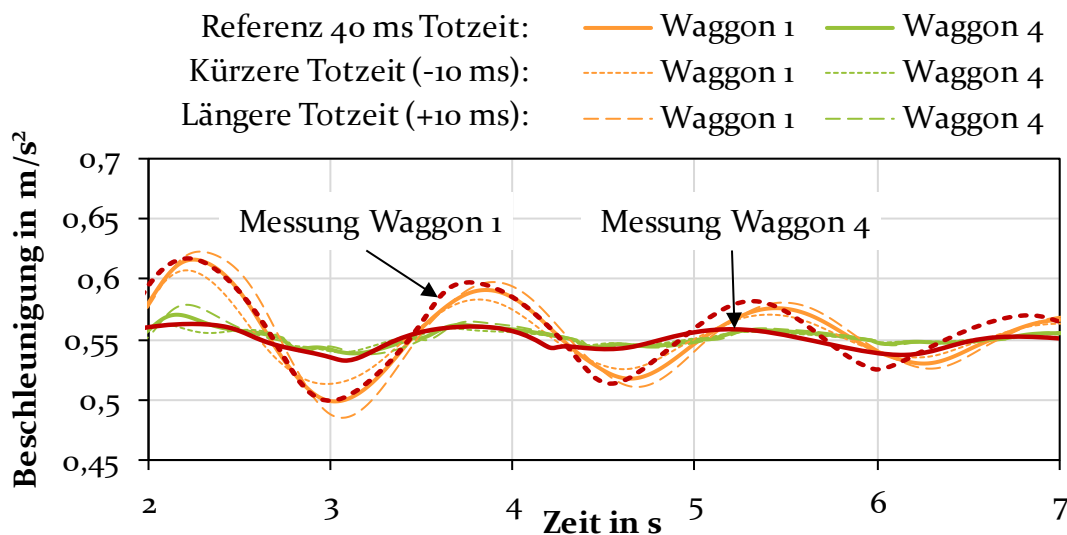


Bild 62: Simulierte und reale Anregung eines achteiligen Hochgeschwindigkeitszugs bei Anfahrt mit variierten Totzeiten

Die Simulationsergebnisse sind in Bild 62 aufgetragen. Die Kennzahlen zu den aufgetretenen Schwingungen sowie die Abweichungen zur Messung sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Die gute anfängliche Übereinstimmung von Simulation und Messung ist ein Hinweis darauf, dass die beiden überlagerten Effekte

der Trägheit der LW und der versetzten Zeitpunkte, zu denen die Motormodelle der unterschiedlichen TW reagieren, in der Simulation korrekt abgebildet werden.

Die größere Totzeit zwischen den Waggonen führt zu leicht erhöhten Amplituden, während die kleinere entsprechend niedrigere hervorruft. Die Schwingfrequenz ändert sich hingegen bei der Variation der Totzeiten nicht. Die Kurven sind entsprechend leicht phasenverschoben.

Beim Betrieb von Triebzügen sind insbesondere starke Anfangsschwingungen problematisch, die durch den Modellansatz korrekt angeregt werden. Deshalb kann das Steuerungsmodell als nützlich betrachtet werden, Längsschwingungen ausreichend realitätsnah anzuregen. Hypothese I kann dadurch als zutreffend eingestuft werden. Dabei gilt aufgrund der Modellvereinfachung jedoch die Einschränkung, wie auch für die weiteren Betrachtungen, dass sich die Beschleunigungs- und Kupplungskraftverläufe im Detail vom realen Verhalten unterscheiden können und somit simulativ ermittelte Prognosen experimentell überprüft werden sollten.

Tabelle 10: Simulierte Schwingungen bei der Anfahrt eines achteiligen Hochgeschwindigkeitszugs

| Größe | Wert | Einheit |
|---|-------|------------------|
| Maximale Amplitude | 0,119 | m/s ² |
| Minimale Amplitude | 0,043 | |
| Mittlere Frequenz | 0,619 | Hz |
| Abweichung der maximalen Referenz-Amplitude zur Messung | 0,0 | % |
| Abweichung der minimalen Referenz-Amplitude zur Messung | -12,2 | |
| Abweichung der Referenz-Frequenz zur Messung | -3,4 | |

Hypothese II: valides Traktionsverhalten der Fahrmotormodelle

Ein weiterer in Bezug auf Schwingungen einflussreicher Parameter des Antriebs ist der Momentgradient, den die Motormodelle der TW umsetzen. Steuerungsseitig ist der Wert üblicher Weise durch eine Ruckbegrenzung umgesetzt. Dieser Wert ist die zeitliche Ableitung der Beschleunigung und in der Regel auf einen Meter pro s³ begrenzt. Bei einer langsamen Erhöhung der Kräfte wird der Höchstwert entsprechend nicht erreicht.

Im Referenzszenario wird die maximale Beschleunigung angelehnt an die Messung innerhalb von 1,2 Sekunden aufgebaut, was jeweils um +0,2 sowie -0,2 Sekunden variiert wird. Die Simulationsergebnisse gegenüber der Messung sind in Bild 63 eingezeichnet.

Wie die Simulationsergebnisse zeigen, sind die Auswirkungen des Momentgradienten deutlich größer als die der Totzeiten. Während die Frequenz aufgrund der höheren Kräfte im Vergleich zur vorhergehenden Simulation minimal erhöht ist, führen die veränderten Gradienten zu deutlichen Erhöhungen bzw. Abschwächungen der Amplitude, weil sich die Trägheiten der nicht angetriebenen Massen stärker auswirken. Während die Parametrierung des Referenzwerts zu gut übereinstimmenden Amplituden führt, rufen die variierten Werte nur eine unbefriedigende Übereinstimmung hervor.

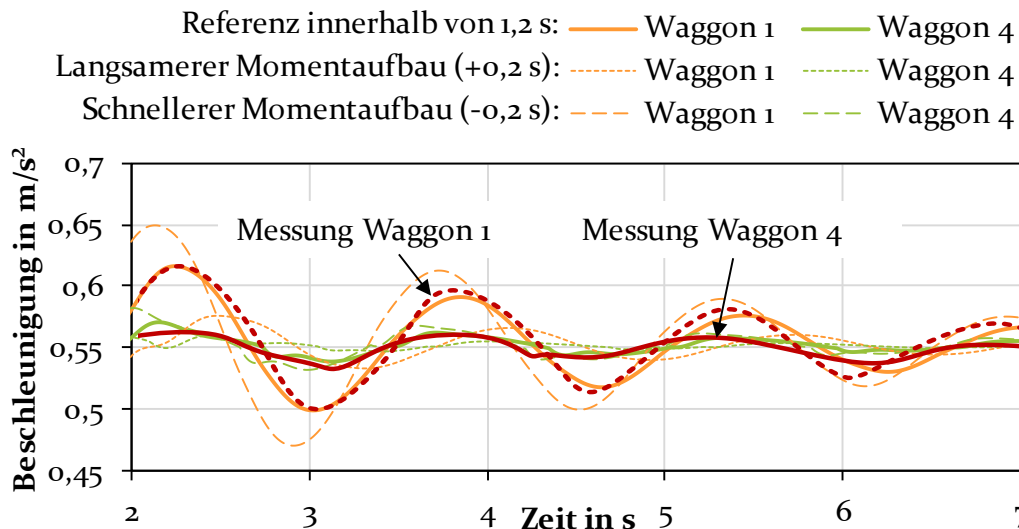


Bild 63: Simulierte und reale Anregung eines achteiligen Hochgeschwindigkeitszugs bei Anfahrt mit unterschiedlichen Momentgradienten

Die Betrachtungen lassen die Bewertung von Hypothese II zu. Sie stellt sich als zutreffend heraus, da die Zeitkonstante und der modellierte Momentanstieg des Motormodells ein mit der Realität gut übereinstimmendes Schwingverhalten hervorrufen.

Hypothese III: valide Schwingungsanregung durch die mechanische Bremse

Da die Simulationsergebnisse des Schwingverhaltens des Achtteilers beim Anfahrtsvorgang ein plausibles Verhalten nahelegen, kann des Weiteren ein Achtteiler in Doppeltraktion untersucht werden, der an zentraler Stelle eine Mittelpufferkupplung enthält. Zur Bewertung der Schwingungsanregung aufgrund nicht elektrisch unterstützten Bremsens, wobei starke Schwingungen auftreten können, wird nachfolgend ein solches Szenario untersucht. Dabei ist fraglich, ob der Modellierungsansatz der Kupplung ausreicht, das Schwingverhalten realitätsnah nachzustellen. Zum einen wird überprüft, ob die unterschiedlichen Steifigkeiten im Streck- sowie Stauchbereich hinreichend abgebildet werden. Andererseits ist fraglich, inwiefern Schwingungen durch die modellierte Nichtlinearität bei großen Verformungen mit Messungen übereinstimmen.

Eine indirekte Bremsung wird eingeleitet, wenn die elektronische Bremsunterstützung (EP-Bremsung) und Fahrmotoren im Bremsbetrieb störungsbedingt ausfallen. Die über den gesamten Zug verlaufende Hauptluftleitung, die während der Fahrt immer unter Druck steht, wird zu diesem Zweck im vorausseilenden Waggon entlüftet, was mehrere Sekunden in Anspruch nimmt. Der Druckabfall wird mechanisch durch die Steuerventile der Waggonen detektiert, die den Bremszylinder mit Druckluft füllen, wodurch Bremskraft aufgebaut wird. Die Entlüftung der Hauptluftleitung führt im vorausseilenden Waggon beginnend zu einem ansteigenden Druckgradienten bis zum letzten Waggon, der über die Zeit abfällt, da die Hauptluftleitung kontinuierlich entlüftet wird, bis von sämtlichen Steuerventilen die maximale bzw. angeforderte Bremskraft umgesetzt wird. Aufgrund dieses Verhaltens laufen die nacheilenden Waggonen auf den vorausseilenden sukzessive auf, wodurch die Längsschwingungen verursacht werden. [P4]

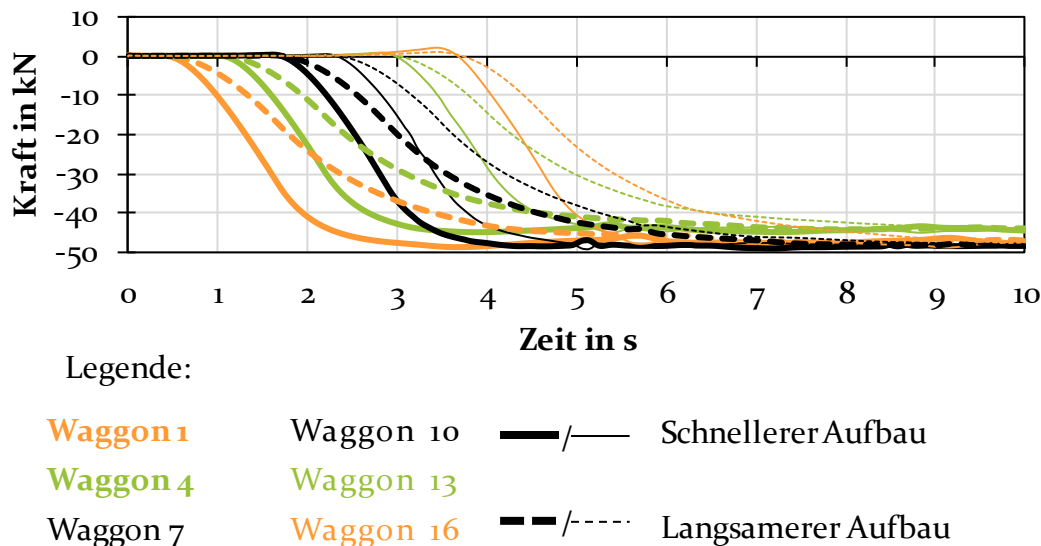


Bild 64: Anregung der automatischen Mittelpufferkupplung durch unterschiedliche Kraftgradienten [P4]

In Bild 64 sind zwei an Messungen angelehnte Bremskraftverläufe aufgetragen, die in der Simulation angenommen werden. Die durchgezogenen Linien repräsentieren entsprechend einer schnelleren, reibungsfreieren Entlüftung der Hauptluftleitung einen raschen Bremskraftaufbau. Der den gestrichelten Linien zugeordnete Kraftaufbau simuliert eine langsame, stärker reibungsbehaftete Entlüftung. Die Kraftverläufe sind durch große, als 200 ms angenommene Zeitkonstanten zwischen den Waggonen sowie einen langsamen, stetigen Anstieg geprägt. [P4]

Die den Parametern zugrundeliegenden gemessenen Bremsdrücke sind jedoch nicht vollständig proportional zur generierten Bremskraft, weil es einer Losbrechkraft bedarf, unterhalb der keine Bremskraft aufgebaut wird. Von daher sind die Messdaten als Anhaltspunkte für den tatsächlichen Bremskraftverlauf zu behandeln.

Tabelle 11: Gemessene Schwingungen bei Vollbremsung eines sechzehnteiligen Hochgeschwindigkeitszugs [P4]

| Größe | Wert | Einheit |
|--------------------|-------|------------------|
| Maximale Amplitude | 0,709 | m/s ² |
| Minimale Amplitude | 0,218 | |
| Mittlere Frequenz | 0,278 | Hz |

Die Simulationsergebnisse einer Variation des Kraftanstiegs entsprechend der in Bild 64 modellierten Kraftanstiege sind in Bild 65 veranschaulicht. Die Referenzsimulation repräsentiert eine Mittelung der Kraftanstiege. Bei der eingezeichneten Messung sind sehr starke Schwingungen aufgetreten, die bei Fahrgästen ein Unwohlbefinden verursachen. [P4]

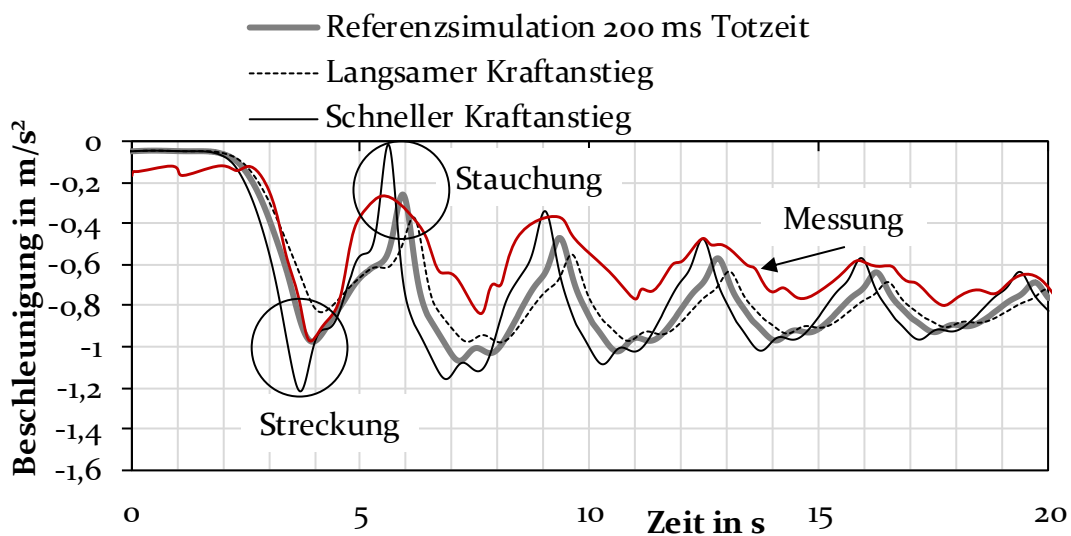


Bild 65: Schwingungen von Waggon 16 bei Variation des Kraftgradienten bei indirekter Bremsung

Der Modellansatz führt zu Schwingungen, die qualitativ Charakteristika des gemessenen Verzögerungsverlaufs aufweisen. Beispielsweise sind die Doppelm minima wiederzufinden, die auch jeweils in Messung und Simulation beim zweiten Minimum erstmalig auftreten. Dafür ist die Überlagerung verschiedener Schwingmoden verantwortlich. Eine weitere durch das Modell abgebildete Eigenschaft sind die Wendepunkte zwischen Minima und Maxima, die sich ebenfalls in der Messung wiederfinden und auf Trägheitseffekte zurückführbar sind. Die Wiedererkennbarkeit dieser Effekte ist ein Hinweis darauf, dass die in der Realität vorkommenden Einflüsse auf die Schwingungen im Modell teilweise abgebildet werden können. Die starke Abweichung der Kurven im weiteren Verlauf zeigt jedoch auch, dass für eine detaillierte Übereinstimmung ein genaueres Modell der Anregung zum Einsatz kommen müsste. Das hier verwendete, stark vereinfachte Modell, welches die Hauptluftleitung mittels einfacher mathematischer

Funktionen nachbildet, sollte gegen ein pneumatisches Modell der Hauptluftleitung ersetzt werden. Dieses muss die real vorliegenden Massenträgheiten der Luft und ihre Reibung berücksichtigen.

Wie auch beim Anfahrtszenario führt ein schnellerer Kraftanstieg zu den größten Schwingungsamplituden. Zu Anfang der Schwingung sind sie um 48,4 Prozent größer als bei der Referenzsimulation. Darüber hinaus führt dem Anfahrtszenario ähnlich ein geringerer Kraftanstieg zu um 25,0 Prozent kleineren Amplituden. Die simulierte Anfangsfrequenz von 0,31 Hz fällt aufgrund der nichtlinearen Steifigkeit der Kupplungen bei ca. zehn Sekunden auf 0,29 Hz. Dafür ist die nichtlineare, bei größeren Auslenkungen höhere Kupplungssteifigkeit verantwortlich, die aufgrund der deutlich größeren Amplituden in diesem Szenario stärker zum Tragen kommt. Die Simulationsergebnisse der sind in Tabelle 12 zusammengefasst und der Messung gegenübergestellt.

Tabelle 12: Simulierte Schwingungen bei Vollbremsung eines sechzehnteiligen Hochgeschwindigkeitszugs

| Größe | Wert | Einheit |
|---|-------|------------------|
| Maximale Amplitude | 0,702 | m/s ² |
| Minimale Amplitude | 0,273 | |
| Mittlere Frequenz | 0,619 | Hz |
| Abweichung der maximalen Referenz-Amplitude zur Messung | +1,0 | % |
| Abweichung der minimalen Referenz-Amplitude zur Messung | -20,1 | |
| Abweichung der Referenz-Frequenz zur Messung | +3,6 | |

Nachfolgend wird die Auswirkung der Variation der Totzeiten zwischen den Waggons untersucht. Je nach Eigenschaft der verwendeten Steuerventile können diese variieren. Die Simulationsergebnisse sind in Bild 66 eingezeichnet. Da bei beiden variierten Totzeiten niedrigere Amplituden auftreten als in der Referenzsimulation, kann daraus geschlossen werden, dass es eine kritische Totzeit gibt, bei der durch die Referenztotzeit kritisch hohe Schwingungsamplituden hervorgerufen werden.

Die Referenz-Totzeit scheint das System am realitätsnächsten anzuregen, was an der anfänglichen Übereinstimmung von Messung und Simulation zu erkennen ist. Während eine um 100 ms verringerte Totzeit nur geringfügig niedrigere Amplituden hervorruft, führt eine um 100 ms erhöhte Totzeit zu deutlich niedrigeren Amplituden. Insbesondere die stark ausgeprägten Anfangsextrema werden deutlich reduziert. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Bremskraftverläufe so aufeinander abgestimmt sind, dass die Grundschiwingung des Systems weniger dominant ist und stattdessen stärkere Schwingungen höherer Schwingungsmoden auftreten. Darüber hinaus wird dem System bei größeren Totzeiten aufgrund

der längeren Dämpfungszeit zwischen den einsetzenden Anregungen bereits während der Anregungsphase mehr Energie entzogen, was die Schwingungen stärker dämpft.

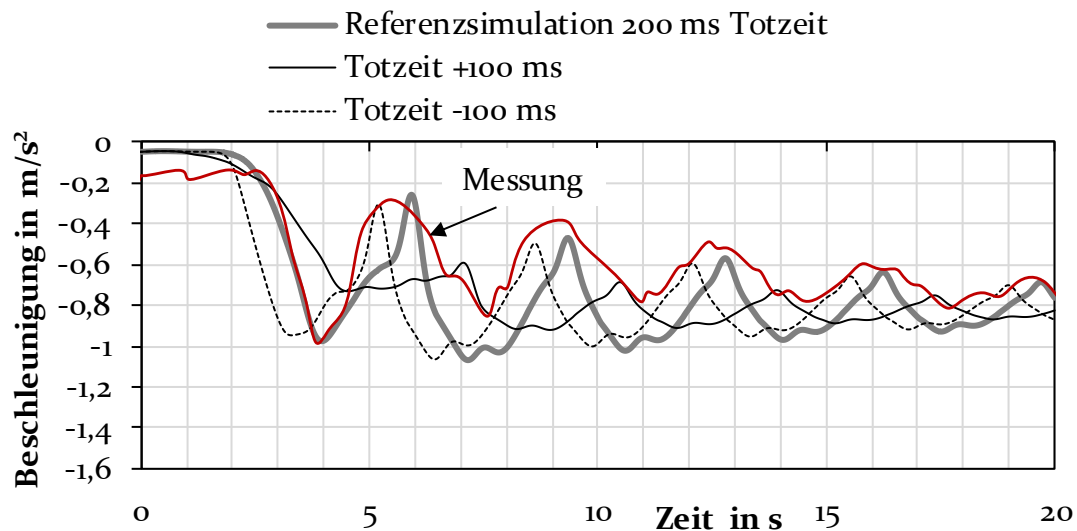


Bild 66: Schwingungen von Waggon 16 bei Variation der Totzeit bei indirekter Bremsung [P4]

Hypothese III trifft insofern zu, als die Schwingungen beim indirekten Bremsen realitätsnah angeregt werden können. Darauf weisen übereinstimmende Eigenschaften von gemessenen und simulierten Kurven hin. Außerdem stimmen die Frequenz und anfängliche Amplitude ebenfalls gut überein. Dadurch eignet sich das Modell zwar zur Prognose maximal auftretender Schwingungsamplituden und -frequenzen, nicht jedoch zur detaillierten Nachstellung von starken Schwingungen.

Hypothese IV: Valides Kupplungsverhalten

Bild 62 und Bild 63 weisen darauf hin, dass die Anregung durch die Motormodelle sowie das Steuerungsmodell zu realitätsnahen Längsschwingungen führt. Während die gemessene und die simulierte Frequenz zu Anfang der Schwingung gut übereinstimmen, nimmt die Frequenz der Messung gegen Ende hin jedoch merklich zu. Die Frequenz in der Simulation verändert sich über die Zeit unmerklich, sodass eine Abweichung zur Messung um drei Prozent auftritt. Der Unterschied kann der Modellvereinfachung zugeschrieben werden. Da insbesondere die anfänglichen, starken Längsschwingungen für die Auslegung relevant sind, kann die Diskrepanz jedoch hingenommen werden.

Anhand der bei der mechanischen Bremsung aufgetretenen Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Schwingungen wird nachfolgend das Modell der automatischen Mittelpufferkupplung bewertet. Wie in Bild 64 ersichtlich ist, besteht eine deutliche Ähnlichkeit zwischen der simulierten und gemessenen Frequenz und Amplitudenmaxima, während die -minima der Simulation deutlich unterhalb der Messergebnisse liegen. Dies ist neben einer zu stark vereinfachten

Anregung ein Hinweis darauf, dass die Kupplungsmodellierung den Streckbereich nicht hinreichend genau nachbildet. Durch parametrische Anpassungen ist diese Abweichung nicht beherrschbar, da sich dadurch die Frequenz weiter erhöhen und somit das Schwingverhalten verfälscht werden würde. Daraus kann geschlossen werden, dass ein realistisches Schwingverhalten mittels des Modellsatzes für sehr starke Schwingungen, wie sie bei dem untersuchten Bremsmanöver auftreten, nicht erreicht werden kann.

Um das Schwingverhalten der automatischen Mittelpufferkupplung bei weniger starken Schwingungen zu bewerten, werden nachfolgend Untersuchungen am dreiteiligen Regionalzug mit vier Einheiten untersucht. Das Anregungsszenario ist in diesem Fall eine in der Realität häufig angewendete, elektronisch unterstützte mechanische Bremsung, bei der die Steuerventile elektronisch über das TCN gesteuert werden. Der Anstieg der Bremskraft geschieht dadurch schneller. Außerdem sind die Totzeiten zwischen Waggonen deutlich geringer. Darüber hinaus setzt die Bremskraft nicht waggonweise und sequentiell ein, sondern in diesem Fall zeitlich zwischen den Einheiten versetzt.

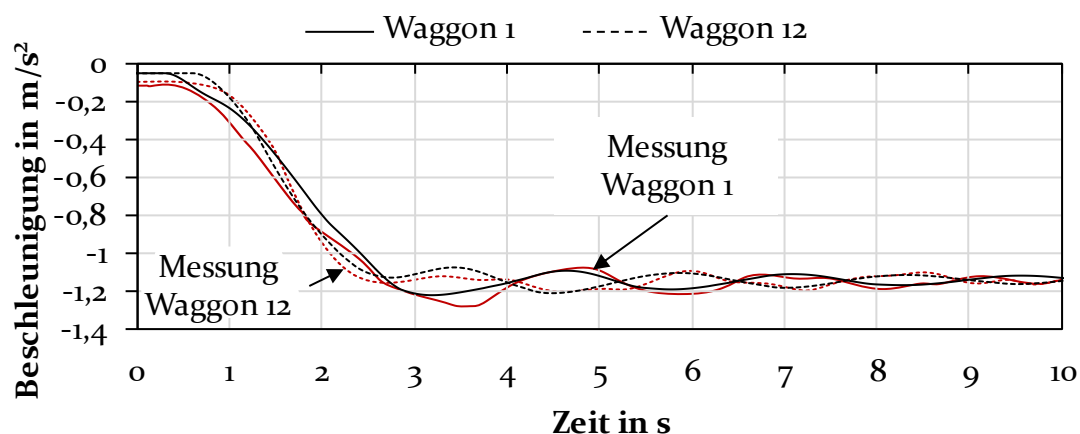


Bild 67: Simulierte und gemessene Schwingungen bei EP-Bremsung des dreiteiligen Regionalzugs in Vierfachtraktion [P4]

Die Totzeiten hängen in diesem Fall von der elektronischen Signalverteilung und -verzögerung ab, die von der Steuerung der jeweiligen Zugtypen abhängig ist. Im Falle des Regionalzugs wurden zwischen den Einheiten Verzögerungen gemessen, während die Waggonen in einer Einheit zeitgleich bremsen. Ab dem Zeitpunkt, zu dem die vorausseilende Einheit bremste, wurde das Signal zur zweiten Einheit um 300 ms verzögert, während die dritte und vierte Einheit 400 ms nach der ersten mit dem Bremsmanöver begannen. [P4]

Zwischen den vier Einheiten mit Waggonmassen zwischen ca. 41 und 55 Tonnen, die jeweils durch drei Kurzkupplungen miteinander verbundenen sind, befinden sich Mittelpufferkupplungen. Der Aufbau des Triebzugs ist in Bild 50 dargestellt.

Aufgrund der elektronischen Ansteuerung sind deutlich niedrigere Schwingungsamplituden zu erwarten.

Tabelle 13: Gemessene Schwingungen bei der EP-Bremung eines dreiteiligen Regionalzugs in Vierfachtraktion [P4]

| Größe | | Wert | Einheit |
|--------------------|-----------|------|------------------|
| Maximale Amplitude | Waggon 1 | 0,21 | m/s ² |
| | Waggon 12 | 0,12 | |
| Minimale Amplitude | Waggon 1 | 0,04 | m/s ² |
| | Waggon 12 | 0,05 | |
| Mittlere Frequenz | | 0,41 | Hz |

In Bild 67 sind die Simulations- und Messergebnisse des Bremsszenarios aufgetragen. Anhand des Verzögerungsverlaufs von Waggon 12 zeigt sich eine gute qualitative Übereinstimmung der Simulation mit der Messung, wobei die Extrema sowohl in der Anstiegsphase der Bremskraft als auch im stationären Zustand ab ca. drei Sekunden nahezu gleichzeitig auftreten und ähnlich ausgeprägt sind.

Tabelle 14: Simulierte Schwingungen bei der EP-Bremung eines dreiteiligen Regionalzugs in Vierfachtraktion [P4]

| Größe | | Wert | Einheit |
|--|-----------|-------|------------------|
| Maximale Amplitude | Waggon 1 | 0,12 | m/s ² |
| | Waggon 12 | 0,14 | |
| Minimale Amplitude | Waggon 1 | 0,05 | m/s ² |
| | Waggon 12 | 0,03 | |
| Mittlere Frequenz | | 0,41 | Hz |
| Abweichung der maximalen Amplitude zur Messung | Waggon 1 | 57,1 | |
| | Waggon 12 | 16,7 | |
| Abweichung der minimalen Amplitude zur Messung | Waggon 1 | 25,0 | % |
| | Waggon 12 | -40,0 | |
| Abweichung der Frequenz zur Messung | | 0,0 | |

Dies deutet darauf hin, dass das Schwingverhalten durch den Modellansatz gut dargestellt werden kann. Der gemessene Verlauf von Waggon 1 weist jedoch eine unterschiedliche Kurvenform auf, bei der auch die gemessenen und simulierten Amplituden merklich voneinander abweichen, insbesondere zu Anfang. Dennoch

treten die simulierten Schwingungen auch für Waggon 1 gleichzeitig mit denen der Messung auf. Dies weist darauf hin, dass die parametrisierte Kupplungssteifigkeit zwar realistische Schwingfrequenzen erreicht, eine genaue Nachstellung der Kraft-Weg-Eigenschaften jedoch nicht möglich ist. Die Simulationsergebnisse sind den Messwerten in Tabelle 14 gegenübergestellt.

Es lässt sich schlussfolgern, dass sich der Modellansatz der mechanischen Kupplungen für die qualitative Nachstellung von Längsschwingungen eignet. Die Abweichungen insbesondere der simulierten und gemessenen Amplituden können hingenommen werden. Im Rahmen zukünftiger Entwurfsvalidierungen durchgeführte Prognosen, die auf Simulationen mit diesem multiphysikalischen Modell basieren, sollen der Identifikation von Auffälligkeiten im Schwingverhalten dienen. Dafür ist die Realitätsnähe des qualitativen Schwingverlaufs ausschlaggebend. Die gewonnenen Daten können in weiterführenden Simulationen bzw. experimentell verifiziert werden.

Verifizierung der Anforderungen

Die in diesem Unterkapitel untersuchten Simulationsszenarien zeigen die Realitätsnähe, mit der sich zugeweihte Längsschwingungen nachstellen lassen. Durch die Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen sich die in Abschnitt 5.1.1 aufgestellten Hypothesen abschließend bewerten. Die in Tabelle 15 zusammengefasste Bewertung wird nachfolgend erklärt.

Tabelle 15: Bewertung der aus den Anforderungen abgeleiteten Hypothesen

| Hypo- these | Aussage | Erfüllt | Nicht erfüllt |
|----------------|--|--|--|
| I | Realitätsnahe Totzeiten zwischen Waggonen | ● | ○ |
| II | Realitätsnahe Abbildung der Fahrmotoren | ● | ○ |
| III | Realitätsnahe Abbildung der mechanischen Bremsen | ● | ○ |
| IV | Realistisches Schwingverhalten | Ausreichend für die Identifikation von Auffälligkeiten Ausreichend für das anfängliche Schwingverhalten | Keine quantitativen Aussagen im eingeschwungenen Zustand |

Die Anfahrt und die EP-unterstützte mechanische Bremsung lassen sich durch den gewählten Modellansatz für Aktoren, Steuerung und mechanischer Kupplung nachstellen. Dabei auftretende Detaileffekte, welche sich in den Abweichungen vom Sinusverlauf der Beschleunigung niederschlagen, lassen sich teilweise in den Simulationen wiederfinden. Diese sind bei realen Triebzügen die Ursache des

Wechselwirkens der Bremsen, der Antriebe, der Steuerung, der mechanischen Kupplungen, der Waggonmassen und der Umgebung [112]. Die qualitative Ähnlichkeit über die Zeit gemessener und simulierter Beschleunigungswerte bei Schwingungen spricht dafür, dass sich auch Fehlverhalten bei der entwurfsbegleitenden virtuellen Produktsimulation identifizieren, wenn auch nicht quantifizieren lässt. Bereits dadurch können Fehlentwicklungen effektiv vermieden werden, da sich die damit in Verbindung stehenden Baugruppen vor ihrer Implementierung identifizieren und korrigieren lassen.

Das simulierte Schwingverhalten bei indirekter Bremsung unterscheidet sich zwar stark von Messungen. Dennoch lassen sich auch darin charakteristische Beschleunigungsverläufe der Messung wiederfinden, was indiziert, dass wesentliche Wechselwirkungen beim indirekten Bremsen durch das Modell abgebildet werden können. Verbesserungsbedürftig ist das vereinfachte Modell der Anregung. Unter Verwendung eines Hauptluftleitungsmodells könnten sich realitätsnähere Ergebnisse erzielen lassen. Dennoch ist das anfängliche Schwingverhalten auch quantitativ aussagekräftig.

Für eine genauere Bewertung, ein zuverlässigeres Ausschließen von der Realität abweichenden Modellverhaltens und etwaige Verbesserungen des mechanischen Kupplungsmodells sind weitere Simulationsszenarien sowie mehr und genauere Messdaten nötig. Dabei muss die Kenntnis über den zeitlichen Sollbremskraftverlauf sowie der im TCN auftretenden Totzeiten bestehen.

Tabelle 16: Wegbereiter für realitätsnahes physikalische Verhalten, resultierende Funktionalitäten und mögliche Anwendungsfelder für die virtuelle Validierung von Entwürfen neuer Züge

| Wegbereiter | Funktionalität | Beispielspezifische Anwendung | Produktspezifische Funktionalität |
|---|---|---|---|
| Effiziente Konfigurierung von Varianten (4.2) | Adaption der Parameter an spezifische Zug- und Waggon-typen | Validierung und Evaluation des dynamischen Fahrverhaltens des Triebzug-Basismodells | Effiziente Adaption der Parameter von Experiment-Setups zur Sicherstellung eines validen Produktmodells |
| Variable Modellkomplexität (4.3) | Adaption des Basismodells an verschiedene Waggonanzahlen | | |

Die Evaluierung des physikalischen Modellverhaltens zeigt bereits Vorteile auf, die aus der Flexibilität des konfigurierbaren Basismodells für Triebzüge hervorgehen. Eine Zusammenfassung geht aus Tabelle 16 hervor. Darin sind die Wegbereiter enthalten, die aus der Nutzung der Methodik in Kapitel 4 hervorgehen.

Ebenfalls sind die dadurch gewonnenen Modellfunktionalitäten sowie beispielsweise Anwendungen im Rahmen dieses Abschnitts beschrieben. In der letzten Spalte befinden sich technologieunspezifisch nutzbare Funktionalitäten, die von der konkreten Anwendung abgeleitet sind. Die Evaluierung der Modellannahmen und Parameterkalibrierung sind nur möglich, weil die Anpassbarkeit des Basismodells an die unterschiedlichen Waggonzahlen und Konfigurationen der Zugtypen gegeben ist, zu denen die Messdaten existieren. Auf diese Weise kann frühzeitig und effizient sichergestellt werden, dass sich das multiphysikalische Modell für virtuelle Entwurfsvalidierungen zukünftig zu entwickelnder Produkte in Simulationen ausreichend realitätsgetreu verhält.

Diese Funktionalität kann allgemein genutzt werden, wenn Messdaten zu unterschiedlichen Produkten vorliegen. Dies ist insbesondere dann notwendig, wenn das Produktmodell eine Vielzahl an Parametern hat, die zu bestimmen sind. Liegen Messdaten zu verschiedenen Produkten vor, kann das Modellverhalten anhand all dieser evaluiert werden anstatt nur anhand eines einzelnen. Dadurch wird eine größere Sicherheit erlangt, dass sich das Modell ausreichend realitätsnah verhält.

5.2 Potentiale aufgrund der Konfigurationsmöglichkeiten

Die Betrachtungen aus Unterkapitel 5.1 zeigen auf, dass sich das physikalische Modellverhalten durch die flexible Konfigurierbarkeit des Basismodells für Triebzüge konsolidieren lässt. Die Erkenntnisse aus dieser Tätigkeit ergeben, dass sich der Modellansatz zur Nachstellung der verschiedenen Triebzugtypen und -konfigurationen eignet. Das Anwendungsfeld ist dabei die Identifizierung von Produktfehlern bei der Validierung des Produktentwurfs anhand von Betriebssimulationen.

In diesem Unterkapitel werden weitere Vorteile des Simulationskonfigurators für Triebzüge herausgearbeitet, die auf Eigenschaften der Architektur basieren. In Abschnitt 5.2.1 werden die aus der dadurch darstellbaren, hohen Modellkomplexität folgenden Möglichkeiten zur Untersuchung von Längsschwingungen exemplarisch demonstriert.

In einem zweiten Beispiel in Abschnitt 5.2.2 wird demonstriert, dass sich die Effekte der Steuerungsparametrierung, die sich auf die Betriebskosten von Triebzügen auswirken, untersuchen lassen. Dies ist durch das in den Simulationskonfigurator integrierte Feldbusmodell möglich, mittels dessen multiphysikalische Modelle durch realitätsnahe Steuerungsalgorithmen gesteuert werden können. In der Beispielsimulation werden simulativ ermittelte Energie- und Verschleißkosten bei verschiedenen Bremskraftzusammensetzungen gegenübergestellt. Die

Betrachtungen erlauben eine abschätzende Vorhersage über potentielle Kostenersparnisse über den Produktlebenszyklus aufgrund einer möglichen Aufstockung der Motorleistung und daraus resultierender vergrößerter ED-Bremsanteile.

5.2.1 Gesteigerte Komplexität bei der Untersuchung des Schwingverhaltens

Witterungsbedingt können plötzliche Abfälle bzw. Anstiege des Kraftschlussbeiwerts auftreten. Beispielsweise können Gleise streckenweise mit Laub, Regen etc. bedeckt sein. Bei Tunnelein- bzw. ausfahrten wurde ebenfalls dieser Effekt beobachtet, wenn im Falle von Regen die Gleiseingriffsbedingungen auf dem im Tunnel gelegenen und damit trockenen Gleisabschnitt deutlich besser als außerhalb des Tunnels sind. Überlagern sich mit diesem physikalischen Effekt außerdem zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftretende Bremskräfte der Waggon, können dabei starke Schwingungen auftreten.

Nachfolgend wird dieses Szenario anhand des vierzehnteiligen Hochgeschwindigkeitszugs betrachtet. Die Waggonmassen liegen zwischen 42,5 und 69,7 Tonnen. Zur Darstellung des Szenarios wird parametrisiert, dass der Kraftschlussbeiwert μ bei Durchfahren des Ortes x_R plötzlich abfällt, veranschaulicht in Bild 68a. Sobald das erste Drehgestell eines Waggon den Punkt passiert, fällt der Wert zunächst auf einen Mittelwert zwischen den beiden Kraftschlussbeiwerten ab. Bei Überfahren des Punktes durch das zweite Drehgestell wird der endgültige Wert erreicht.

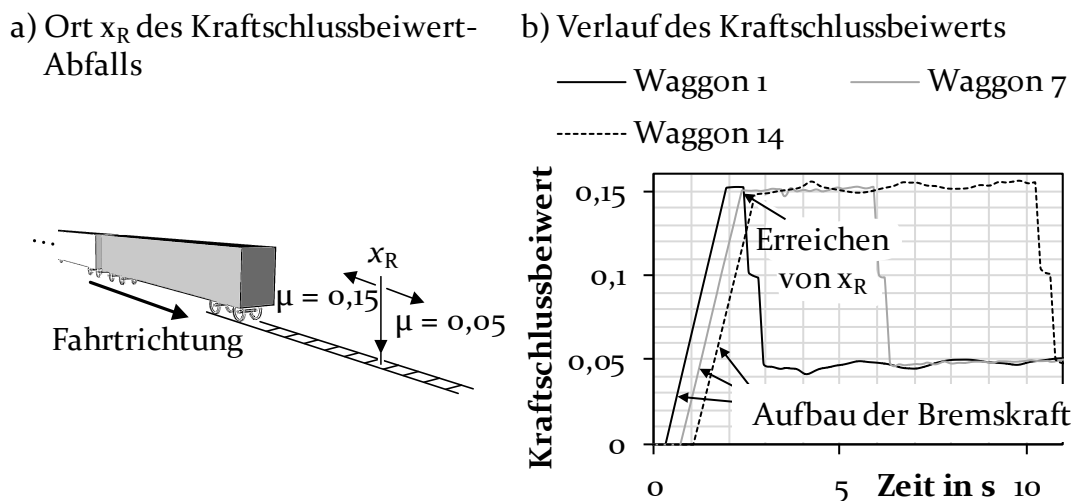


Bild 68: Szenario für einen witterungsbedingten Abfall des Kraftschlussbeiwerts beim vierzehnteiligen Hochgeschwindigkeitszug [Si]

Darüber hinaus wird eine Überlagerung der EP-bremsbedingten Schwingungen mit den Schwingungen resultierend aus dem Abfall des Kraftschlussbeiwerts angenommen. Dieser Fall entspricht der Realität, wenn eine EP-Bremse direkt vor einem Streckenabschnitt eingeleitet wird, an dem sich die Gleiseingriffsverhältnisse z. B. aufgrund von nassem Laub auf der Strecke rapide verschlechtern.

Tabelle 17: Parameter für Simulationsszenarien zur Untersuchung eines Abfalls des Kraftschlussbeiwerts am Vierzehnteiler (Bild 50, Siebenteiler in Mehrfachtraktion)

| Szenario | Kraftschlussbeiwert vor x_R | Kraftschlussbeiwert nach x_R | Totzeit zwischen Waggons | Anfangsgeschwindigkeit |
|----------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1 | 0,15 | 0,15 | 50 ms | 200 km/h |
| 2 | 0,15 | 0,05 | 50 ms | 200 km/h |

Der Verlauf der Kraftschlussbegrenzung der End- und des Mittelwaggons sind in Bild 68b dargestellt. Die Stufe beim Kraftschlussbeiwert von 0,1 in den Kurven ist durch den Zeitversatz der Drehgestelle eines Waggons beim Überfahren von x_R begründet. Die relevanten Parameter der Szenarien sind in *Tabelle 17* aufgelistet.

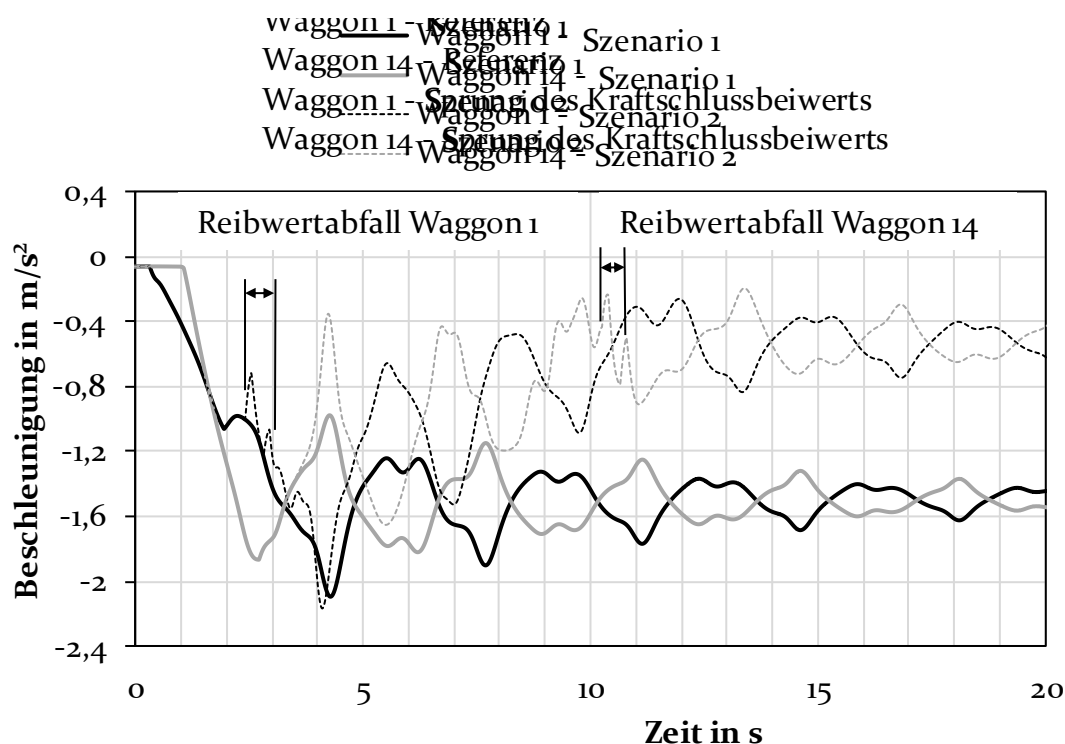


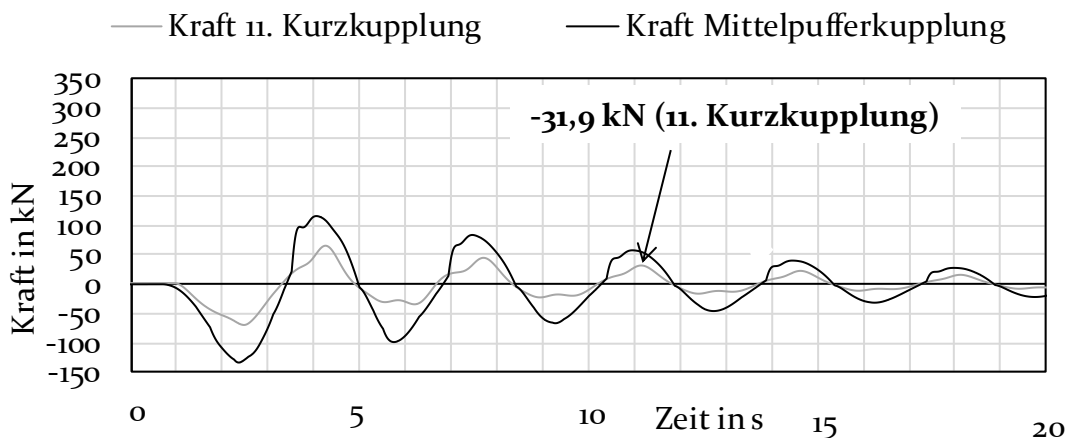
Bild 69: Simulierte Schwingungen durch Abfall des Kraftschlussbeiwerts bei Vollbremsung des vierzehnteiligen Hochgeschwindigkeitszugs [S1]

In Bild 69 sind die simulierten Beschleunigungen der beiden Szenarien gegenüber gestellt. Aufgrund der EP-Bremse mit Totzeiten zwischen den Bremseinsätzen

der Waggon von 50 ms ergibt sich wieder zunächst eine Stauchung des Zugs, woraus die bereits erheblichen Schwingungen der Referenzsimulation resultieren.

Durch den Abfall des Kraftschlussbeiwerts ergeben sich noch stärkere Schwingungsamplituden. Zwischen zehn und elf Sekunden sind vom sinusähnlichen Verlauf abweichend u. a. bei Waggon 14 höhere Frequenzen zu beobachten, die nachfolgend näher untersucht werden.

a) Szenario 1 (ohne Abfall des Kraftschlussbeiwerts)



b) Szenario 2 (zusätzlicher Abfall des Kraftschlussbeiwerts)

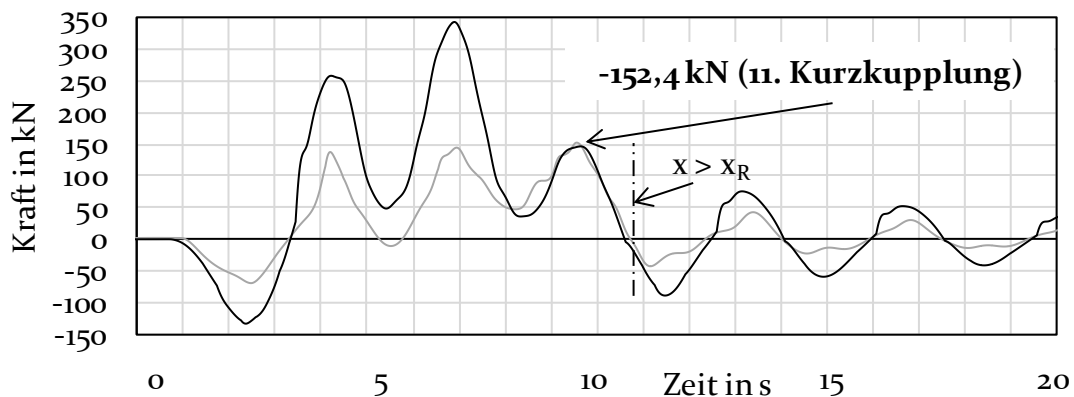


Bild 70: Simulierte Kupplungskräfte bei Vollbremsung des vierzehnteiligen Hochgeschwindigkeitszugs

Zur Bewertung der auftretenden Kupplungsbelastungen sind in Bild 70 die Kraftverläufe der Mittelpuffer- sowie einer äußeren Kurzkupplung (11.) aufgetragen. Die Kraftverteilung von Szenario 1 in Bild 70a zeigt keine Auffälligkeiten; der Betrag der Kraft in der Kurzkupplung ist bei den Extrema stets proportional kleiner als der der Mittelpufferkupplung. Diese Schwingform entspricht der zu erwartenden Grundschwingung, bei der sich gegenüberliegende Waggon um den Mittelpunkt des Zuges entgegengesetzt bewegen.

Der in Bild 70b eingezeichnete Kraftverlauf für die Simulation eines zusätzlichen Abfalls des Kraftschlussbeiwertes ruft starke Zugspannungen (positive Kräfte) während des Abfalls hervor. Sobald nacheinander die Bremskräfte beim vordersten bis zum hintersten Waggon einsetzen, wird der Zug gestaucht.

Dies äußert sich in der negativen Kraft des ersten Minimums. Während der Zug sich schwingungsbedingt wieder ausdehnt, beginnen die Waggon, den Punkt x_R zu passieren, was die Streckbewegung verstärkt und die hohen Zugspannungen hervorruft. Erst nachdem der letzte Waggon den Ort x_R ($x > x_R$) passiert, entspannt sich diese wieder.

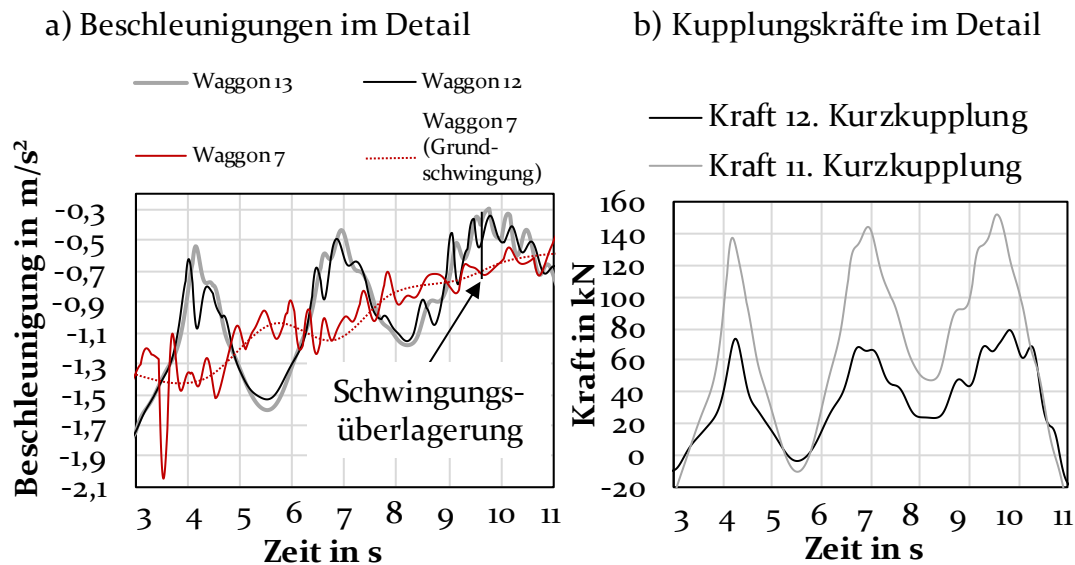


Bild 71: Überlagerung von Grundschwingungen und höherfrequenten Schwingungen und daraus resultierende Kraftspitzen beim Abfall des Kraftschlussbeiwertes

Der in Bild 70b dargestellte Kraftverlauf für Szenario 2 zeigt eine entsprechend in positive Richtung verschobene Kraftverteilung, die die genannten Zugspannung repräsentiert. Dabei fällt auf, dass die Kraft der Kurzkupplung, die erwartungsgemäß deutlich unterhalb der Mittelpufferkupplungskraft liegen sollte (vgl. -a), an diese heranreicht und damit sogar größer ist als die Kraft der Mittelpufferkupplung in Szenario 1. Um den Ursachen für diese unerwartete Belastung auf den Grund zu gehen, werden nachfolgend die Beschleunigungen der der 11. Kurzkupplung benachbarten Waggon (Waggon 12 und 13) anhand von Bild 71a für den Zeitraum der auftretenden Kraft näher untersucht. Darin sind Ausschnitte aus dem Beschleunigungs- und Kraftverlauf eingezeichnet. Unter anderem ist darin auch die Beschleunigung des vor der Mittelpufferkupplung befindlichen Waggon (Waggon 7) aufgetragen.

In Bild 71a offenbaren sich verschiedene Schwingungsmoden, die sich überlagern und zwischen vierzehn und fünfzehn Sekunden zur Maximalkraft in Kurzkupplung 11 führen (Bild 71b oben rechts). Die in -a abgebildeten Kurven zeigen die

Grundschwingung auf, die bei Waggon 7 durch eine höherfrequente, überlagerte Schwingung verstärkt wird. Einerseits schwingen die Waggon 12 und 13 gegeneinander, was die Kupplungskraft weiter erhöht. Andererseits sind die hochfrequenten Schwingungen der Waggon 12 und 13 zu diesem Zeitpunkt gegensätzlich, was die Zugspannung weiter erhöht. Die Summe dieser Ursachen führt zur derart hohen Kraft in Kurzkupplung 11.

Tabelle 18: Wegbereiter für erhöhte Modellkomplexität, resultierende Funktionalitäten und mögliche Anwendungsfelder für die virtuelle Validierung von Entwürfen neuer Züge

| Wegbereiter | Funktionalität | Beispielspezifische Anwendung | Produktspezifische Funktionalität |
|----------------------------------|---|--|---|
| Feldbusmodell (4.5) | Individuelle, komplexitätsabhängige Steuerfunktionalitäten der Module | Zentralisierte Steuerung der über die Waggon verteilten Bremskräfte mittels TCN-Modell | Zentralisierte Produktsteuerung |
| | | Steuerung des maximalen Kraftschlussbeiwerts | |
| | | EP-Bremssimulation; alternativ weitere Bremsmodi wählbar (rein ED, indirekt) | Validierung komplexer Steuerungsfunktionalitäten |
| | | Asynchrones Einsetzen der über die Waggon verteilten Bremskräfte | Simulation von totzeitbedingten Effekten |
| Variable Modellkomplexität (4.3) | Flexibilität bei der Konfiguration von Zugtypen durch variable Waggonanzahlen | Identifikation kritischer Zuglängen für kritische Betriebsfälle | Offenlegung des Zusammenhangs der Produktkomplexität und daraus resultierender Fehlfunktionen |

Die in Zügen installierten Gleit- und Schleuderschutzmechanismen können den durch den Abfall des Kraftschlussbeiwerts bedingten Schlupf wahrnehmen und somit Orte veränderlichen Kraftschlussbeiwertes erkennen. Durch eine entsprechend kurzfristige Übermittlung dieser Information durch die Steuerung des führenden an die restlichen Waggon wäre das Fahrzeug frühzeitig in der Lage, durch eine temporäre Reduktion der Bremskraft zu reagieren. Darüber hinaus ließe sich diese Ortsinformation durch eine zugübergreifende Kommunikation übermitteln. Somit würden andere Züge befähigt, präventiv zu reagieren. Die Maßnahme wäre vergleichsweise kostengünstig zu realisieren, da dafür lediglich eine Erweiterung der Steuerungsfunktionen implementiert werden müsste.

Die in dieser Simulation dargestellten fahrdynamischen Effekte übersteigen die Arbeiten, die bereits zur Untersuchung von während der Fahrt von Zügen auftretenden Längsschwingungen durchgeführt wurden. Darin wurde lediglich das

Auftreten einzelner Effekte und daraus resultierende Schwingungen untersucht, wie z. B. Trägheitseffekte und Schwingungen durch Einsatz der mechanischen Bremse. In dieser Studie werden die Effekte durch Überlagerung mehrerer Schwingungsursachen betrachtet, wie Abfall des Kraftschlussbeiwerts, Steuerungstotzeiten sowie EP-Bremung. [119, 120]

Die Studie zeigt, dass sich mittels des Simulationskonfigurators für Triebzüge komplexe, systemübergreifende Phänomene identifizieren und detailliert analysieren lassen. In Tabelle 18 sind die Wegbereiter für die Modellfunktionalitäten des Konfigurators aufgelistet, die auf der Methodik von Kapitel 4 basieren und die hier durchgeführte, Simulation eines komplexen Betriebsfalls ermöglichen.. Ohne die Wegbereiter wäre die Modellierung realer Steuerungsfunktionalitäten nicht ohne weiteres möglich, da ein dafür geeignetes Kommunikationssystem fehlen würde. Darüber hinaus müsste für jede Produktkonfiguration ein neues Modell komponiert werden, anstatt dass das Modell durch Erzeugung eines Erben des Basismodells anforderungsgerecht lediglich konfiguriert werden muss.

5.2.2 Simulation des Steuerungsverhaltens

Dieser Abschnitt widmet sich der Demonstration, wie sich mittels der Funktionalitäten des Simulationskonfigurators für Triebzüge die Einflüsse der Bremssteuerungsparameter auf die Betriebskosten simulativ darstellen lassen. Indem ED- und EP-Anteile während der Simulation von Bremsmanövern variiert werden, lassen sich die daraus resultierenden Betriebskosten berechnen. Dies wird durch die ganzheitliche Modellierung des Triebzugs möglich, bei der die Steuerung, die mechanische sowie elektrische Bremsleistung als auch die luftwiderstandsbedingten Reibungsverluste berücksichtigt werden. Dadurch lassen sich die Verschleißkosten den Energiekosten gegenüberstellen und Aussagen über die Gesamtkosten treffen. Das Ziel ist die Erkenntnis darüber, welche Steuerungsparametrierung die niedrigsten Betriebskosten zufolge hat.

Hinter der Wahl des Verhältnisses von Motor- und Reibungsbremskraft verbergen sich stark verschiedene Betriebskosten. Zwar kann beim rekuperativen Bremsen mittels der Fahrmotoren Energie rückgespeist und damit ein Gewinn erzielt werden. Mechanische Scheibenbremsen bieten jedoch auf Kosten hohen Verschleißes die nötige Bremskapazität, die durch die Fahrmotoren aufgrund der begrenzten Leistung und Kraftschlussbeiwerte oftmals nicht in ausreichendem Maße aufgebracht werden kann, um schnell genug zu bremsen. Dies ist erforderlich, um Fahrpläne einzuhalten. Bei rein elektrischem Bremsen (ED) werden die Bremswege deshalb länger, sodass Fahrpläne nur durch eine vorhergehend höhere Reisegeschwindigkeit eingehalten werden können, die mit luftwiderstandsbedingten Reibungsverlusten einhergeht. Dadurch steigt der Energieverbrauch während der Fahrt. Die Widerstandskräfte über die Geschwindigkeit sind in Bild 27 ersichtlich. Diese Ausgangssituation ist exemplarisch anhand eines

Geschwindigkeitsverlaufs für eine Fahrt zwischen zwei Bahnhöfen in Bild 72 dargestellt. Die Daten basieren auf einer Simulation des Vierzehnteilers.

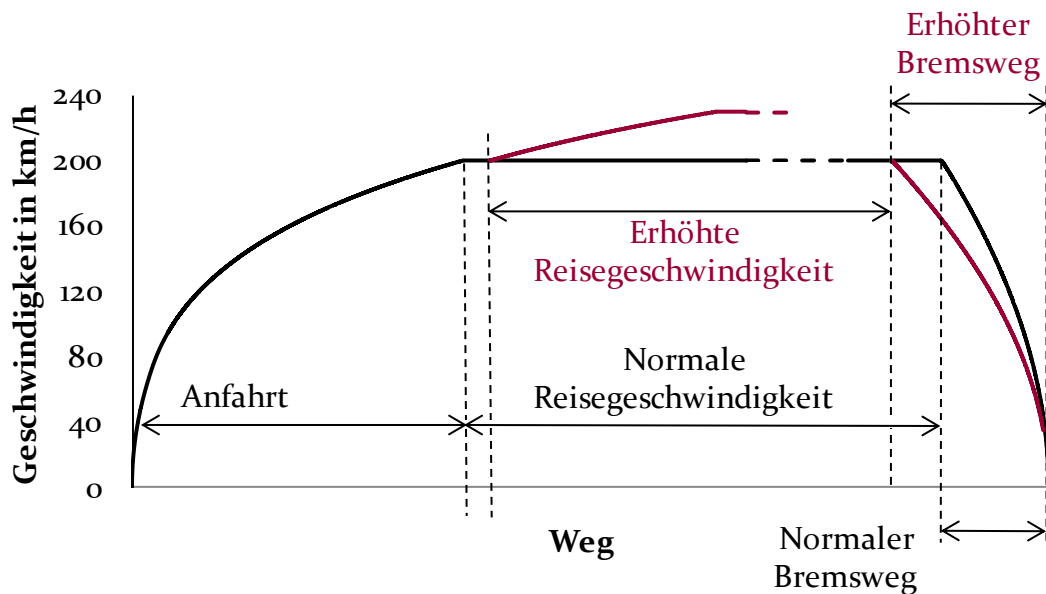


Bild 72: Erhöhung der Reisegeschwindigkeit auf Zielgeschwindigkeit von 230 km/h zum Ausgleich erhöhter Bremswege [Si]

In den nachfolgenden Vergleichssimulationen, in denen die ED- und EP-Bremskraftanteile variiert werden, wird die Gesamtwirtschaftlichkeit der jeweiligen Bremsmanöver untersucht. Je weniger EP-Anteile angewendet werden, desto geringer ist die Bremsleistung, und desto höhere Reisegeschwindigkeiten müssen im Voraus gefahren werden, um den Zeitverlust während des Bremsens auszugleichen. Dafür wird in diesem Fall die Reisegeschwindigkeit je nach Bedarf von 200 km/h auf bis zu 230 km/h angehoben. Zur Vergleichbarkeit der Bremsmanöver wird jedoch jeweils von einer Initialgeschwindigkeit von 200 km/h ausgegangen. Um diese auch bei den Fällen mit einer vorhergehenden Reisegeschwindigkeit von mehr als 200 km/h zu erreichen, werden die Züge vor dem Bremsmanöver auf 200 km/h durch Einsatz der regenerativen ED-Bremse heruntergebremst.

Einer der Hauptkostentreiber bei der Wartung von Zügen ist die mechanische Bremsausrüstung von Zügen. Der Verschleiß von Bremsscheiben und -belägen ist einer der Beweggründe für den Einsatz anderer Bremsarten, um der Fahrbewegung Energie zu entziehen. Der Einsatz der ED-Bremse wird über den Rekuperationsbetrieb der Fahrmotoren erreicht und findet bereits breite Anwendung in Zügen. Da hierdurch nicht nur die mechanische Bremsausrüstung geschont, sondern auch Energie durch Rekuperation gespart werden kann, wird die Ausschöpfung der zur Verfügung stehenden elektrischen Bremskraft angestrebt.

Demnach werden die Fahrmotoren bei Betriebsbremsungen bereits mit ihrer Nennleistung betrieben.

Durch Überspannung der Fahrmotoren kann ihre Leistung erhöht werden, was ein Potential zu weiterer Energieeinsparung und Reduktion des Bremsverschleißes birgt. Für die Zeit eines Bremsmanövers ist jene Erhöhung der Spannung zulässig. Die Rekuperationsmöglichkeiten unterliegen jedoch folgenden physikalischen und technischen Grenzen:

- Einhaltung des Kraftschlussbeiwerts (nicht größer als 0,15)
- Motorenleistungen (abhängig von Fahrgeschwindigkeit)
- Spannung der Fahrmotoren (netz- und umrichtungsabhängig nicht größer als zusätzliche zehn Prozent)
- Wirkungsgrad der Fahrmotoren
- Fahrwiderstände (überproportionale Zunahme mit der Geschwindigkeit)

Dabei wird zur Erhöhung der hier angenommenen Reisegeschwindigkeit von 200 km/h entsprechend mehr Leistung und Energie benötigt, um die Trägheits- und Fahrwiderstandskräfte zu überwinden. Die Mehrleistung bei konstanter Höchstgeschwindigkeit resultiert aus dem erhöhten Fahrwiderstand. Die bei rein motorischer Bremsung resultierende Erhöhung der Bremswege bzw. Fahrdauer aufgrund mangelnder Leistung bei hohen Geschwindigkeiten muss durch eine entsprechend höhere Reisegeschwindigkeit ausgeglichen werden, wie aus Bild 72 hervorgeht.

$$P(t) = T(t) \cdot \frac{2 \cdot v(t)}{d_R} \cdot dt \quad (50)$$

In der Simulation errechnet sich die Leistung P anhand der in den mechanischen Brems- und Motormodellen aufgebrauchten Momente T und aktuellen Geschwindigkeit v sowie dem Raddurchmesser d_R . Der Zusammenhang wird durch Gleichung 50 beschrieben.

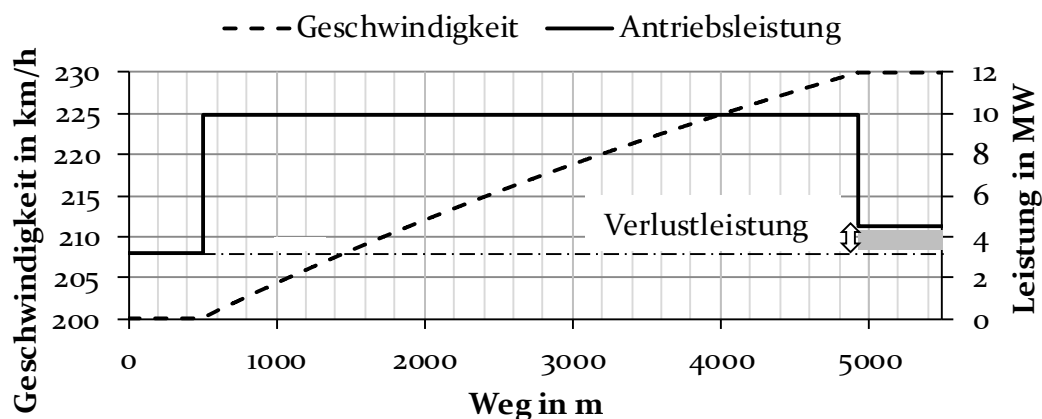


Bild 73: Simulativ ermittelte Mehrleistung des Vierzehnteilers bei Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit auf über 200 km/h [Si]

In Bild 73 ist die fahrwiderstandsbedingte Mehrleistung aufgetragen, um den hier untersuchten Vierzehnteiler mit voller Leistung exemplarisch auf bis zu 230 km/h zu beschleunigen und daraufhin die Geschwindigkeit zu halten. Durch Integration über die Zeit ergibt sich der Energieverbrauch. Während die für die Beschleunigung der trägen Massen nötige Energie rekuperiert werden kann, resultiert der Leistungsunterschied bei Höchstgeschwindigkeit (230 km/h) in Verlustenergie durch die höheren Fahrwiderstände. Dementsprechend sind die Energiekosten höher, wenn schneller gefahren wird. Die Daten in der Abbildung sind ebenfalls simulationsbasiert.

Die Möglichkeiten, die sich aus der Energierekuperation sowie der Einsparung von Fahrwiderstandsverlusten durch das Vermeiden einer Geschwindigkeitserhöhung mittels kurz andauernder Bremsmanöver ergibt, erlauben folgende Hypothesen:

- I. Eine hohe Gesamtbremskraft unter Nutzung der maximal zur Verfügung stehenden motorischen Bremsleistung ist am wirtschaftlichsten. Dies begründet sich dadurch, dass die Bremszeiten sowie die vorherigen Reisegeschwindigkeiten niedrig und somit die Verlustleistung durch den Luftwiderstand klein sind.
- II. Ausschließlich rekuperatives ED-Bremsen ist am wirtschaftlichsten, weil sich somit Bremsverschleiß vermeiden und die maximale Energie rekuperieren lassen.
- III. Ein Kompromiss aus den Hypothesen I und II führt zur größtmöglichen Wirtschaftlichkeit.

Aus diesen drei Hypothesen werden entsprechende Simulationen parametrisiert, die in Tabelle 19 aufgelistet sind. Für die letzten beiden Simulationen wird außerdem untersucht, welche Potentiale sich in einer Erhöhung der Motorspannung verbergen. In der Untersuchung werden Verschleißkosten, erhöhte Energiekosten bei höheren Reisegeschwindigkeiten sowie die Ersparnis durch Rekuperation gegeneinander abgewogen.

Die Ausgangssituation für die Simulationen ist eine Anfangsgeschwindigkeit von 200 km/h. Diese Geschwindigkeit wird durch das jeweilige Bremsmanöver bis zum Stillstand des Zugmodells reduziert. Dabei ist charakteristisch, dass die verschiedenen simulierten Bremsmanöver aufgrund der unterschiedlichen zeitlichen Kraftverläufe auch unterschiedlich lange Bremswege und Zeitbedarfe zufolge haben, wie in Bild 74 dargestellt ist.

Tabelle 19: Eigenschaften der evaluierten Bremssimulationen

| Bezeichnung | Nr. | Blending | Nur ED-Bremse | Kraftschlussgrenze | Überspannung +10 % |
|---|-----|----------|---------------|--|--------------------|
| Blending ohne Kraftschlussbegrenzung | (1) | Ja | Nein | $\mu = 0,06$ (LW und TW) | Nein |
| Rein motorisch | (2) | Nein | Ja | - | Nein |
| Rein motorisch mit Spannungserhöhung | (3) | Nein | Ja | - | Ja |
| Blending mit Kraftschlussbegrenzung | (4) | Ja | Nein | $\mu = 0,03$ (LW) $\mu = 0,06$ (TW) | Nein |
| Blending mit Kraftschlussbegrenzung und Spannungserhöhung | (5) | Ja | Nein | $\mu = 0,03$ (LW) $\mu = 0,06$ (TW) | Ja |

Simulation (5) (Blending mit Kraftschlussbegrenzung und Spannungserhöhung) erreicht die kürzeste Bremsdauer. Dies liegt daran, dass der Zug länger mit einer höheren Geschwindigkeit fährt als beispielsweise bei Simulation (1) (Blending ohne Kraftschlussbegrenzung), gegen Ende jedoch stärker bremst.

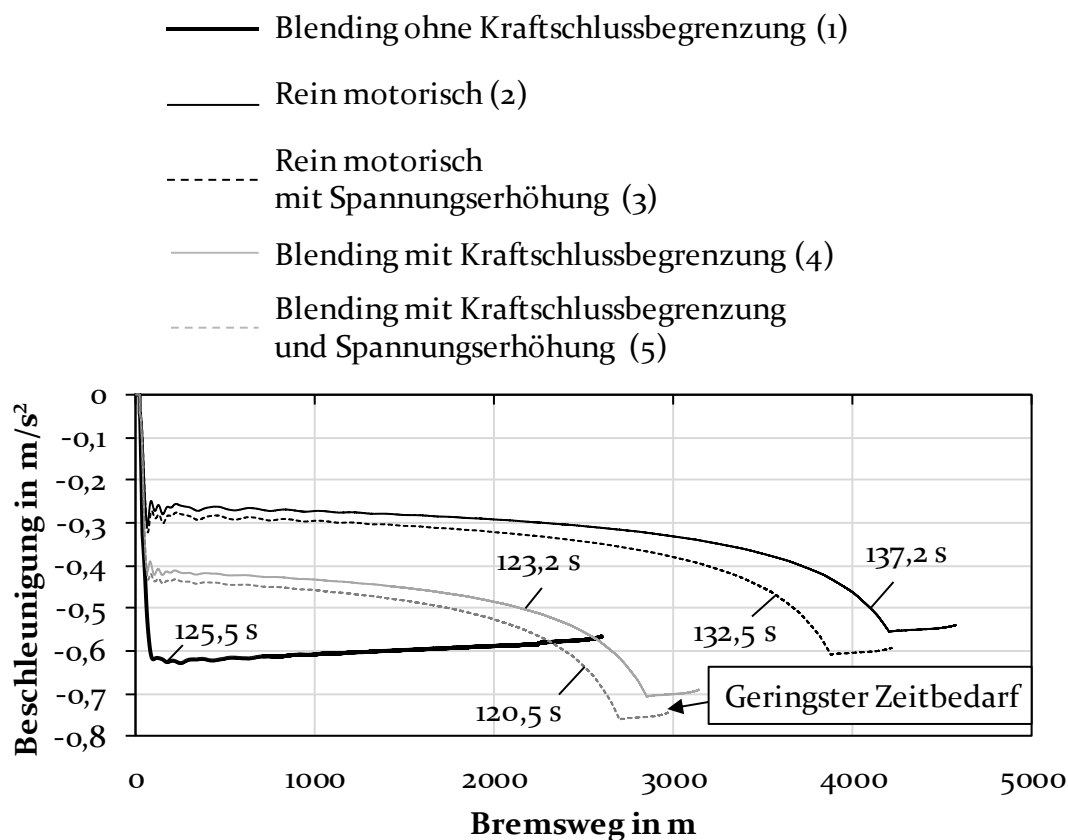


Bild 74: Bremswege und anfallende Zeitbedarfe der fünf untersuchten Bremssimulationen [S1]

Simulation (5) dient damit den übrigen Simulationen als Referenzzeit, die das Prinzip aus Bild 72 anwenden, um die zeitliche Verzögerung aufzuholen. Demnach wird für die restlichen Simulationen die Geschwindigkeit vor dem Bremsmanöver entsprechend angehoben, um den Zeitrückstand auszugleichen. Die dabei anfallende Verlustleistung entsprechend Bild 73 wird über die Zeit integriert und ergibt damit die Verlustenergie, aus der sich der damit verbundene Kostenanteil berechnet.

Für Geschwindigkeiten oberhalb von 75 km/h wird stets mit maximaler Motorleistung gebremst. Für kleinere Geschwindigkeiten wird die Leistung linear mit sinkender Geschwindigkeit reduziert, weil die Bremskräfte ansonsten zu stark ansteigen würden und eine Schädigung der Radsätze sowie der Schiene zufolge hätten. Aufgrund der begrenzten Motorleistung vieler Hochgeschwindigkeitszüge ist es für Reisegeschwindigkeiten erforderlich, Bremsblending anzuwenden, damit eine ausreichend große Verzögerung erzielt wird.

Die Kosten lassen sich mittels Zeitintegration der berechneten Leistungen von Fahrmotoren und mechanischen Bremsen sowie unter Kenntnis vom Stromkaufpreis und Vergütungssatz für Rekuperation simulativ ermitteln und vergleichen. Darüber hinaus müssen die Energien für die Kostenberechnung um den jeweiligen Wirkungsgrad im beschleunigenden Betrieb bzw. im Rekuperationsbetrieb korrigiert werden. Die Kennzahlen sind in Tabelle 20 aufgelistet.

Tabelle 20: Angenommene Kennzahlen für Kostensimulation [Si, 153]

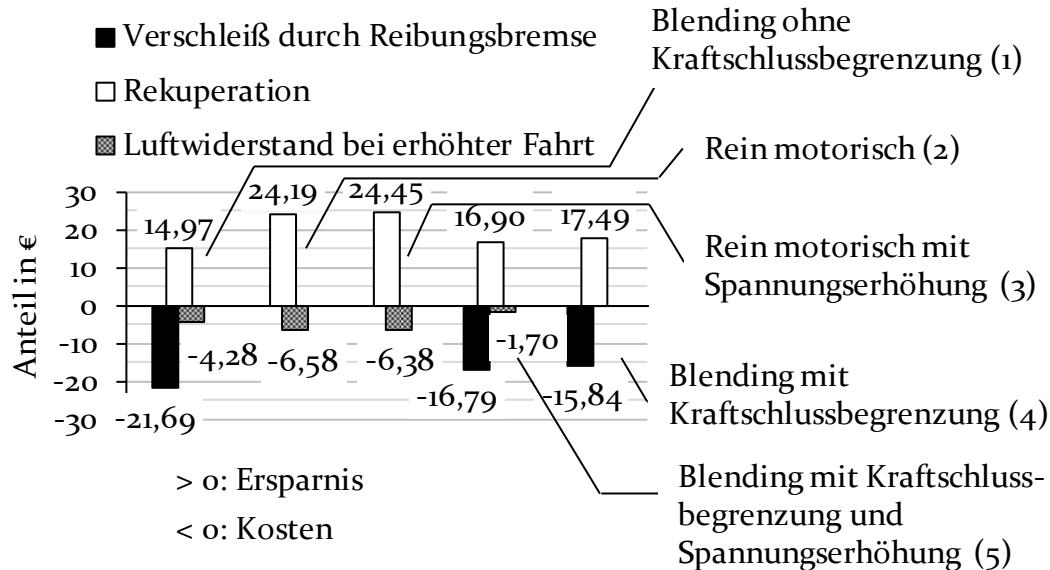
| Stromkaufpreis | Vergütungssatz für Rekuperation | Kostensatz für Verschleiß | Wirkungsgrad Antrieb | Wirkungsgrad Rückspeisung |
|-----------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 0,12 €/kWh | 0,09 €/kWh | 0,14 €/kWh | 0,9 | 0,8 |

Die Kostenanteile der fünf Simulationen sind in Bild 75a aufgetragen. Beim Blending ohne Kraftschlussbegrenzung (1) resultieren hohe Reibungsverlustanteile. Da das Szenario ebenfalls zeitlich hinter der Referenzsimulation (5) zurückbleibt, sind außerdem Luftwiderstandsverluste zu verzeichnen, die zum Zeitausgleich nötig sind. Die Summe der Anteile schlägt sich in der Bilanz in Bild 75b in Form der höchsten Kosten nieder.

Der wirtschaftliche Vorteil rein elektrischen Bremsens – (2) und (3) – wird durch die Notwendigkeit relativiert, den Fahrplan einzuhalten. Da rein elektrisches Bremsen aufgrund der begrenzten Leistung die längsten Bremswege und dafür anfallende Zeitbedarfe zufolge hat, sind die luftwiderstandsbedingten Verlustkosten von allen Simulationen am höchsten, die jedoch auch den höchsten Rekuperationsanteilen gegenüberstehen. Da kein Blending eingesetzt wird, kommt es zu keinen Reibungsverlustanteilen. In Summe ergibt sich beim reinen ED-Bremsen die größte Wirtschaftlichkeit unter den Simulationen, wie in Bild 75b

abgebildet ist. Die sich aus der Spannungserhöhung ergebende Mehrleistung in Simulation (3) führt gegenüber (2) nur zu einem marginalen Kostenvorteil.

a) Gegenüberstellung von Betriebskosten und -ersparnissen



b) Gesamtbilanz

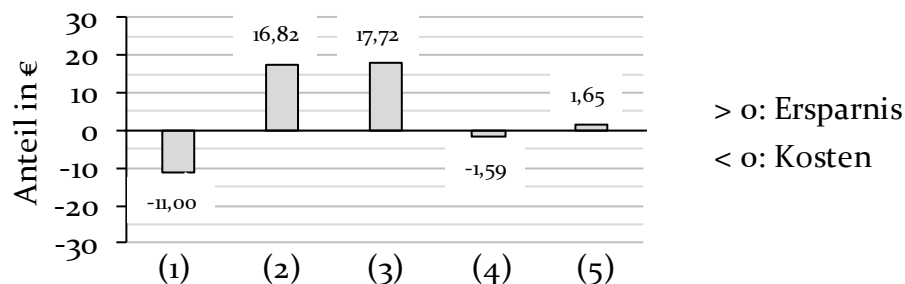


Bild 75: Simulierte Kosten bzw. Ersparnisse bei den verschiedenen Bremsstrategien [Si]

Die Spannungserhöhung hat bei den Simulationen (4) und (5) einen größeren Einfluss auf die daraus resultierende Ersparnis, weil in diesem Fall nicht nur Luftwiderstandsverluste, sondern auch Reibungsverluste vermieden werden. Wie Bild 75b zeigt, übersteigen die Ersparnisse in den Simulationen (2) und (3) für reine ED-Bremsung deutlich die des Blendings in den Simulationen (4) und (5).

Aus diesen Beobachtungen lässt sich schließen, dass sich als einziges Hypothese II bewahrheitet. Die in Hypothese II und III aufgestellte Theorie ist damit widerlegt, nach der sich vermeidbare Luftwiderstandsverluste auf Kosten des Einsatzes der mechanischen Bremsen in niedrigeren Gesamtkosten äußern. Die Erkenntnis wird jedoch dadurch relativiert, dass die zeitliche Flexibilität zur Einhaltung von Fahrplänen durch zusätzlichen Einsatz des EP-Bremssystems größer ist. Aufgrund der höheren Bremskapazität durch Einsatz des EP-Systems und der

damit verbundenen niedrigeren Zeitbedarfe lassen sich unplanmäßige Verzögerungen kompensieren. Deshalb sollte in der Bremssteuerung von Triebzügen zumindest die Möglichkeit gegeben sein, durch optionale Involvierung des EP-Systems zeiteffizienter zu bremsen.

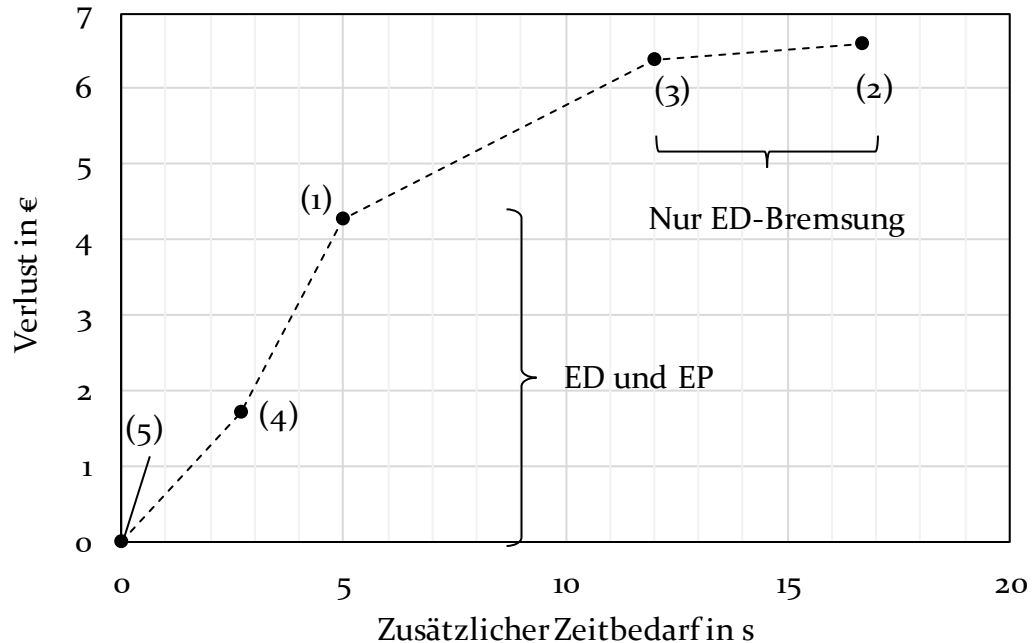


Bild 76: Luftwiderstandsverluste zur Kompensation zusätzlichen Zeitbedarfs bei den Bremsstrategien (1)-(4)

Beim direkten Vergleich der Luftwiderstandsanteile fällt auf, dass diese nicht proportional zum Zeitverlust sind, wie in Bild 76 dargestellt ist. Die Simulationen (4) und (1), welche einen verhältnismäßig kleinen zusätzlichen Zeitbedarf zur Referenzsimulation (5) auszugleichen haben, sind bezogen auf die Zeit kostenintensiver als die Simulationen (3) und (2). Darin sind jedoch deutlich höhere Zeitverluste zu kompensieren. Dies liegt darin begründet, dass die meiste Energie für das schnellere Fahren vor Beginn der in Bild 74 dargestellten Bremssimulation dafür benötigt wird, die höhere Geschwindigkeit auf- bzw. wieder abzubauen. Die Geschwindigkeitsänderung zu Zwecken der Verzögerungskompensation und nachträgliche erneute Reduktion bedürfen aufgrund der angenommenen Wirkungsgrade der meisten Energie. Das Aufrechterhalten der erhöhten Reisegeschwindigkeit, was bei (2) und (3) geschieht, ist hingegen deutlich weniger energieaufwendig. Deshalb findet zunächst im Bereich zwischen null und fünf Sekunden ein überproportionaler Kostenanstieg statt, der durch die ebenso mit steigender Geschwindigkeit überproportional ansteigende Luftwiderstandskraft verursacht wird. Danach flacht der Verlauf ab, weil die angenommene Zielgeschwindigkeit von 230 km/h erreicht ist. Dies ist in Bild 72 der Punkt, ab dem die rote Linie nicht mehr weiter ansteigt.

Könnte die Kapazität von (5) durch reines ED-Bremsen erreicht werden, ließe sich von der besseren Bremsleistung abgesehen noch mehr Strom in das Netz rückspeisen. Wird angenommen, dass die Bremskraft in Szenario (5) rein elektrisch aufgebracht werden kann, erhöht sich dadurch die Ersparnis von 1,65 Euro in Bild 75b auf ca. 25,41 Euro pro Bremsmanöver. Alleine die Fahrmotoren von Triebzügen machen ca. dreizehn Prozent der Gesamtfahrzeugkosten von ca. 30 Millionen Euro aus, d. h. ca. 3,9 Millionen Euro. Anhand von Bild 74 wird ersichtlich, dass im Vergleich zu rein motorischer Bremsung ca. 50 Prozent mehr Motorleistung gefordert ist, was zu Motorkosten von 5,85 Millionen Euro pro Fahrzeug führen würde. Bei einer angenommenen Lebensdauer der Fahrzeuge von 30 Jahren ergeben sich etwa 21 Bremsungen pro Tag, ab denen die ausrüstungsbedingten Mehrkosten durch die Ersparnis aufgrund der erhöhten Rekupe-
rationsleistung ausgleichen würden. Dabei sind noch viele Einflüsse unberücksichtigt, wie z. B. eine größer zu dimensionierende und damit teurere Stromversorgungs-ausrüstung sowie höhere Energieverbräuche aufgrund größerer Massen. Darüber hinaus würden sich höhere Streckennutzungskosten errechnen, die zu erheblichen Teilen auf den ungefederten Massenanteilen beruhen. Diese steigen mit einer größeren Dimensionierung der Fahrmotoren oder der Motoranzahl. Des Weiteren kann Energie netzabhängig nicht immer vollumfänglich rekupe-
riert werden etc. Dementsprechend wird die realistische Anzahl notwendiger Bremsungen pro Tag weiter ansteigen, ab der eine größere Dimensionierung der Traktionseinheiten wirtschaftlich sein könnte. Dennoch befindet sich die hier errechnete Anzahl notwendiger Bremsungen pro Tag im Bereich des Realisti-
schen, weshalb eine größere Dimensionierung bzw. höhere Motoranzahl bei zukünftigen Auslegungen der Traktionseinheiten erwogen und umfänglich über-
prüft werden sollte. [153–155]

Um solche Entscheidungen zu treffen, bedarf es jedoch einer ganzheitlichen Anpassung der Fahrzeuge, weil derartige Designänderungen weitreichende Folgen haben. Durch eine Änderung würden größere Kräfte und Momente im Antriebs-
strang entstehen, wodurch u. a. die Getriebe, aber auch Aufhängungen und Strukturteile größer dimensioniert werden müssten. Davon abgesehen könnten die notwendigen größeren Ströme eine Anpassung der Stromversorgungs-ausrüs-
tung zufolge haben. Zur vollständigen Abschätzung der Interaktion der geänderten mit deren umgebenden Baugruppen eignen sich wiederum die in dieser Arbeit eingeführten Simulationskonfiguratoren.

Die Betrachtungen demonstrieren, dass sich das Steuerverhalten mittels des Simulationskonfigurators für Triebzüge in Bezug auf daraus resultierende Betriebskosten analysieren und bewerten lässt. Durch Verknüpfung der Steue-
rungssimulation mit Optimierungsverfahren lassen sich zukünftig beispielsweise Steuerungsparameter in Bezug auf die Betriebskosten bereits in der Entwurfs-
phase optimieren, was je nach Parametern im Vergleich zu diesem Beispiel

herausfordernd sein kann. Durch die optimierte Steuerungssoftware können effizientere Produkte hergestellt werden.

Tabelle 21: Wegbereiter für die Simulation von Steuerungsfunktionalitäten, resultierende Funktionalitäten und mögliche Anwendungsfelder für die virtuelle Validierung von Entwürfen neuer Züge

| Wegbereiter | Funktionalität | Beispielspezifische Anwendung | Produktspezifische Funktionalität |
|---------------------|-----------------------------|---|--|
| | | Effizienzuntersuchung von Steuerungsalgorithmen | Integration realistischer Steuerungsalgorithmen in Simulation |
| Feldbusmodell (4.3) | Realistische Bremssteuerung | Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Energieverbrauch sowie mechanischem Verschleiß und den ursächlichen Bremssteuerungsparametern | Darstellung des Zusammenhangs von Steuerungsalgorithmen und resultierendem physikalischen Produktverhalten |

Die durch die Methodik in Kapitel 4 verliehenen Funktionalitäten und ihre Wegbereiter, auf denen die hierin durchgeführten Betrachtungen beruhen, sind in Tabelle 21 dargestellt. Die Simulationen werden durch die auf dem Feldbusmodell basierenden Steuerungsfunktionalitäten ermöglicht.

5.2.3 Konfiguration von HiL-Anwendungen

Dieser Abschnitt dient der Demonstration der Konfigurierungsmöglichkeit des Triebzug-Basismodells für HiL-Anwendungen. Dabei ist es das Ziel, eines der Steuerungsmodule der im Basismodell enthaltenen Waggonmodelle für den Austausch durch ein reales Steuergerät vorzubereiten. Durch den Betrieb der Steuerungshardware, die mit der Simulation des umgebenden physikalischen Triebzugmodells gekoppelt ist, lassen sich zukünftig die Auswirkungen von Steuerungsfunktionalitäten auf die Längsdynamik von Triebzügen im Labor darstellen, wozu bisweilen aufwendige Feldtests nötig sind. [156]

Um eine einsatzbereite Simulationsumgebung für HiL zu erhalten, empfiehlt sich eine schrittweisen Vorgehensweise, wie sie in Bild 77 dargestellt ist. Die Schritte in den horizontal gerichteten, weißen Pfeilen werden in dieser Arbeit beschrieben. Das Ziel ist die Bereitstellung eines multiphysikalischen Umgebungsmodells, an das Steuergeräte zwecks HiL-Simulation angebunden werden können.

Der Modellbildungsprozess endet mit einem nach Kapitel 4 erzeugten Basismodell mit einer FMI-Schnittstelle für die Anbindung des Steuergeräts an das multiphysikalische Waggonmodell und einer Busschnittstelle. Über diese werden die Steuerungsmodelle der übrigen Waggon des Zugmodells in das reale TCN des Steuergeräts eingebunden. Dadurch können Steuergeräte einzeln getestet werden.

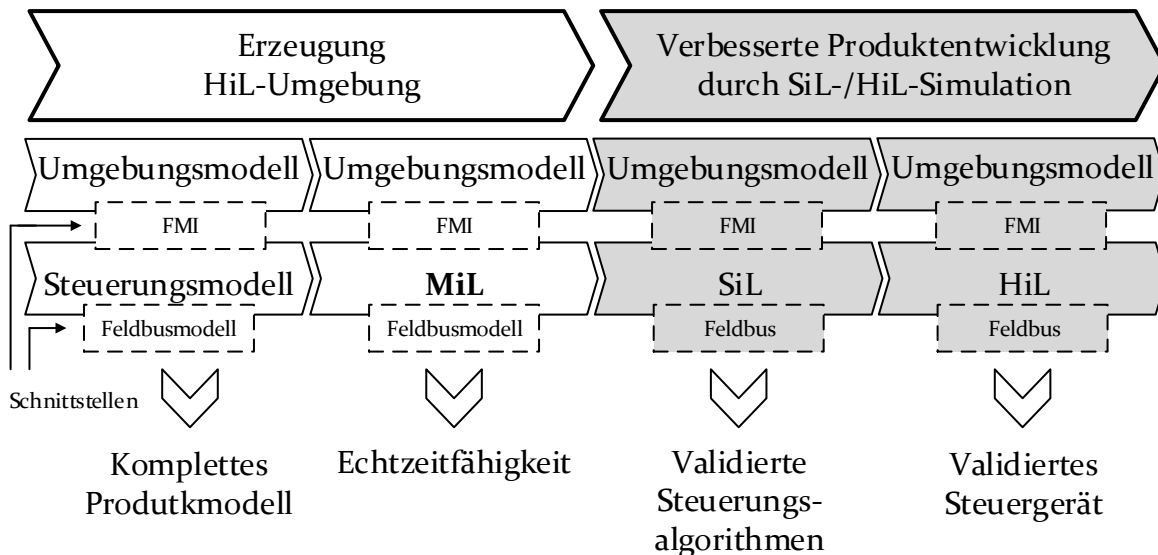


Bild 77: Prozess zur Entwicklung von HiL-Simulatoren mittels multiphysikalischer Umgebungsmodelle und Anbindungsschnittstellen [150, 157, 158]

Die in diesem Abschnitt erörterte MiL-Simulation ist der Schritt, durch den sichergestellt wird, dass das einzubindende multiphysikalische Zugmodell für Software-in-the-Loop- (SiL) und HiL-Simulationen funktionsfähig ist. Dafür muss die Echtzeitfähigkeit des Modells sichergestellt werden. Dies bedeutet, dass die Zeit, die eine Simulation in Anspruch nimmt, geringer als die simulierte Zeitspanne ist. Das ist nötig, damit das Steuergerät regelmäßig die von der Simulation generierten Sensorwerte für Berechnungen einlesen kann und neu berechnete Steuerbefehle ebenso regelmäßig durch das Simulationsmodell verarbeitet werden können. Dies ist für den realen Betrieb des Steuergeräts nötig, da ansonsten die simulierten Sensorwerte zu falschen Zeitpunkten an das Steuergerät übermittelt werden würden. Darüber hinaus wäre die Simulation nicht in der Lage, alle Steuerbefehle zu verarbeiten.

Nach der MiL-Simulation ist die modellseitige Vorbereitung abgeschlossen. Das MiL-Modul lässt sich somit durch reale Steuerungsalgorithmen austauschen, deren Funktionalitäten sich in Simulationen mit der virtuellen Umgebung des multiphysikalischen Zugmodells validieren lassen. Die Algorithmen können entweder durch Echtzeitsysteme (SiL) oder die komplette physische Komponente (HiL) ausgeführt werden. SiL dient dabei der Entwicklung valider Steueralgorithmen, während HiL zusätzlich die hardwareseitigen Funktionen des Steuergeräts absichert. Das multiphysikalische Umgebungsmodell wird in beiden Fällen auf einem Echtzeitsystem ausgeführt. [157, 159]

In Bild 78 ist der Aufbau eines physischen Steuergeräts für eine mit dem Basismodell für Triebzüge mögliche HiL-Simulation aufgezeigt, die die gegenseitige Beeinflussung von Steuerbefehlen und der Längsdynamik zwischen den Waggons offenbart. Das multiphysikalische Simulationsmodell des Triebzugs – in diesem

Beispiel mit sieben Waggon konfiguriert – wird auf ein Echtzeitsystem übertragen. Die Loop-Schnittstelle des Modells wird über FMI und I/O-Hardware mit der physischen Komponente (Steuergerät) verbunden, über die simulierte Sensorwerte und durch die Komponente berechnete Sollwerte bidirektional übertragen werden. Die Busschnittstelle der Komponente wird über das Feldbusmodell mit den Steuerungsmodellen der übrigen Waggonmodelle verbunden. Auf diese Weise erhält die Komponente ihre vollständige, zum Betrieb notwendige Umgebung in virtueller Form. Die Modellarchitektur eignet sich außerdem zur Substitution von Steuerungsmodellen der übrigen Waggonen auf die gleiche Weise, sodass auch die Interaktion von Steuergeräten untereinander in die Simulation miteinbezogen werden kann. Dadurch lässt sich das Steuerungssystem von Triebzügen in Bezug auf die Verursachung von Längsschwingungen validieren.

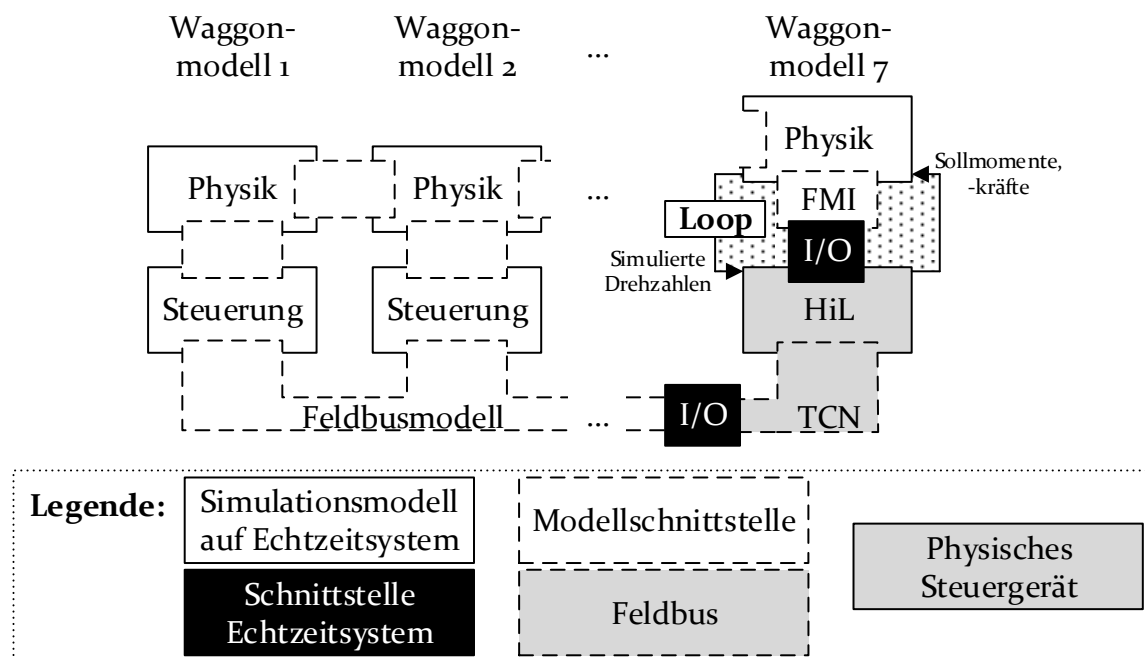


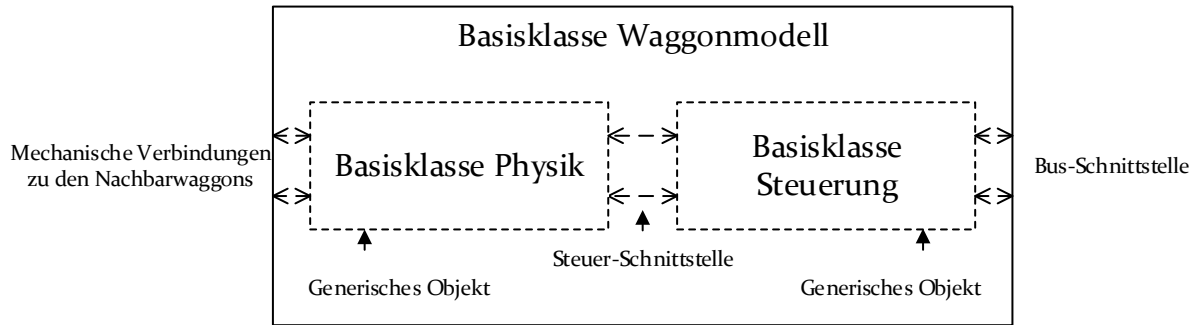
Bild 78: Für die HiL-Simulation eines einzelnen Steuergeräts konfiguriertes Triebzug-Basismodell [150]

Wenn das Physik-Modell der Waggonen weiter ausgebaut wird, sodass über Längsschwingungen hinausgehende Dynamik darstellbar ist, lässt sich das Steuerungssystem auf die hier beschriebene Weise zusätzlich in Hinblick auf die Einhaltung weiterer Anforderungen testen. So könnte beispielsweise Nicken, Wanken und Wogen ausgeschlossen werden. Mit Einbeziehung eines Pneumatikmodells ergibt sich zusätzlich die Möglichkeit, bremsbedingte Schwingungen auszuschließen, bevor Fahrzeuge gebaut und nachträglich überarbeitet werden müssen, um durch Prüfbehörden zugelassen zu werden.

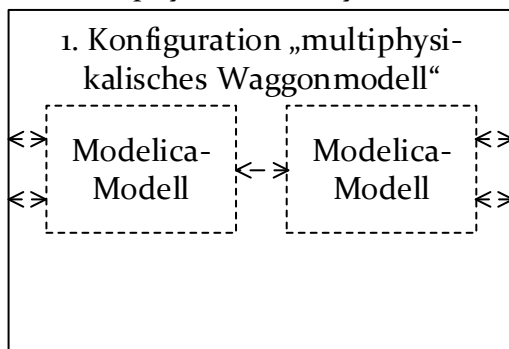
Um die HiL-Funktionalität zu erreichen, wird das Triebzug-Basismodell entsprechend Bild 77 schrittweise konfiguriert und verifiziert. Diese Schritte sind in Bild 79 beschrieben. Die durch das Triebzug-Basismodell repräsentierte Ausgangssituation ist in Bild 79a dargestellt. Darin sind die beiden Teile für die „Physik“ und

die „Steuerung“ als generische Objekte von Basisklassen instanziiert. Durch die Konfiguration in Bild 79b entsteht ein ausführbares Simulationsmodell eines Triebzugs, bei dem sowohl die „Physik“ als auch die „Steuerung“ Modelica-Modelle werden.

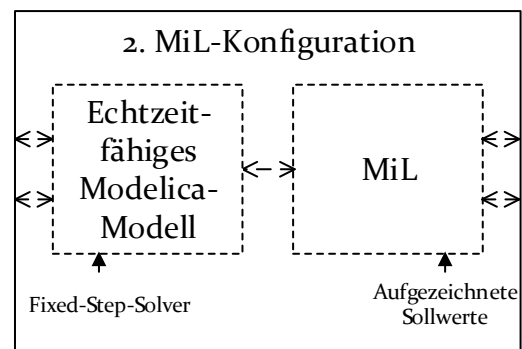
a) Basisklasse des Waggonmodells



b) Konfiguration für multiphysikalische Systemsimulation



c) Konfiguration für MiL-Echtzeitsimulation



Legende: -- Verbindung > Schnittstelle Klasse Objekt

Bild 79: Sukzessive Vorbereitung des Triebzug-Basismodells für HiL-Simulation [157]

In diesem Beispiel wird das Modell des in Abschnitt 4.3.2 eingeführten, sieben-teiligen Hochgeschwindigkeitszugs konfiguriert und exemplarisch ein Bremsma-növer simuliert, um Schwingungen anzuregen, die bei späterer HiL-Simulation in Echtzeit berechenbar sein müssen. Während einer Simulation werden die Werte des Steuerungsmodells aufgezeichnet. Dafür ist entscheidend, dass die Berechnung mit einem Berechnungsverfahren mit konstanter Integrations-schrittweite durchgeführt wird. Die Schrittweite wird solange erhöht, wie das numerische Verfahren gerade noch stabil bzw. die Simulationsgenauigkeit noch ausreichend ist. Die Schrittweite muss außerdem feiner als der Berechnungszyk-lus des späteren Steuergeräts sein, um den Fehlerfall zu vermeiden, dass während der Simulation Steuerbefehle nicht vom Modell umgesetzt werden.

Auf Basis der aufgezeichneten simulierten Steuerungsdaten wird ein MiL vorbereitet; ein weiterer Waggontyp wird aus der Basisklasse konfiguriert, der anstelle des Modelica-Steuerungsmodells das MiL enthält (Bild 77c). Dieses stellt sicher, dass der verwendete Rechner keine Ressourcen zur Berechnung von Steueralgorithmen aufwenden muss, die zur realistischen Performancebewertung des multiphysikalischen Zugmodells fehlen würden. Das MiL gibt synchron zum rein multiphysikalischen Modell (Bild 77b) die aufgezeichneten Sollbefehle an das Modelica-Modell der „Physik“. Dadurch verhält sich das MiL in der Simulation wie das vorherige Modelica-Modell. Die mit den Setups aus Bild 77b und Bild 77c simulierten Schwingungen stimmen demnach überein.

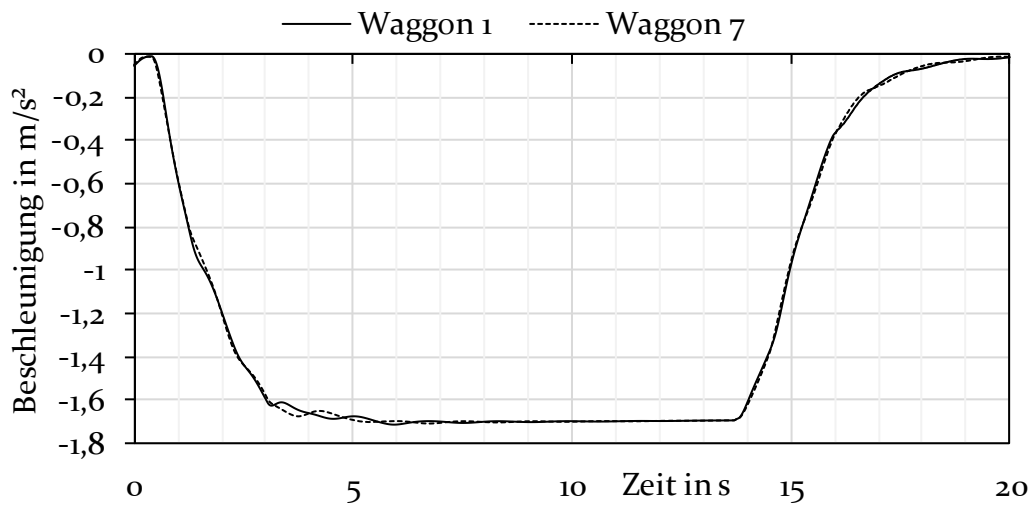


Bild 80: Längsschwingungen während der MiL-Simulation eines Bremsmanövers mit dem siebenteiligen Hochgeschwindigkeitszug mit Euler-Cauchy-Verfahren und konstanter Integrationsschrittweite

Um die MiL-Simulation insofern als erfolgreich bezeichnen zu können, als nachfolgend SiL- und HiL-Simulation durchgeführt werden können, bedarf es eines echtzeitfähigen multiphysikalischen Zugmodells. Demnach muss der Zeitbedarf zur Simulation des Schwingverhaltens mindestens der parametrisierten Simulationszeit entsprechen. Durch den Einsatz von Echtzeitsystemen lässt sich eine noch kürzere Simulationsdauer als beim hier durchgeführten Test auf einem Windows-Rechner in einem Modelica-Werkzeug erreichen.

Tabelle 22: Einstellungen und Rechenaufwand des MiL-Simulators für den siebenteiligen Hochgeschwindigkeitszug mit einem Euler-Cauchy-Verfahren

| CPU-Typ | Anzahl Kerne | Maximale CPU-Frequenz | Rechen-schritt-weite | Simulierte Zeit | Zeitbedarf | Zeitfaktor |
|----------------------|--------------|-----------------------|----------------------|-----------------|------------|------------|
| Intel Core i7-3740QM | 4 | 3,7 GHz | 0,01 ms | 20 s | 4,90 s | 0,25 |

In Bild 80 sind die Beschleunigungskurven der beiden äußeren Waggonmodelle aufgetragen. Für die Simulation wurde eine Vollbremsung durchgeführt. Die Kurven zeigen trägheits- und luftwiderstandsbedingt auftretende Schwingungen aus der MiL-Simulation mit konstanter Integrationsschrittweite. Die identischen Kurven werden erhalten, wenn das Modell wie gehabt mit Berechnungsverfahren mit adaptiven Schrittweiten berechnet wird.

Tabelle 23: Wegbereiter für HiL-Simulation mittels multiphysikalischer Umgebungsmodelle und skalierbarer Hardware-Setups 1/2

| Wegbereiter | Funktionalität | Beispielspezifische Anwendung | Produktspezifische Funktionalität |
|---|--|---|---|
| Funktionsgerecht gegliedertes Basismodell (4.1) | Konfigurierbares Triebzug-Basismodell | Anwendung der modellseitig vorgesehenen Schnittstellen auf anzubindende physische Komponenten | Konfigurierbares und interdisziplinäres Produkt-Basismodell |
| Effiziente Konfiguration von Varianten (4.2) | Adaption der Parameter an spezifische Zug- und Waggontypen | Konfiguration eines realitätsnahen Triebzugs | Modellseitige Konfigurierbarkeit der Parameter und Komplexität gemäß der realen Umgebung der zu prüfenden Komponenten |
| Variable Modellkomplexität (4.3) | Adaption des Basismodells an verschiedene Waggonanzahlen | | |

Für den MiL-Test wurde das Setup aus Tabelle 22 verwendet. Die simulierte Zeit von 20 Sekunden steht dabei den dafür benötigten 4,90 Sekunden gegenüber, woraus sich der Zeitfaktor von 0,25 ergibt. Der endgültige Zeitbedarf hängt vom konkret ausgewählten Echtzeitsystem ab und kann deshalb hier nicht abschließend bewertet werden. Da der Zeitfaktor den Wert *Eins* jedoch deutlich unterschreitet, kann daraus geschlossen werden, dass in einem HiL-Setup Echtzeitfähigkeit erreicht werden kann, was heutzutage bereits in der Regel für komplexe Mehrkörpersysteme möglich ist [160].

Indem die Modellschnittstellen vorbereitet und valide Einstellungen für das Lösungsverfahren gefunden sind, kann der Simulationskonfigurator für Triebzüge zukünftig als virtuelles Umgebungsmodell für Steuergeräte in HiL-Simulationen angebunden werden. Je nach Simulation und Waggonanzahl muss zur der Einrichtung von HiL-Simulationen jeweils gemäß dem hier beschriebenen Verfahren sichergestellt werden, dass das Modell mit dem in Echtzeit betriebenen Steuergerät schritthält.

Die erreichten HiL-Funktionalitäten durch Konfiguration des Triebzug-Basismodells basieren zu großen Teilen auf den Methoden aus Kapitel 4, wie in Tabelle

23/Tabelle 24 dargestellt ist. Die in die Architektur des Basismodells integrierten Schnittstellen und die Modularisierung der über die Schnittstellen verbundenen Modellteile ermöglichen, dass das Basismodell lediglich zur Erreichung der Funktionalitäten konfiguriert werden muss.

Tabelle 24: Wegbereiter für HiL-Simulation mittels multiphysikalischer Umgebungsmodelle und skalierbarer Hardware-Setups 2/2

| Wegbereiter | Funktionalität | Beispielspezifische Anwendung | Produktspezifische Funktionalität |
|--|--|--|---|
| Schnittstellenintegration zur Modellkopplung (4.4) | Anbindbarkeit des Basismodells für Triebzüge an Steuergeräte | Anbindung an TCN und HiL-Komponente mittels Feldbusmodell und FMI | Realisierung der „Loop“ für Komponenten in HiL-Simulationen |
| Feldbusmodell (4.5) | Anbindbarkeit von Steuerungsmodellen an das TCN | Einbindung virtueller Waggon inklusive ihrer Steuerungsmodelle | Anpassung der Skalierung in HiL-Simulationen zu testen der Systeme an Validierungsanforderungen |
| | | Anpassung des Umfangs der an HiL-Simulationen teilnehmenden Waggonmodelle an die Validierungsanforderungen des Steuerungssystems | |

Dadurch gelingt einerseits die Integration von FMI-Schnittstellen zu Realisierung der Verbindung („Loop“) zwischen der physischen Komponente und ihrer virtuellen Umgebung. Mittels des Feldbusmodells lässt sich andererseits die Komplexität des zu testenden Steuerungssystems an seine Validierungsanforderungen anpassen. Demnach können beliebig viele Steuerungsmodule der weiteren Waggonmodelle durch physische Komponenten ersetzt werden.

5.3 Fazit

Die in diesem Kapitel demonstrierten Funktionalitäten, die durch die Methodik aus Kapitel 4 zur Erstellung von Simulationskonfiguratoren erreicht werden, sind technologieunspezifisch, wie in Bild 81 aufgezeigt ist. Der Simulationskonfigurator für Triebzüge ist eine exemplarische Implementierung. Die Methoden beschreiben hingegen die Integration von mechatronischen Funktionalitäten in ein multiphysikalisches Produktmodell, die allen mechatronischen Produkten zu eigen sind:

- Flexible Produktkonfigurationen
- Feldbusse
- Integration von Steuerungsalgorithmen

Darüber hinaus ist in Kapitel 4 die Anbindbarkeit multiphysikalischer Produktmodelle an die Entwicklungsumgebung beschrieben. Dadurch werden den Modellen zusätzlich entwicklungsunterstützende Funktionalitäten verliehen. Die Erzeugung der Module („Entwurf der Klassen“) und finale die „Komposition“ sind jedoch vom spezifischen physikalischen bzw. informationstechnischen Produktverhalten unabhängig. Es können beliebige Modellgleichungen implementiert werden, die lediglich das Verhalten der Modellmodule während Simulationen beeinflussen. Dies ist durch die Modularisierung des Produkts in Form von Klassen möglich.

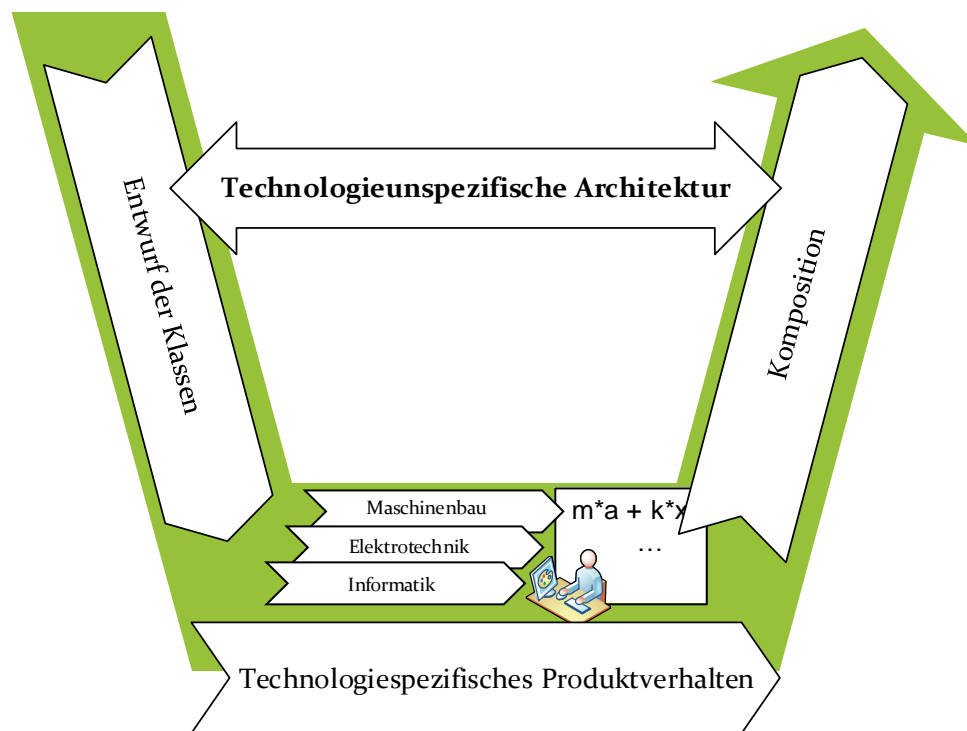


Bild 81: Generalisierung der Modellierungsmethodik aus Kapitel 4 durch unabhängiges Produktverhalten anhand des Modellierungsprozesses aus Unterkapitel 4.6

Aufgrund der Übertragbarkeit der Methodik zur Erstellung von Simulationskonfiguratoren auf weitere mechatronische Produkte lassen sich die in diesem Kapitel identifizierten Anwendungsbereiche zur Verbesserung von PE-Prozessen verallgemeinern. In Bild 82 sind die Funktionalitäten dargestellt, die aus den Methoden aus Kapitel 4 hervorgehen. Durch Anwendung der fünf Methoden der Unterkapitel 4.1 bis 4.5 wird ein ausführbarer Digitaler Zwilling erreicht, der sich an Produktentwürfe oder bestehende Produktvarianten anpassen kann. Mittels der Konnektivität des Feldbusmodells bzw. der Schnittstellen in Form von FMI lassen sich an die Testumgebung anpassbare HiL-Simulationen durchführen. Dadurch und wegen der hohen erreichbaren Komplexität der multiphysikalischen Umgebungsmodelle lassen sich Komponenten zukünftig umfassender validieren.

Die Digitalen Zwillinge erlauben außerdem die Adaption von Produktentwürfen. Diese können in multiphysikalischen Simulationen virtuell geprüft werden, bevor Entwurfsfehler zu Folgefehlern führen können. Neben der Adaption von Entwürfen lassen sich bereits bestehende Produktvarianten abbilden. Somit können Produkteigenschaften virtuell optimiert werden. Im Rahmen dessen können die vorhandenen FMI-Schnittstellen helfen, indem domänenspezifische Modelle in die Simulation eingebunden werden. Dies führt zu feingranularen Modellen, die realitätsnäheres Komponentenverhalten und damit ein genaueres Produktverhalten erzielen können.

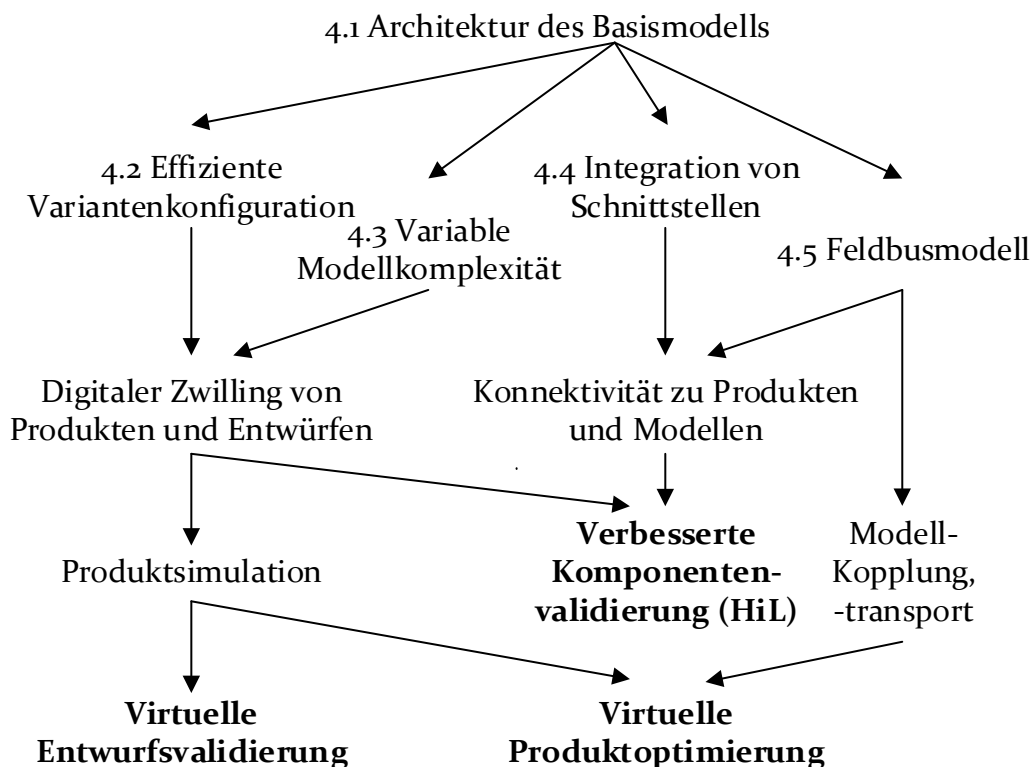


Bild 82: Mehrwert durch Einsatz der Simulationskonfiguratoren in der PE

Die Verbesserungen gegenüber dem Stand der Forschung durch die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Simulationskonfiguratoren sind in Tabelle 25 zusammengefasst. Modellen, die nach bisherigen Methoden erstellt sind, fehlen wichtige Funktionalitäten (linken Spalte), die notwendig sind, um die in Bild 82 dargestellten Potentiale zu erschließen. Diese werden von multiphysikalischer Simulation für die Entwicklung von Produkten nutzbar, wie größtenteils in dieser Arbeit demonstriert ist.

Die funktionalen Mängel bisheriger Modelle können als wesentlicher Grund dafür gesehen werden, dass die Erstellung eines multiphysikalischen Modells in der Regel lediglich durch ein spezifisches Problem motiviert wird. Die zusätzlichen Funktionalitäten (zweite Spalte in Tabelle 25) aufgrund des durch diese Arbeit

erweiterten Stands der Forschung schaffen hingegen Anreize, ein multiphysikalisches Produktmodell entwicklungsbegleitend über mehrere Produktgenerationen einzusetzen. Im Vergleich zu bisher lediglich korrektiven Einsatzzwecken würde der multiphysikalischen Simulation langfristig eine höhere Bedeutung durch eine Vielzahl präventiver Einsatzmöglichkeiten zukommen.

Tabelle 25: Neue Funktionalitäten der durch Simulationskonfiguratoren erzeugbaren, anbindbaren Digitalen Zwillinge

| Stand der Forschung | Neuer Stand durch Simulationskonfiguratoren |
|---|---|
| Eigenes Modell für jedes Produkt | Beliebige Produktvarianten mittels eines gemeinsamen Basismodells |
| Modelle mit konstanter Komplexität | Modelle mit flexibler Komplexität |
| Modellveränderungen für Integration von Schnittstellen | Schnittstellen mittels Modularisierung und Konfiguration eines Basismodells integrierbar |
| Inkompatible multiphysikalische Systemmodelle | Tausch bzw. Kopplung domänenspezifischer Komponentenmodelle mittels FMI |
| Multiphysikalische Systemmodelle als Umgebungsmodelle für HiL-Simulation nicht verwendbar | HiL-Konfiguration des Basismodells |
| Abhängigkeit möglicher HiL-Setups vom Umgebungsmodell der zu testenden Komponente | Erfüllung der Validierungsanforderungen durch Anpassung des Modells an skalierbare HiL-Setups |
| Keine Integration des Steuerverhaltens in multiphysikalische Modelle | Modell der Steuerung integrierbar |

6 Zusammenfassung und Ausblick

Fortgeschrittene mechatronische Produkte und Anlagen zeichnen sich durch eine hohe Individualisierbarkeit bezüglich ihrer Funktionalitäten aus, welche soweit möglich durch Steuerungssoftware umgesetzt werden. Es ereignet sich häufig, dass die elektrischen und mechanischen Komponenten solcher Systeme fehlerhaft entwickelt werden, weil ihr Zusammenspiel nur ganzheitlich getestet werden kann, was während der Entwurfsphase oftmals nicht möglich ist. Insbesondere, wenn mittels ausbaubarer Produktplattformen unterschiedliche Ausbaustufen geschaffen werden sollen, treten oftmals erst nach Abschluss einer Produktentwicklung Inkompatibilitäten zutage, wie am Beispiel von Triebzügen. Der Grund dafür liegt in der mangelnden Vernetzung der verschiedenen Engineering-Domänen solch komplexer Produkte. Indem ein Produkt ganzheitlich mittels multiphysikalischer Simulationswerkzeuge modelliert und simuliert wird, lassen sich die Produktentwürfe jedoch validieren, bevor hohe Folgekosten aufgrund falscher Designentwürfe entstehen. Ein weiterer Ansatz zur Vermeidung solcher Kosten ist, Steuerungssoftware entsprechend früh zu implementieren und ihre Funktionalität in Hardware-in-the-Loop-Simulationen zu überprüfen, bei denen ihre noch nicht physisch zur Verfügung stehende Umgebung in Echtzeit simuliert wird. Dabei hängt die Güte der Ergebnisse von der Modellfunktionalität ab. Je stärker die modellierte Umgebung der Steuerung vereinfacht wird, desto weniger Steuerungsfunktionen lassen sich absichern. Multiphysikalische Modelle lassen sich beispielsweise als solche Umgebungsmodelle einsetzen, um ein möglichst umfassendes Systemverhalten der Steuerungsumgebung abzubilden.

Da multiphysikalische Simulationsmodelle aktuell jedoch nur ein einziges Produkt mit einer unveränderlichen Zusammensetzung der Module und Komponenten sowie mit nur rudimentären Steuerfunktionalitäten abbilden können, lassen sich fortgeschrittene mechatronische Systeme bisweilen nicht effizient modellieren. Insbesondere stellt eine hohe Variantenvielfalt von Produkten die Firmen vor große Herausforderungen. Varianten unterschiedlicher Komplexität, wie z. B. Triebzüge mit verschiedenen Waggonanzahlen, führen zu einem hohen Modifizierungsaufwand bzw. der Notwendigkeit einer Neumodellierung. Außerdem existiert bisweilen keine Methodik, multiphysikalische Simulationsmodelle als Umgebungsmodelle von Komponenten in Hardware-in-the-Loop-Simulationen einzubinden.

Diese Arbeit beinhaltet eine Methodik zur Erstellung von Simulationskonfiguratoren für fortgeschrittene mechatronische Systeme, die auf offen zugänglichen, multiphysikalischen Modellsprachen und Schnittstellen basiert. Die Simulationskonfiguratoren ermöglichen aufgrund ihrer hohen Funktionalität ausführbare Digitale Zwillinge, die durch ihre hohe Flexibilität und Konnektivität vielseitig die Entwicklung neuer Produkte unterstützen können. Ihre Anpassungsfähigkeit

erlaubt die Simulation und dadurch die virtuelle Validierung von Produktentwürfen. Darüber hinaus lassen sich bestehende Produkte zwecks Optimierung ihrer Eigenschaften adaptieren und simulieren. Dabei lässt sich mittels der Schnittstellen feingranulares physikalisches Komponentenverhalten aus domänenspezifischen Modellen miteinbeziehen, wodurch eine hohe Realitätsnähe erreicht werden kann.

Die Simulationskonfiguratoren sind auf ein flexibel konfigurierbares Basismodell gestützt, das modular aufgebaut sowie variabel in seiner Komplexität ist und ein an die variantenspezifische Komplexität angepasstes Feldbusmodell aufweist. Durch die modulare Struktur ist eine Vielzahl von Produktvarianten darstellbar, während das Feldbusmodell ermöglicht, dass sich verschiedenartige Betriebszustände effizient simulieren lassen. Durch diese hohe Funktionalität der Simulationskonfiguratoren können entwurfsbegleitend mögliche Systemfehler effektiv identifiziert und ihre Ursachen rechtzeitig beseitigt werden.

Durch die integrierten Schnittstellen sind die Simulationskonfiguratoren an die Entwicklungsumgebung von Produkten anbindbar. Die Integration von Functional Mock-Up Interface 2.0 auf der einen Seite ermöglicht u. a. die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Steuergeräten. Das Feldbusmodell auf der anderen Seite lässt sich an physische Busse und somit zu testende Steuergeräte anbinden. Auf diese Weise kann ein vollständig virtuelles Umgebungsmodell einschließlich des Modells der informationstechnischen Peripherie eines oder mehrerer Steuergeräte erstellt werden. Die dadurch erreichte Skalierbarkeit eines zu testenden Steuerungssystems kann sich den systemspezifischen Validierungsanforderungen anpassen. Durch Functional Mock-Up Interface 2.0 werden außerdem die Modellübertragung sowie -kopplung zwecks Anbindung an domänenspezifische Simulationswerkzeuge und -modelle ermöglicht. Auf diese Weise gelingt die vielseitige Anbindung der Simulationskonfiguratoren an Entwicklungsumgebungen von Unternehmen.

Zur Validierung des Konzepts wird ein exemplarischer Simulationskonfigurator für Triebzüge präsentiert, mittels dessen längsdynamische Effekte moderner Triebzüge simulierbar sind, die durch verschiedenartige Anregungen verursacht werden. Signalverzögerungen, die Kombination aus pneumatischem und motorischem Bremsen, Trägheitseffekte, aber auch schlechte Schieneneingriffsverhältnisse führen zu Längsschwingungen zwischen den Waggonen. Diese entstehen in den als Feder-Dämpfer-Elemente wirkenden mechanischen Kupplungen zwischen den Waggonen. Die Schwingungen haben negative Auswirkungen auf den Fahrkomfort und die Intensität der mechanischen Belastung der involvierten Bauteile. Die Vielzahl der anregenden Ursachen sowie die große erforderliche Modellkomplexität können mittels des methodisch erstellten Modells erstmals simulativ nachgestellt werden. Die durch das Feldbusmodell erreichten Steuerungsfunktionalitäten erlauben darüber hinaus die Untersuchung und Reduktion von aus dem Steuerungsverhalten resultierenden Betriebskosten. Diese werden

hauptsächlich durch den Energieverbrauch und Verschleiß verursacht, was mittels des Modells simulierbar wird. Per Model-in-the-Loop-Simulation, in der das Modell für Hardware-in-the-Loop-Simulation vorbereitet wird, wird demonstriert, dass sich derartige Modelle als simulationsfähige Umgebung physischer Steuergeräte eignen. In den hierin durchgeführten Studien wird das zugrundeliegende Basismodell an verschiedene Triebzugkonfigurationen angepasst, wodurch die Flexibilität des Modellansatzes demonstriert wird. Da die Prinzipien der Modellierungsmethodik technologieunabhängig sind und lediglich auf der Adaption von mechatronischen Eigenschaften und Schnittstellen basieren, sind sie auf andere fortgeschrittene mechatronische Produkte und Anlagen übertragbar.

Trotz der Funktionalitäten der hierin erarbeiteten Methodik für die Entwicklung mechatronischer Systeme gibt es Erweiterungspotential. Das Konzept beschreibt die methodische Entwicklung Digitaler Zwillinge mit simulierbarem physikalischem Verhalten sowie abgebildetem Steuerungsverhalten und geht dabei bereits von einer vorgegebenen modularen Gliederung aus. Dadurch kann das Konzept erst zu Zeitpunkten in der Entwurfsphase eingesetzt werden, in denen die Architektur bereits feststeht. Zur anfänglichen Fehlervermeidung wäre es jedoch erstrebenswert, die Methodik auf frühere Phasen des Produktentwicklungsprozesses auszudehnen, sodass generische Simulationsmodelle bereits die Funktionsgestaltung des Produkts validierend unterstützen können. Deshalb sollten die zukünftigen Forschungsbemühungen darauf gelenkt werden, den beschriebenen Modellbildungsprozess auf die Frühphasen der Entwurfsphase mechatronischer Produkte ausdehnen. Dadurch gelingen nicht nur die Adaption von Produkten durch parametrisch anpassbare, skalierbare Simulationsmodelle, sondern auch die Modellierung neuartiger Produkte, die Funktionen durch eine andere Architektur umsetzen. Einen Ansatzpunkt bieten offen zugängliche, grafische Modellierungssprachen, wie z. B. SysML, UML etc. Gelingt die Entwicklung einer sowohl mit multiphysikalischer Simulation sowie mit graphischen Modellierungssprachen kompatiblen Datenbasis, können die multiphysikalischen Simulationsmodelle entsprechend weiter generalisiert und flexibel den Produktanforderungen angepasst werden.

Ein weiterer Ansatzpunkt ist die aktuelle Begrenzung der darstellbaren Produktkomplexität durch eine vordefinierte Anzahl von Modulen, die aktuell die Entwicklungsmöglichkeiten einschränken. Deshalb sollte die zukünftige Forschung hinsichtlich stärkerer Modellgeneralisierung auch auf die Erreichung einer unbegrenzten Modellkomplexität gelenkt werden. Dafür können bestehende Funktionen zur Interoperabilität multiphysikalischer Werkzeuge und grafischer Modellierungswerkzeuge verwendet und erweitert werden. Dies kann dahingehend geschehen, dass im grafischen Modellierungswerkzeug abhängig von der funktionalen Systembeschreibung automatisiert eine multiphysikalische Klassendatenbank erzeugt wird. Deren Gliederung, Objektanzahl und Kommunikation der Objekte miteinander ergibt sich aus den durch das grafische Modell

vorgegebenen Funktionalitäten. Durch die vollständig variable Komplexität der multiphysikalischen Simulationsmodelle wird die Innovationsfähigkeit während der frühen Entwurfsphasen weiter gefördert.

7 Summary and outlook

Advanced mechatronic products and systems are characterized by a high degree of customizability with regard to their functionalities, which are implemented as far as possible by using control software. Often the electrical and mechanical components of such systems are incorrectly developed because their interaction can only be tested holistically, which is in many cases not possible during the design phase. Especially when individual expansions are to be created using expandable product platforms, incompatibilities often only become apparent after the product development has been completed, as in the case of trains with distributed traction. The reason for this is the lack of networking between the different engineering domains of such complex products. However, by modeling and simulating a product holistically using multi-physics simulation tools, the product designs can be validated before high subsequent costs are caused by incorrect design drafts. Another way to avoid such costs is to implement control software reasonably early and test its functionality in hardware-in-the-loop simulations in which its not yet physically available environment is simulated in real time. The quality of the results depends on the model functionality. The more the modeled control environment is simplified, the fewer control functions can be verified. Multi-physics models can be used, for example, as such environmental models to depict comprehensive system behavior of the control environment to a high degree.

However, since multi-physics simulation models can currently only represent a single product with an unchanging composition of modules and components as well as rudimentary control functionalities, advanced mechatronic systems cannot be modelled efficiently. In particular, the development of a high variety of products presents companies with great challenges. Variants of heterogeneous complexity, such as trains with distributed traction with different numbers of compartments, lead to high modification costs or the necessity of re-modelling. Furthermore, there is sometimes no methodology to integrate multi-physics simulation models as environment models of components in hardware-in-the-loop simulations.

This work includes a methodology for creating simulation configurators for advanced mechatronic systems based on open-source, multi-physics modelling languages and interfaces. Due to their high functionality, the simulation configurations enable executable Digital Twins, which, due to their high flexibility and connectivity, can support the development of new products in many ways. Their adaptability allows the simulation and thus the virtual validation of product designs. In addition, existing products can be adapted and simulated to optimize their properties. The interfaces allow detailed physical component behavior from domain-specific models to be included, which allows a high degree of realism to be achieved.

The simulation configurators are based on a flexibly configurable basic model, which has a modular structure, a variable complexity and a fieldbus model adapted to the variant-specific complexity. The modular structure allows a large number of product variants to be represented, while the fieldbus model enables various operating states to be simulated efficiently. This high functionality of the simulation configurators allows possible system errors to be effectively identified and the elimination of their causes already during the design process.

The integrated interfaces make the simulation configurators connectable to the development environment of products. The integration of Functional Mock-Up Interface 2.0 on the one hand enables, among other things, hardware-in-the-loop simulation of electronic control units. The fieldbus model on the other hand can be connected to physical buses and thus to electronic control units to be tested. In this way, a fully virtual environment model including the model of the peripheral electronics of one or more electronic control unit can be created. The resulting scalability of a control system to be tested can be adapted to the system-specific validation requirements. Functional Mock-Up Interface 2.0 also enables the model transfer and the coupling for the connection to domain-specific simulation tools and models. In this way, the versatile connection of the simulation configurators to the development environments of companies is ensured.

To validate the concept, an exemplary simulation configurator for trains with distributed traction is presented, which can be used to simulate the longitudinal dynamic effects of modern trains caused by various stimuli. Signal delays, the combination of pneumatic and recuperative braking, inertia effects, but also poor rail engagement conditions lead to longitudinal vibrations between the compartments. The vibrations occur in the mechanical couplers between the compartments acting as spring-damper elements. The vibrations have a negative effect on the driving comfort and the stress within the involved components. The multitude of stimulating causes and the required great complexity of the model can be simulated for the first time using the model approach. The control functionalities achieved by the fieldbus model also allow the investigation and reduction of operating costs resulting from the control behavior. The energy consumption and abrasion account for major shares, which can be simulated using the model. A model-in-the-loop simulation, in which the model is prepared for hardware-in-the-loop simulation, demonstrates that such models are suitable as simulation-capable environments for actual electronic control units. The studies adapt the basic model to different train configurations, demonstrating the flexibility of the Modell approach. Since the principles of the modelling methodology are technology-independent and based solely on the adaptation of mechatronic properties and interfaces, they can be applied to other advanced mechatronic products and systems.

Despite the functionalities of the methodology created for the development of mechatronic systems, there is potential for expansion. The concept describes the methodological development of Digital Twins with executable physical and control models and is already based on a given modular structure. This means that the concept can only be used at times in the design phase when the architecture has already been determined. To avoid errors initially, however, it would be desirable to extend the methodology to earlier phases of the product development process, so that generic simulation models can already support the validation of the product's functional design. Future research efforts should therefore be directed towards extending the modeling described process to the early phases of the design phase of mechatronic products. This not only enables the adaptation of products through parametrically adaptable, scalable simulation models, but also the modelling of novel products that implement functions through a different architecture. Openly accessible graphical modelling languages such as SysML, UML etc. offer a starting point. If the development of a database compatible with both multi-physics simulation and graphical modelling languages succeeds, the multi-physics simulation models can be further generalized and flexibly adapted to the product requirements.

Another concern is the current limitation of the representable product complexity by a predefined number of modules, which currently limit the development flexibility. For this reason, future research into greater model generalization should also be directed towards achieving unlimited model complexity. Existing functions for the interoperability of multi-physics tools and graphical modelling tools can be used and extended for this purpose. This can be done through automatically creating a multi-physics class database by the graphical modeling tool depending on the functional system description. Its structure, number of objects and communication of the objects with each other result from the functionalities specified by the graphical model. The completely variable complexity of the multi-physics simulation models further enhances the ability to innovate during the early design phases.

Literaturverzeichnis

- [1] N. N. *SE Vision 2025* [online]. *Systems Engineering Vision 2025 - A World in Motion*. 2014 [Zugriff am: 4. Juni 2018].
Verfügbar unter: <http://www.incose.org/AboutSE/sevision>
- [2] FISHER, A. Closing the gap between Systems level Modeling and Physical simulation in Model Based Systems Engineering.
In: ESI ITI GMBH, Hg. *17th ITI Symposium*. Dresden: ESI ITI GmbH, 2014
- [3] N. N. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW): Number of electric cars worldwide climbs to 1.3 million [online]. Press release 05/2016, **2016**
[Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: <https://www.zsw-bw.de/en/newsroom/news/news-detail/news/detail/News/number-of-electric-cars-worldwide-climbs-to-13-million.html>
- [4] N. N. *BlackRock Investment Institute: Interpreting Innovation* [online]. *Impact on Productivity, Inflation & Investing*. 2014 [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: <https://www.blackrock.com/corporate/en-international/literature/whitepaper/bii-interpreting-innovation-international-version.pdf>
- [5] KAMP, M., K. FINKENZELLER und P. MATTHEIS.
Siemens unter Zugzwang [online]. Joe Kaesers nächste große Baustelle. Zu hohe Entwicklungskosten. *Wirtschaftswoche*, 24. Juli 2015, **2015**
[Zugriff am: 6. November 2016]. Verfügbar unter:
<http://www.wiwo.de/unternehmen/industrie/siemens-unter-zugzwang-joe-kaesers-naechste-grossbaustelle/12063808.html>
- [6] LINDEMANN, U. *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016. ISBN 978-3-446-44518-5
- [7] EHRENSPIEL, K. und H. MEERKAMM. *Integrierte Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013. ISBN 978-3-446-43548-3
- [8] BERTSCHE, B. und G. LECHNER. *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Ermittlung von Bauteil- und System-*

- Zuverlässigkeiten*. 3., überarb. und erw. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 2004. VDI. ISBN 978-3-540-34996-9
- [9] WITTIG, K.-J. *Qualitätsmanagement in der Praxis. DIN ISO 9000, Lean Production, Total Quality Management : Einführung eines QM-Systems im Unternehmen*. 2., überabr. u. erw. Aufl. Stuttgart: Teubner, 1994. ISBN 978-3-519-16340-4
- [10] Verein Deutscher Ingenieure (VDI). VDI-Richtlinie 2206, *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin: Beuth-Verlag
- [11] DOLL, N. Totes Kapital [online]. 140 fabrikneue Züge stehen sinnlos herum. *Die Welt*, 17. April 2013, 2013 [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: <https://www.welt.de/wirtschaft/article115347729/140-fabrikneue-Zuege-stehen-sinnlos-herum.html>
- [12] KOFRÁNEK, J., M. MATEJÁK, P. PRIVITZER und M. TRIBULA. Causal or acausal modelling: labour for humans or labour for machines. *Proceedings of the Technical Computing Conference 2008*, 2008, 1-16
- [13] KAMPA, A., G. GOŁDA und I. PAPROCKA. Discrete Event Simulation Method as a Tool for Improvement of Manufacturing Systems. *Computers*, 2017, 6(1), 10
- [14] PEREIRA REMELHE, M. Combining Discrete Event Models and Modelica - General Thoughts and a Special Modeling Environment. *Proceedings of the 2nd International Modelica Conference*, 2002, 203-207
- [15] RACZYNSKI, S. *Modeling and Simulation - The Computer Science of Illusion*: Wiley, 2014. ISBN 978-0470030172
- [16] BRUMERCIK, F., E. BRUMERCIKOVA und B. BUKOVA. Mechatronic and Transport System Simulation. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 803, 201-206
- [17] PARYANTO. *Mechatronic simulation approach for the process planning of energy-efficient handling systems*. Bamberg: Meisenbach GmbH Verlag, 2017. Fertigungstechnik - Erlangen. 297. ISBN 3875254244
- [18] FRITZSON, P. Components, Connectors, and Connections. In: P. FRITZSON, Hg. *Principles of Object Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2014, S. 187-266. ISBN 9781118989166

- [19] HEINRICH, G. und K. MAIRON. *Objektorientierte Systemanalyse*. München: Oldenbourg, 2008. Wirtschaftsinformatik kompakt. ISBN 9783486583663
- [20] ABTS, D. Objektorientierte Sprachkonzepte. In: D. ABTS, Hg. *Grundkurs JAVA*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 35-96. ISBN 978-3-658-13806-6
- [21] PROBST, U. *Objektorientiertes Programmieren für Ingenieure. Anwendungen und Beispiele in C++*. München: Hanser, Carl, 2014. ISBN 9783446442344
- [22] BALZERT, H. *Lehrbuch der Objektmodellierung. Analyse und Entwurf mit der UML 2 ; mit CD-ROM und e-learning-Online-Kurs*. 2. Aufl. Heidelberg: Elsevier, Spektrum Akad. Verl., 2005. Lehrbücher der Informatik. ISBN 3-8274-1162-9
- [23] WEILKIENS, T. *Systems engineering mit SysML/UML. Modellierung, Analyse, Design*. 2., aktualisierte u. erw. Aufl. Heidelberg: Dpunkt-Verl., 2008. ISBN 9783898645775
- [24] HIRZINGER, G., J. BALS, M. OTTER und J. STELTER. The DLR-KUKA Success Story [online]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2005, **12**(3), 16-23. ISSN 1070-9932. Verfügbar unter: doi:10.1109/MRA.2005.1511865
- [25] TILLER, M. *Introduction to physical modeling with Modelica*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001. The Kluwer international series in engineering and computer science. SECS 615. ISBN 978-1-4615-1561-6
- [26] PARYANTO, P., M. BROSSOG, M. BORNSCHLEGL und J. FRANKE. Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, **78**(5-8), 1315-1328
- [27] FRITZSON, P., Hg. *Principles of Object Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2014. ISBN 9781118989166
- [28] WINKLER, D. und C. GÜHMANN. Hardware-in-the-Loop simulation of a hybrid electric vehicle using Modelica/Dymola [online]. *The 22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle*

- Symposium & Exposition*, 1054-1063.
Verfügbar unter: <http://www.iea.tu-berlin.de/uploads/media/EVS22>
- [29] GLÖCKLER, M. Simulation als Teil moderner Entwicklungsprozesse. In: M. GLÖCKLER, Hg. *Simulation mechatronischer Systeme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 239-249. ISBN 978-3-658-05383-3
- [30] BLOCHWITZ, T. und T. BEUTLICH. Real-Time Simulation of Modelica-based Models. In: *The 7 International Modelica Conference, Como, Italy*: Linköping University Electronic Press, 2009, S. 386-392
- [31] *Internetauftritt des FMI-Standards* [online] [Zugriff am: 24. Februar 2018]. Verfügbar unter: <http://fmi-standard.org>
- [32] CHOMBART, P. *Multidisciplinary modelling and simulation speeds development of automotive systems and software* [online]. *ITEA2 innovation report, 2012, 2012* [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: <https://itea3.org/project/modelisar.html>
- [33] N. N. *Internetauftritt der dSpace GmbH* [online]. *FMI-Unterstützung der Produkte*, 2018 [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: https://www.dspace.com/en/pub/home/products/hw/simulator_hardware/scalexio/scalexio_fmi.cfm
- [34] BLOCHWITZ, T., M. OTTER, M. ARNOLD, C. BAUSCH, H. ELMQVIST, A. JUNGHANN, J. MAUß, M. MONTEIRO, T. NEIDHOLD, D. NEUMERKEL, H. OLLSON, J.-V. PEETZ, S. WOLF und C. CLAUß. The Functional Mockup Interface for Tool independent Exchange of Simulation Models. In: C. CLAUß, Hg. *Proceedings of the 8th International Modelica Conference, March 20th-22nd, Technical University, Dresden, Germany*. Linköping: University Electronic Press, 2011, S. 105-114. ISBN 978-91-7393-096-3
- [35] ELSHEIKH, A., M.U. AWAI, E. WIDL und P. PALENSKY. Modelica-enabled rapid prototyping of cyber-physical energy systems via the functional mockup interface. In: *2013 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES)*, S. 1-6
- [36] BASTIAN, J., C. CLAUß, S. WOLF und P. SCHNEIDER. Master for Co-Simulation Using FMI. In: *The 8th International Modelica Conference*,

- Technical Univeristy, Dresden, Germany: Linköping University Electronic Press, 2011, S. 115-120
- [37] N. N. *Functional Mock-up Interface for Model Exchange and Co-Simulation* [online]. *Definition and User Manual*, 2014 [Zugriff am: 4. Juni 2018].
Verfügbar unter: https://svn.modelica.org/fmi/branches/public/specifications/v2.o/FMI_for_ModelExchange_and_CoSimulation_v2.o.pdf
- [38] RABITI, C., H.E. GARCIA, R. HOVSAPIAN, R. KINOSHITA, G.L. MESINA, S.M. BRAGG-SITTON und R.D. BOARDMAN. *Strategy and gaps for modeling, simulation, and control of hybrid systems*. Idaho Falls, 2015
- [39] TRČKA, M., J.L.M. HENSEN und M. WETTER. Co-simulation of innovative integrated HVAC systems in buildings. *Journal of Building Performance Simulation*, 2009, 2(3), 209-230
- [40] SCHLÜTER, W., M. HENNINGER, A. BUSWELL und J. SCHMIDT. Schwachstellenanalyse und Prozessverbesserung in Nichteisen-Schmelz- und Druckgussbetrieben durch bidirektionale Kopplung eines Materialflussmodells mit einem Energiemodell. In: S. WENZEL und T. PETER, Hg. *Simulation in Produktion und Logistik 2017*. Kassel, Hess: Kassel University Press, 2017, S. 19-28. ISBN 978-3-7376-0192-4
- [41] HOPPEN, M., M. SCHLUSE, J. ROßMANN und B. WEITZIG. Database-driven distributed 3D simulation. In: *Proceedings Title: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*: IEEE, 2012, S. 1-12. ISBN 978-1-4673-4782-2
- [42] BOCCIARELLI, P., A. D'AMBROGIO, A. FALCONE, a. GARRO und GIGLIO. A. A Model-Driven Approach to Enable the Distributed Simulation of Complex Systems. In: G. AUVRAY, J.-C. BOCQUET, E. BONJOUR und D. KROB, Hg. *Complex Systems Design & Management*. Cham: Springer International Publishing, 2016, S. 171-183. ISBN 978-3-319-26107-2
- [43] NOVÁK, P., P. KADERA, V. JIRKOVSKÝ, P. VRBA und S. BIFFL. Engineering of Coupled Simulation Models for Mechatronic Systems. In: T. BORANGIU, A. THOMAS und D. TRENTESAUX, Hg. *Service Orientation*

- in Holonic and Multi-agent Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing, 2015, S. 3-11. ISBN 978-3-319-15158-8
- [44] BONDAR, S., C. RUPPERT und J. STJEPANDIC. Securing Data Quality along the Supply Chain. In: A. BERNARD, L. RIVEST und D. DUTTA, Hg. *Product Lifecycle Management for Society*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 702-711. ISBN 978-3-642-41500-5
- [45] GAUSEMEIER, J., R. DUMITRESCU, D. STEFFEN, A. CZAJA, O. WIEDERKEHR und C. TSCHIRNER. *Systems Engineering in industrial practice* [online], 2015 [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: https://www.hni.uni-paderborn.de/fileadmin/Fachgruppen/Seniorprofessur_Gausemeier/systemsengineerings/20150706_SE-Studie_enGB_Einzelseiten.pdf
- [46] FRIEDENTHAL, S., R. GRIEGO und M. SAMPSON. INCOSE Model Based Systems Engineering (MBSE) Initiative. In: INCOSE COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING, Hg. *INCOSE International Symposium 2007*. San Diego, CA, 2007
- [47] BRÖHL, A.-P. *Das V-Modell. Der Standard für die Softwareentwicklung mit Praxisleitfaden*. 2. Aufl. München: Oldenbourg, 1995. Software - Anwendungsentwicklung - Informationssysteme. ISBN 3486222074
- [48] RUSSWURM, S. Software. Die Zukunft der Industrie. In: U. SENDLER, Hg. *Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 21-36. ISBN 978-3-642-36916-2
- [49] DUMITRESCU, R. *Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme*. Dissertation. Paderborn, 2010
- [50] GAUSEMEIER, J., D. STEFFEN, J. DONOTH und S. KAHL. Conceptual design of modularized advanced mechatronic systems. In: *Proceedings of ICED'09*. Glasgow: Design Society, 2009 ;, S. 263-274. ISBN 978-1-904670-08-7
- [51] SALEHI, V., L. BURSEG, K. PAETZOLD, A. CHAHIN, J. TAHA und T. RIEGER. Integration of Systems Engineering Approach in Product-Lifecycle-Management by Means of a Mechatronic System. In: G. FANMUY, E. GOUBAULT, D. KROB und F. STEPHAN, Hg. *Complex*

- Systems Design & Management*. Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 231-232. ISBN 978-3-319-49102-8
- [52] WU, Q., M. SPIRYAGIN und C. COLE. Longitudinal train dynamics. An overview. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR VEHICLE SYSTEM DYNAMICS, Hg. *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 12. Auflage: Taylor & Francis, 2016, S. 1688-1714
- [53] GÖTZ, H., T. JÄGER, H.-G. LANGER und H. FISCHER. Modellzentrisches System- und Testengineering mit maximaler Testautomatisierung im Labor für große mechatronische Systeme. In: S.-O. SCHULZE und C. MUGGEO, Hg. *Tag des Systems Engineering*. Ulm, 11.-13. November 2015. München: Hanser, 2015, S. 419-428. ISBN 978-3-446-44728-8
- [54] STÜMPFLE, M. und H. KOHLER. Die Konnektivität als Kernmerkmal von Premium-Fahrzeugen. In: U. SENDLER, Hg. *Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 125-144. ISBN 978-3-642-36916-2
- [55] SENDLER, U. Industrie 4.0 – Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM (Systems Lifecycle Management). In: U. SENDLER, Hg. *Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 1-19. ISBN 978-3-642-36916-2
- [56] N. N. *Kompetenzen für Industrie 4.0* [online]. *Qualifizierungsbedarfe und Lösungsansätze*, 2016 [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Stellungnahmen/161202_POS_Kompetenz_Industrie40_Web.pdf
- [57] WEBER, J., D. FÖRSTER, J. KÖßLER und K. PAETZOLD. Design of Changeable Production Units within the Automotive Sector with Axiomatic Design [online]. *Procedia CIRP*, 2015, 34, 93-97. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2015.07.006
- [58] HEHENBERGER, P., B. VOGEL-HEUSER, D. BRADLEY, B. EYNARD, T. TOMIYAMA und S. ACHICHE. Design, modelling, simulation and integration of cyber physical systems. Methods and applications. In:

- UNIVERSITY OF GRONINGEN, Hg. *Computers in Industry*. Groningen, 2016, S. 273-289
- [59] MONOSTORI, L., B. KÁDÁR, T. BAUERNHANS, S. KONDOH, S. KUMARA, G. REINHART, O. SAUER, G. SCHUH, W. SIHN und K. UEDA. Cyber-physical systems in manufacturing. In: INTERNATIONAL ACADEMY FOR PRODUCTION ENGINEERING, Hg. *CIRP Annals. Manufacturing Technology*. 2. Auflage: Hallwag, 2016, S. 621-641
- [60] WESTERMANN, T., H. ANACKER, R. DUMITRESCU und A. CZAJA. Reference architecture and maturity levels for cyber-physical systems in the mechanical engineering industry. In: *2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, S. 1-6
- [61] GAUSEMEIER, J., F.J. RAMMIG, W. SCHÄFER und W. SEXTRO. *Dependability of Self-Optimizing Mechatronic Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. ISBN 978-3-642-53741-7
- [62] BETTENHAUSEN, K.D. und S. KOWALEWSKI. *Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus der Sicht der Automation* [online]. *Thesen und Handlungsfelder*, 2013 [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: https://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme_Cyber-Physical_Systems.pdf
- [63] N. N. *Zukunftsprojekt Industrie 4.0* [online]. *Digitale Wirtschaft und Gesellschaft*, 2017 [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: <https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html>
- [64] N. N. *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0* [online]. *Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern*. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, 2013 [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_o.pdf
- [65] GAUSEMEIER, J., A.M. CZAJA und C. DÜLME. Innovationspotentiale auf dem Weg zu Industrie 4.0. In: *Wissenschafts- und Industrieforum Intelligente Technische Systeme 2015 10. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme*: Heinz Nixdorf Institut, 2015
- [66] HOFMANN, M., S. FRANZ, M. MANJURUL ISLAM und B. JACOBSON. Echtzeitfähige Schnittstelle zur Steuerung einer lenkbaren

- Zwischenarchse in Lang-LkW. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Wiesbaden 2017, **119**(6), 70-75
- [67] KOCH, O., S. RICHTER und J. WEBER. Process-Efficient Real-Time Simulation to Test the Functionality of Drive and Control Systems. In: ESI ITI GMBH, Hg. *17th ITI Symposium*. Dresden: ESI ITI GmbH, 2014, S. 346-353
- [68] SJÖSTEDT, C.-J. *Modeling and simulation of physical systems in a mechatronic context*. Dissertation. Stockholm: Skolan för industriell teknik och management, Kungliga Tekniska högskolan, 2009. Trita-MMK. 2009:12. ISBN 978-91-7415-361-3
- [69] LEFÈVRE, J., S. CHARLES, M.B. MAUCHAND, B. EYNARD und É. PADIOLLEAU. Multidisciplinary modelling and simulation for mechatronic design. In: *Journal of Design Research*, 2014, S. 127
- [70] FELDMAN, Y.A., L. GREENBERG und E. PALACHI. Simulating Rhapsody SysML Blocks in Hybrid Models with FMI. In: *the 10th International Modelica Conference, March 10-12, 2014, Lund, Sweden*: Linköping University Electronic Press, 2014, S. 43-52
- [71] JOHNSON, T., A. KERZHNER, C.J.J. PAREDIS und R. BURKHART. Integrating Models and Simulations of Continuous Dynamics Into SysML. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2012, **12**(1), 135-145
- [72] HAMMADI, M., J.-Y. CHOLEY, O. PENAS und A. RIVIERE. Multidisciplinary approach for modelling and optimization of Road Electric Vehicles in conceptual design level. In: *2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*: IEEE, 2012, S. 1-6. ISBN 978-1-4673-1372-8
- [73] PALACHI, E., C. COHEN und S. TAKASHI. Simulation of cyber physical models using SysML and numerical solvers. In: *2013 7th Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*, S. 671-675
- [74] SCHAMAI, W., P. FRITZSON, C. PAREDIS und A. POP. Towards Unified System Modeling and Simulation with ModelicaML: Modeling of Executable Behavior Using Graphical Notations. In: F. CASELLA, Hg. *Proceedings of the 7th International Modelica Conference. Como, Italy*,

- 20-22 September 2009. Linköping: Linköping University Electronic Press, 2009, S. 612-621. ISBN 978-91-7393-513-5
- [75] POP, A., D. AKHVLEDIANI und P. FRITZSON. Towards Unified System Modeling with the ModelicaML UML Profile. In: *In Proceedings of the 1st International Workshop on Equation-Based Object-Oriented Languages and Tools. EOOLT'07*, 2007, S. 13-24
- [76] PEAK, R.S., R.M. BURKHART, S.A. FRIEDENTHAL, M.W. WILSON, M. BAJAJ und I. KIM. 9.3.2 Simulation-Based Design Using SysML Part 1. A Parametrics Primer. *INCOSE International Symposium*, 2007, **17**(1), 1516-1535
- [77] PEAK, R.S., R.M. BURKHART, S.A. FRIEDENTHAL, M.W. WILSON, M. BAJAJ und I. KIM. 9.3.3 Simulation-Based Design Using SysML Part 2. Celebrating Diversity by Example. *INCOSE International Symposium*, 2007, **17**(1), 1536-1557
- [78] KLEINER, S. und C. KRAMER. Model Based Design with Systems Engineering Based on RFLP Using V6. In: M. ABRAMOVICI und R. STARK, Hg. *Smart Product Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 93-102. ISBN 978-3-642-30816-1
- [79] CAPASSO, C., M. HAMMADI, S. PATALANO, R. RENAUD und O. VENERI. RFLP Approach in the Designing of Power-Trains for Road Electric Vehicles. In: M. HADDAR, M.S. ABBES, J.-Y. CHOLEY, T. BOUKHAROUBA, T. ELNADY, A. KANAEV, M. BEN AMAR und F. CHAARI, Hg. *Multiphysics Modelling and Simulation for Systems Design and Monitoring*. Cham: Springer International Publishing, 2015, S. 249-258. ISBN 978-3-319-14531-0
- [80] BEIER, G., U. ROTHENBURG, R. WOLL und R. STARK. *Modellbasiertes Systems Engineering - Durchgängige Entwicklung mit erlebbaren Prototypen* [online], 2012 [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-2293670.pdf
- [81] POPOVICI, K. und P.J. MOSTERMAN. *Real-time simulation technologies. Principles, methodologies, and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013. Computational analysis, synthesis, and design of dynamic systems series. ISBN 1439846650

- [82] FRITZSON, P. *Introduction to modeling and simulation of technical and physical systems with Modelica*. Hoboken, N.J: Wiley, 2011.
ISBN 978-1-118-01068-6
- [83] URBAN, R., M. SCHOLZEL, H.T. VIERHAUS, E. ALTMANN und H. SEELIG. Compiler-Centred Microprocessor Design (CoMet) - From C-Code to a VHDL Model of an ASIP. In: *2015 IEEE 18th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems*: IEEE, 2015, S. 17-22. ISBN 978-1-4799-6779-7
- [84] JUNJIE, T., Z. JIANJUN, D. JIANWAN, C. LIPING, X. GANG, G. BIN und Y. MENGFEI. Cyber-physical systems modeling method based on Modelica. In: *2012 IEEE Sixth International Conference on Software Security and Reliability Companion*: IEEE, 2012, S. 188-191.
ISBN 978-1-4673-2670-4
- [85] DERLER, P., E.A. LEE und A.S. VINCENTELLI. Modeling Cyber-Physical Systems. *Proceedings of the IEEE*, 2012, **100**(1), 13-28
- [86] LEFÈVRE, J., S. CHARLES, M. BOSCH, B. EYNARD und M. HENNER. Multidisciplinary Simulation of Mechatronic Components in Severe Environments. In: M. AIGUIER, F. BRETAUDEAU und D. KROB, Hg. *Complex Systems Design & Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, S. 295-304. ISBN 978-3-642-15653-3
- [87] VANFRETTI, L., T. BOGODOROVA und M. BAUDETTE. Power system model identification exploiting the Modelica language and FMI technologies. In: *2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*: IEEE, 2014, S. 127-132.
ISBN 978-1-4799-2266-6
- [88] SUN, Y., S. VOGEL und H. STEUER. Combining Advantages of Specialized Simulation Tools and Modelica Models using Functional Mock-up Interface (FMI). In: C. CLAUß, Hg. *Proceedings of the 8th International Modelica Conference, March 20th-22nd, Technical University, Dresden, Germany*. Linköping: University Electronic Press, 2011, S. 491-494. ISBN 978-91-7393-096-3

- [89] ARMSTRONG, D.J. The quarks of object-oriented development. In: *Communications of the ACM - Next-generation cyber forensics*. 2. Auflage. New York, NY, 2006, S. 123-128
- [90] N. N. *Modelica - A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling: Language Specification* [online]. Version 3.3 Revision 1, 2014 [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: <https://modelica.org/documents/ModelicaSpec33Revision1.pdf>
- [91] POHLMANN, U. und R. WAGNER. Einsatz des FMI/FMU-Standards zur frühzeitigen Simulation von Software- und Hardwaremodellen komplexer mechatronischer Systeme. In: M. MAURER und S.-O. SCHULZE, Hg. *Tag des Systems Engineering*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013, S. 229-238. ISBN 978-3-446-43435-6
- [92] PAZOLD, M., S. BURHENNE, J. RADON, S. HERKEL und F. ANTRETTER. Integration of Modelica models into an existing simulation software using FMI for Co-Simulation. In: : Linköping University Electronic Press, 2012, S. 949-954
- [93] ISEKI, H. An approximate deformation analysis and FEM analysis for the incremental bulging of sheet metal using a spherical roller. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, **111**(1-3), 150-154
- [94] FRANKE, J., A. KÜHL und N.A.A. MARTIN. Thermische Simulation von Werkzeugmaschinen zur Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit. In: G. ZÜLCH und P. STOCK, Hg. *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010 = *Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel*. Karlsruhe: KIT Scientific Publ, 2010, S. 237-244. ISBN 9783866445581
- [95] BJERKAN, E. und H.K. HØIDALEN. High frequency FEM-based power transformer modeling. Investigation of internal stresses due to network-initiated overvoltages. *Electric Power Systems Research*, 2007, **77**(11), 1483-1489
- [96] BRELA, M. und H.-J. GEBHARDT. Numerical Analysis of the Manufacturing Impact on Magnetic Stray Fields at Electromagnetic Actuators. *Advanced Materials Research*, 2013, **769**, 27-33

- [97] DEL COZ DÍAZ, J.J., P.J. GARCÍA NIETO, J.L. SUÁREZ SIERRA und I. PEÑUELAS SÁNCHEZ. Non-linear thermal optimization and design improvement of a new internal light concrete multi-holed brick walls by FEM. *Applied Thermal Engineering*, 2008, **28**(8-9), 1090-1100
- [98] PRAß, J., A. RENZ, J. WEBER, S. BECKER und J. FRANKE. Numerical Investigation of a Friction Ventilator for Different Geometrical Setups. *Advanced Engineering Forum*, 2016, **19**, 35-42
- [99] FRITZSON, P., B. BACHMANN, B. MATTSSON-KIHLSTRÖM, F. CASELLA und A. LEVA. Modelica open library for power plant simulation: design and experimental validation. In: MODELICA ASSOCIATION, Hg. *Proceedings of Modelica the 3rd International Modelica Conference*. Linköping, 2003, S. 41-50
- [100] KUNZE, G., A. KATTERFELD und T. GRÜNING. Simulation maschineller Erdbauprozesse. In: F. KRAUSE, Hg. *Aktuelle Fragestellung und Lösungen / Fachtagung Schüttgutförderertechnik 2010. Am 7. und 8. Oktober 2010 in Garching, Technische Universität München*. Garching: Techn. Univ. München, Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, 2010. ISBN 978-3-94170-214-1
- [101] ANDERSSON, H., P. NORDIN, T. BORRVAL, K. SIMONSSON, D. HILDING, M. SCHILL, P. KRUS und D. LEIDERMARK. A co-simulation method for system-level simulation of fluid-structure couplings in hydraulic percussion units. *Engineering with Computers*, 2017, **33**(2), 317-333
- [102] NOLL, C., T. BLOCHWITZ, T. NEIDHOLD und C. KEHRER. Implementation of Modelisar Functional Mock-up Interfaces in SimulationX. In: C. CLAUß, Hg. *Proceedings of the 8th International Modelica Conference, March 20th-22nd, Technical University, Dresden, Germany*. Linköping: University Electronic Press, 2011, S. 339-343. ISBN 978-91-7393-096-3
- [103] BRAUN, A. *Modellbasierte Unterstützung der Produktentwicklung - Potentiale der Modellierung von Produktentstehungsprozessen am Beispiel des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM)*. Karlsruhe: Institut für Produktentwicklung (IPEK), 2013. Forschungsberichte. 72

- [104] BUCS, R.L., L.G. MURILLO, E. KOROTCENKO, G. DUGGE, R. LEUPERS, G. ASCHEID, A. ROPERS, M. WEDLER und A. HOFFMANN. Virtual hardware-in-the-loop co-simulation for multi-domain automotive systems via the functional mock-up interface. In: *2015 Forum on Specification and Design Languages (FDL)*, S. 1-8
- [105] KAIN, S., F. SCHILLER und S. DOMINK. Methodology for Reusing Real-time HiL Simulation Models in the Commissioning and Operation Phase of Industrial Production Plants. In: G.R. NAIK, Hg. *Intelligent Mechatronics: InTech*, 2011. ISBN 978-953-307-300-2
- [106] HONG, L.S., Z.S. SA und J. YAN. Environment Factors Monitoring System Based on CAN bus. *International Journal of Online Engineering (ijOE)*, 2016, **12**(05), 9
- [107] NULL, L. und J. LOBUR. *The essentials of computer organization and architecture*. 3rd ed. ; international ed. Sudbury, Mass: Jones & Bartlett Learning, 2012. ISBN 978-1449600068
- [108] DEMPSEY, M., M. GÄFVERT, P. HARMAN, C. KRAL, M. OTTER und P. TREFFINGER. Coordinated automotive libraries for vehicle system modelling. In: *5th International Modelica Conference. Conference Proceedings*. Wien, 2006, S. 33-41
- [109] SCHWEIGER, C., M. OTTER und G. CIMANDER. Objektorientierte Modellierung mit Modelica zur Echtzeitsimulation und Optimierung von Antriebssträngen. In: *Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren: Verein Deutscher Ingenieure*, 2004, S. 639-650. ISBN 3-18-091828-4
- [110] OTTER, M. und C. SCHWEIGER. Modellierung mechatronischer Systeme mit Modelica. In: *Mechatronischer Systementwurf. Methoden, Werkzeuge, Erfahrungen, Anwendungen ; Tagung Darmstadt, 22. und 23. Juni 2004*. Düsseldorf: VDI-Verl., 2004, S. 39-50. ISBN 3-18-091842-X
- [111] FORSBERG, K. und H. MOOZ. The Relationship of System Engineering to the Project Cycle. *INCOSE International Symposium*, 1991, **1**(1), 57-65
- [112] IWNICKI, S. *Handbook of railway vehicle dynamics*. London: Taylor & Francis, 2006. ISBN 0849333210

- [113] EVANS, J. und M. BERG. Challenges in simulation of rail vehicle dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 2009, **47**(8), 1023-1048
- [114] SUN, Y.Q. und M. DHANASEKAR. A dynamic model for the vertical interaction of the rail track and wagon system. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, **39**(5), 1337-1359
- [115] JANICKI, J. und H. REINHARD. *Schienenfahrzeugtechnik*. 2., überarb. und erw. Aufl. Heidelberg: Bahn-Fachverl., 2008. DB-Fachbuch. ISBN 978-3-9808002-5-9
- [116] MEINDERS, T. *DFG-Zwischenbericht ZB-116 - Einfluß des Rad-Schiene-Kontaks auf Dynamik und Verschleiß eines Radsatzes*. Bonn, 1999
- [117] CHOU, M., X. XIA und C. KAYSER. Modelling and model validation of heavy-haul trains equipped with electronically controlled pneumatic brake systems. *Control Engineering Practice*, 2007, **15**(4), 501-509
- [118] LING, L. und X.-s. JIN. A 3D model for coupling dynamics analysis of high-speed train/track system. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2014, **15**, 964-983
- [119] NASR, A. und S. MOHAMMADI. The effects of train brake delay time on in-train forces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2010, **224**(6), 523-534
- [120] COLE, C., M. SPIRYAGIN, Y. QUAN und M. MCCLANACHAN. A study of the starting dynamics in heavy haul trains. In: W. ZHANG und M. GONG, Hg. *Proceedings of the 23rd IAVSD symposium*, 2014
- [121] COLE, C., M. SPIRYAGIN, Q. WU und Y.Q. SUN. Modelling, simulation and applications of longitudinal train dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 2017, **55**(10), 1498-1571
- [122] ANDERSEN, D.R., G.F. BOOTH, A.R. VITHANI, S.P. SINGH, A. PRABHAKARAN, M.F. STEWART und S.K. PUNWANI. Train Energy and Dynamics Simulator (TEDS): A State-of-the-Art Longitudinal Train Dynamics Simulator. In: *ASME 2012 Rail Transportation Division Fall Technical Conference*, Tuesday 16. Oktober 2012, S. 57

- [123] ALLOTTA, B., L. CHISCI, P. D'ADAMIO, S. PAPINI und L. PUGI. Design of an Automatic Train Operation (ATO) system based on CBTC for the management of driverless suburban railways. In: *12th IMEKO TC 10 Workshop on Technical Diagnostics. New Perspectives in Measurement, Tools and Techniques for Industrial Applications*. Florenz: Universität Florenz, 2013, S. 84-89
- [124] FRILLI, A., E. MELI, D. NOCCIOLINI, L. PUGI und A. RINDI. Object oriented simulation of longitudinal train dynamics efficient tools to optimize sustainability and efficiency of railway systems. In: *2015 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, S. 1-6
- [125] DURALI, M. und B. SHADMEHRI. Nonlinear Analysis of Train Derailment in Severe Braking. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2003, **125**(1), 48
- [126] WU, Q., S. LUO und C. COLE. Longitudinal dynamics and energy analysis for heavy haul trains. *Journal of Modern Transportation*, 2014, **22**(3), 127-136
- [127] LIU, R. und I.M. GOLOVITCHER. Energy-efficient operation of rail vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2003, **37**(10), 917-932
- [128] LU, S., S. HILLMANSEN, T.K. HO und C. ROBERTS. Single-Train Trajectory Optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, **14**(2), 743-750
- [129] MIYATAKE, M. und H. KO. Optimization of Train Speed Profile for Minimum Energy Consumption. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2010, **5**(3), 263-269
- [130] LANGEHEINECKE, K., P. JANY, G. THIELEKE, K. LANGEHEINECKE und A. KAUFMANN. *Thermodynamik für Ingenieure. Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium*. 9., überarb. u. erw. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. ISBN 978-3-658-03168-8
- [131] IHME, J. *Schienenfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-658-13540-9

- [132] SCHWELLER, M., B. HAGENAH, M. LÖRTSCHER, O. WÜEST und R. MATTHES. *Aerodynamische Bedingungen im einspurigen Lötschberg-Basistunnel* [online], 2007 [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: http://www.hbi.ch/fileadmin/downloads/pdf/publikationen/15_Aerodyn-Bedingungen-im-LBT_Fachzeitschrift-Elektr-Bahnen-2007.pdf
- [133] POLACH, O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit. In: *Wear*. 7-8, 2005, S. 992-1000
- [134] Eisenbahn-Bundesamt. Zulassungsanforderung B 007, *Ergänzungsregelung zur "Kraftschlussausnutzung"*. Bonn
- [135] Internationaler Eisenbahnverband (UIC). 544-1, *UIC guideline: Brake - Braking Power*. Paris
- [136] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. *DIN EN 61375-1:2015-02. Elektronische Betriebsmittel für Bahnen - Zug-Kommunikations-Netzwerk - Teil 1: TCN - Zug-Kommunikations-Netzwerk Allgemeiner Aufbau*. Berlin: Beuth-Verlag
- [137] KIRRMANN, H. und P.A. ZUBER. The IEC/IEEE train communication network. *IEEE Micro*, 2001, **21**(2), 81-92
- [138] HAGENLOCHER, S. *Automatische Kupplungssysteme im Schienengüterverkehr - eine Übersicht* [online], 2015. 4 Juni 2018, 12:00. Verfügbar unter: <http://www.innovative-freight-wagon.de/wp-content/uploads/TIS-uebersicht-Kupplungssysteme.pdf>
- [139] PEPLINSKI, M. *Optimierung und Risikominimierung in der Schienenfahrzeuglängsdynamik*. Bachelorarbeit. Düsseldorf, Juni 2013
- [140] STEIMEL, A. *Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung. Grundlagen und Praxis*. 2., überarbeitete Auflage. München: Oldenbourg Industieverlag, 2006, 2006. ISBN 9783835633094
- [141] GOODALL, R. Tilting trains and beyond - the future for active railway suspensions. Part 1. Improving passenger comfort. *Computing & Control Engineering Journal*, 1999, **10**(4), 153-160
- [142] ZELLER, P. *Handbuch Fahrzeugakustik. Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch*. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. *Automobiltechnische Zeitschrift/MTZ-Fachbuch*. ISBN 978-3-8348-1443-2

- [143] JÄGER, H., R. MASTEL und M. KNAEBEL. *Technische Schwingungslehre. Grundlagen - Modellbildung - Anwendungen*. 9., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-658-13792-2
- [144] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. *DIN 1311-2:2002-08. Schwingungen und schwingungsfähige Systeme - Teil 2: Lineare, zeitinvariante schwingungsfähige Systeme mit einem Freiheitsgrad*. Berlin: Beuth-Verlag, 2002
- [145] KELLNER, A., P. HEHENBERGER, L. WEINGARTNER und M. FRIEDL. Design and use of system models in mechatronic system design. In: *2015 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*: IEEE, 2015, S. 142-149. ISBN 978-1-4799-1920-8
- [146] KLOAS, M. *Eine Entwicklungsumgebung zur Unterstützung der Simulation energietechnischer Anlagen*. München: Oldenbourg, 1997. GMD-Bericht. 288. ISBN 3-486-24636-4
- [147] AUGENSTEIN, A. *Rechnergestützte Analyse und Konzeption industrieller Energiesysteme. Dissertation*. Aachen, 2009
- [148] DORMIDO, S., G. FARIAS, J. SANCHEZ und F. ESQUEMBRE. Adding interactivity to existing Simulink models using Easy Java Simulations. In: *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*: IEEE, 2005, S. 4163-4168. ISBN 0-7803-9567-0
- [149] HINDMARSH, A.C. und S. RADU. *User Documentation for ARKode v1.1.0 (SUNDIALS v2.7.0)* [online], 2017 [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: https://computation.llnl.gov/sites/default/files/public/ark_guide_o.pdf
- [150] GROOTHUIS, M. *Distributed HiL simulation for Boderc* [online], 2004 [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: <https://www.ram.ewi.utwente.nl/aigaion/attachments/single/1098>
- [151] RABE, M., S. SPIECKERMANN und S. WENZEL. *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin: Springer, 2008. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-35282-2

- [152] BOEHM, B.W. A spiral model of software development and enhancement [online]. *Computer*, 1988, **21**(5), 61-72. ISSN 0018-9162. Verfügbar unter: doi:10.1109/2.59
- [153] N. N. Übung: Antriebstechnik und Fahrzeugkomponenten [online] [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: http://www.landschaftsoekonomie.tu-berlin.de/fileadmin/a3533/uploads/UE_NwB1/Antriebstechnik_und_Fahrzeugkomponenten.pdf
- [154] N. N. Kosten der ICE-Züge der Deutschen Bahn AG nach ICE-Generation [online]. *Handelsblatt*, 23. November 2012, S. 6 [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/256324/umfrage/kosten-der-ice-zuege-der-db-ag/>
- [155] ZHAI, W. und X. SUN. A Detailed Model for Investigating Vertical Interaction between Railway Vehicle and Track. *Vehicle System Dynamics*, 1994, **23**(sup1), 603-615
- [156] FATHY, H.K., Z.S. FILIPI, J. HAGENA und J.L. STEIN. Review of hardware-in-the-loop simulation and its prospects in the automotive area. In: K. SCHUM und A.F. SISTI, Hg.: SPIE, 2006, 62280E
- [157] MICHALEK, D., C. GEHSAT, R. TRAPP und T. BERTRAM. Hardware-in-the-loop-simulation of a vehicle climate controller with a combined HVAC and passenger compartment model. In: *Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*: IEEE, 2005, S. 1065-1070. ISBN 0-7803-9047-4
- [158] BAUM, H. A HWPB Program Gateway into Model-Based Design of Mechatronic Systems [online], 2011 [Zugriff am: 4. Juni 2018]. Verfügbar unter: <https://de.slideshare.net/AltairHTC/hwpa-program-gateway-into-modelbased-design-of-mechatronic-systems>
- [159] ISERMANN, R., J. SCHAFFNIT und S. SINSEL. Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems. *Control Engineering Practice*, 1999, **7**(5), 643-653
- [160] MIEGLER, M. und M. RITZER. Intelligente HiL-Prüfstände im Entwicklungsprozess. *ATZechnik*, 2015, **10**(6), 48-53

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] MEINEL, D., P. PARYANTO und J. FRANKE. Methodology Towards Computer-aided Testing of Complex Mechatronic Systems. A Case Study About Assembling a Train System. *Procedia CIRP*, 2016, **41**, 247-251
- [P2] MEINEL, D., A. BICKERT und J. FRANKE. A simulative analysis of vibrations among trains. In: ESI ITI GMBH, Hg. *Conference Proceedings of the ESI SimulationX User Forum*. Dresden, 2016, S. 327-334
- [P3] MEINEL, D. und J. FRANKE. Chances of the application of multi-domain simulation tools in the field of train system engineering. In: *International FAIM Conference*, 20. Mai 2014, S. 893-899
- [P4] MEINEL, D., S. RAST und J. FRANKE. A simulation framework for theoretical analysis and virtual testing of longitudinal vibrations of trains. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Mechatronics Systems and Control Engineering (ICMSCE 2018)*. Amsterdam, 2018, S. 38-44
- [P5] MEINEL, D., F. FALTUS und J. FRANKE. An Introduction of Two Different Modelica System Integration Concepts. In: *PROCEDIA CIRP, Hg. Proceedings of the 26th CIRP Design Conference*. Stockholm, 2017, S. 502-507

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten*

- [S1] RAST, S., D. MEINEL und J. FRANKE. *Validierung und Anwendung eines Zugsimulators zur Längsdynamik hinsichtlich Energie und Schwingungsverhalten*. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [S2] JIA, S., D. MEINEL und J. FRANKE. *Theoretische und virtuelle Untersuchungen in Zügen von Längsschwingungen und ihrer Ursachen auf den Zugverband*. Projektarbeit. Erlangen, 2016

* Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2019):

Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308

FAU Studien aus dem Maschinenbau

ISSN 2625-9974

FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

| | |
|-------------|---|
| FAPS | Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik |
| LFT | Lehrstuhl für Fertigungstechnologie |
| LPT | Lehrstuhl für Photonische Technologien |

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der
rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität
automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte
Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von
Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung
von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von
Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte
Montageplanung am Beispiel der
Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur
Flexibilitätssteigerung der
rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines
übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und
Prozeßdiagnostik für das Schneiden
mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexib-
len Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten
Diagnosesystems für automatisierte
Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte
Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von
Softwaresystemen für rechnergeführte
Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumforme mit
elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für
kooperierende Industrieroboter in
Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer
Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen
Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge
Laserstrahlschneiden und -schweißen
in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung
von Materialflußstrukturen in der
Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller
CO₂ -Laserstrahlschneiden von
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung
bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer
CAD/CAM-Prozeßkette für die
Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen: Prozeßführung und
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-
beitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit
objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung
in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simula-
tionsverfahrens für operative und
strategische Probleme der
Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-
tungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten
Werkstattprogrammiersystems für das
Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von
Montageanlagen in einem integrierten
Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-
der Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung
keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und
Schulung an Steuerungssoftware von
SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der
Angebotsbearbeitung in der
Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim
Schneiden mit einem gepulsten
Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und
on-line Biegewinkelmessung mit
dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur
Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der
Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten
Handhabungsplanung komplexer
Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten
Materialversorgung in flexiblen
Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und
Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer
Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle
Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und
Multimedia-Unterstützung in
Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und
Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung
mit Excimerlasern - Systemkomponenten
und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit
Zweistrahlschweißtechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration
für flexible Fertigungszellen mit
kooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit
Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim
3D-Laserstrahlschweißen von
Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer
CA-Anwendungen über einem
STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen
(3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und
der Fokusparameter einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und
Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der
Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim
Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung
an offenen CNC-Steuerungen zur
Prozeß- und Programmoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und
Prozeßplanung zur Leistungs- und
Qualitätssteigerung beim
Spulenwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für
CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler
Schraubstationen in der
automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen
in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme
und recyclinggerechte Produktgestaltung
elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner
Kaltmassivumformung metallischer
Kleinstteile - Werkstoffverhalten,
Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind
Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer
Eigenschaften von Feinblechen mit
dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard
Qualitätssteigerung in der
Elektronikproduktion durch
Optimierung der Prozeßführung
beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh
Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und
Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn
Meßeinrichtung zur Untersuchung
der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen
Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert
Regelung der Fokuslage beim Schweißen
mit CO₂-Hochleistungslasern unter
Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo
Development and Implementation of
Hierarchical Control Structures of
Flexible Production Systems Using High
Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt
Effizienzsteigerung bei Demontage
und Recycling durch flexible
Demontagetechnologien und optimierte
Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der
Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger
Herstellungs- und Prüfverfahren für
thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach
Beitrag zur rechnerunterstützten
verursachungsgerechten
Angebotskalkulation von Blechteilen
mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung
der Anschlußgeometrie elektronischer
SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk
Simulationsbasierte
Lebensdauervorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl
Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und
Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel
Ermüdungsbruchversagen
hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle
in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert
Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen
von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum
Produktionsmanagement in der
Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.
Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen
durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die
rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer
Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration
der Prozeßebene in Produktionssysteme
durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von
Werkzeugmaschinen durch Einsatz
mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in
einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -
Prozeßparameter und Modelle zur
Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Teliagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integra-
tion neuer Bauelementetechnologien in
die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten
alternativer Elektroniklote in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem
Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montage-
systemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von
Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung
der Mikrostruktur und
der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches
Architekturkonzept zur Akquisition
simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische
Optimierung im Innenausbau durch
den Einsatz moderner
Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-
Punktschweißen in der Elektronikpro-
duktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum
Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten
Programmierung für
die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim
Laserstrahlschweißen mit den Methoden
der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung
metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die
MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter
Mikroverbindungen elektronischer
Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium
für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontak-
ten elektronischer Bauelemente mit
Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann
Erweiterung der Formgebungsgrenzen
beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-
satz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch
3 - D MID Technologie in der
Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl
Fertigungsqualität und Umformbarkeit
laserstrahlgeschweißter Formplatinen
aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk
Entwicklung eines konfigurierbaren
Steuerungssystems für die flexible
Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck
Neue Sensorik und Aktorik für
Bearbeitungsköpfe zum
Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, Trennen und Laserstrahlschweißen
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und
multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner
Technische Umsetzung produktbezoge-
ner Instrumente der Umweltpolitik bei
Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier
Strategien für einen produktorientierten
Einsatz räumlicher spritzgegossener
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich
Kostensimulation - Simulationsbasierte
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer
Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny
Innenhochdruck-Umformen von Blechen
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-
rungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha
Flexible Montageautomatisierung zur
Komplettmontage flächenhafter Produkt-
strukturen durch kooperierende
Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und
Verbindungstechnik für mechatronische
Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph
Durchgängige simulationsgestützte
Planung von Fertigungseinrichtungen der
Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah
Simulationsbasierte Bestimmung der
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das
Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein
Scherschneiden und Biegen metallischer
Kleinstteile - Materialeinfluss und
Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff
Excimerlaserstrahlbiegen dünner
metallischer Folien mit homogener
Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach
Rechnergestützte Anpassung von
Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl
System- und Prozeßtechnik für das
simultane Löten mit Diodenlaserstrah-
lung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker
Tribologische Eigenschaften keramischer
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer
Oberflächenendbearbeitung mittels
Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik
durch innovative maschinenbauliche und
regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama
Effizienzsteigerung in der Montage durch
marktorientierte Montagestrukturen und
erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Ent-
wicklung von Konzepten und Methoden
für die rechnerunterstützte Modellierung
und Optimierung von komplexen
Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung:
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss
von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und
Regelsysteme für die adaptive
Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender
Regelkreise für flexible
Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinst-
teile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung
von Qualität und Zuverlässigkeit in
der Fertigung hochintegrierter
Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit
Elastomerwerkzeugen Modellierung,
Prozessauslegung und Abgrenzung des
Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum
Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of
Assembly Systems in Three-Dimensional
Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung
elektronischer Baugruppen auf der Basis
flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester
Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des
Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-
Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung
einer varianz- und kostenoptimierten
Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessana-
lyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung von Leichtbauverbundstruk-
turen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimie-
rung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser
Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management
in der integrierten virtuellen Entwicklung
der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht
Werkstoffcharakterisierung und
Prozessauslegung für die wirkmedienba-
sierte Doppelblech-Umformung von
Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter
Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen
beim Presshärten des höchstfesten
Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez
Simulationsgestützte Methoden zur
effizienten Gestaltung von Lötprozessen
in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makrome-
chatronischen Modulen zur flexiblen
Integration in hybride
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur
experimentellen Ermittlung und zur
Modellierung von Fließortkurven bei
erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungs-
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-
rung von einsatzgerechten elektroni-
schen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter
Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen
zum Rührreibschweißen metallischer
Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung
des Werkstoffverhaltens von
presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten
Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten
Produktionskonzeptes für mobile
Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktslagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahltiefschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten
Steuerungssystems zur
Materialflussorganisation im
wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahlschweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen von walzplattiertem
Halbzeug und Aluminiumblech zur
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-
Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium
Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung
der Crashtaughigkeit von höchstfesten
Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen-
Entwicklung einer Methodik zur
Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das
Umformen lokal wärmebehandelter und
geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-
schweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel
Grundlegende Untersuchungen zum
Kontaktzustand zwischen Werkstück
und Werkzeug bei umformtechnischen
Prozessen unter tribologischen
Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer
Entwicklung eines mesoskopischen
Modells zur Abbildung von Größeneffek-
ten in der Kaltmassivumformung mit
Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösun-
gen zur Robustheitssteigerung elektroni-
scher Systeme gegen die Einwirkung von
Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler
Verbindungs- und Systemtechnik für
thermisch hochbeanspruchte und
miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozess-
grenzen bei der Innhochdruck-Umfor-
mung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle Optimierung komplexer
Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für
die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for
Sensor-Controlled Tissue-Specific
Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimie-
rung des Schablonendruckprozesses in
der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von
Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine
Betrachtung werkstoff-prozessspezifi-
scher Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die
SMT-Montage optischer Bauelemente auf
Substrate mit integrierten Lichtwellenlei-
tern
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste
Kaltmassivumformwerkzeuge durch
lokal optimierte Werkzeugoberflächen
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Ver-
sagens von Punktschweißverbindungen
bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von
pressgehärteten Karosseriekomponenten
mit maßgeschneiderten mechanischen
Eigenschaften: Temperierte Umform-
werkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimu-
lation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging
Tools Exemplified by Powder
Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des
Laserstrahlumformens von
Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des
Laserstrahlhartlötens mittels optischer
Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-
stoffen - Umformverhalten und Grenzen
der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für
die Kaltmassivumformung unter
Brücksichtigung der Werkzeug- und
Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwick-
lung und Zuverlässigkeit räumlicher
Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung
mechatronischer Systeme in der Medizin
am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahllöten
und -reparaturlöten elektronischer
Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des
mechanischen Werkstoffverhaltens
von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim
Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette
zur wärmeunterstützten Umformung
von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster
Halbzeuge mit variabler Blechdicke
durch die Anwendung von Verfahren
der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium
Vessel and Capillary Density for the
Application of Detection of Clinical
Shock and Early Signs of Cancer Develop-
ment
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines
Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz
und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen
technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen
auf die Verarbeitungsgrenzen von
Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften
widerstandspunktgeschweißter
Aluminium-Stahl-Verbindungen für
den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der
Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit
optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren
auf die Wirbelstromverluste von
Stator-Einzelzahnblechpaketen für den
Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von
Blechhalbzeugen unter Anwendung
magnetorheologischer Flüssigkeiten als
kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie
indirekt pressgehärteter Karosseriebau-
teile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimu-
lation von Biegeumform- und Falzverfah-
ren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl
Flexible Automatisierung der
Statorenmontage mit Hilfe einer
universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien
für Rotoren getriebeintegrierter
PM-Synchronmotoren von
Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for
Contactless Power Transfer Systems for
Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke
Transiente physikalische Mechanismen
bei der Laserablation von dünnen
Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des
Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen
Qualifizierung des Potentials von
Verfestigungseffekten zur Erweiterung
des Umformvermögens aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung
des Formgebungsvermögens von Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischen geschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec
Untersuchungen zur Herstellung von
funktionsoptimierten Bauteilen im
partiellen Presshärtprozess mittels lokal
unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader
Grundlegende Untersuchungen zur
Verschleißcharakterisierung beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung und Fehlerdetektion
an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland
Entwicklung einer Methode zur Prognose
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen
für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm
Strukturierte additive Metallisierung
durch kaltaktives
Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster
Aluminiumblechhalbzeuge durch
eine maßgeschneiderte Variation der
Abkühlgeschwindigkeit nach
Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim
Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles
for the Generation of Thin Conductive
Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider
Umformtechnische Herstellung
dünnwandiger Funktionsbauteile
aus Feinblech durch Verfahren der
Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof
Sematische Modellierung automatisierter
Produktionssysteme zur Verbesserung
der IT-Integration zwischen Anlagen-
Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller
Erarbeitung von Grundlagen zur
Abbildung des tribologischen Systems
in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler
Einsatz technologischer Versuche zur
Erweiterung der Versagensvorhersage
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten
Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig
Integration des Systemverhaltens von
Automobil-Hochvoltleitungen in die
virtuelle Absicherung durch
strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl
Automatisierte Datenerfassung für disk-
ret ereignisorientierte Simulationen in
der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold
Mikroschockwellenumformung mittels
ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger
Laserstrahlschweißen thermoplastischer
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit
spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement - Eine
Methode zur Energieplanung für
Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrol-
lings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung zyklisch-symmetrischer
Bauteile mit Nebenformelementen durch
Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der
tribologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereitstellung
von tribologischen Modellversuchen und
Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung
der formgebenden Operation des
Nasspressprozesses von
Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische
Mindestenergiebedarf als Referenzwert
zur Bewertung der Energieeffizienz in
der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von
Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent
Magnet Assembly and Magnetic Rotor
Measurement / Flexible Systeme zur
Montage von Permanentmagneten und
zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten
hochfester Leichtbauwerkstoffe unter
Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozessverhalten von Silizium als
Werkzeugwerkstoff für das
Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der
Lasermikromaterialbearbeitung –
Grundlegende Untersuchungen und
Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for
the Process Planning of Energy-Efficient
Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik
für verteilte Wicklungen im
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung
montageführender Werkerinformations-
systeme simultan zum
Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und
Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen
Werkstoffverbunden mittels simultanem,
intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for
the Cold Bulk Forming of Small Metal
Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling,
Simulation and Optimization of Molded
Interconnect Devices (MID) Based on
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-
mentelle Untersuchung, Modellierung,
Simulation und Optimierung von Molded
Interconnect Devices (MID) basierend
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren
für flachleiterbasierte
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung
des spannungszustandsabhängigen
Werkstoffverhaltens der Magnesium-
legierung AZ31B für die numerische
Prozessauslegung
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce
thermo-mechanical flow behaviour of
hot stamping steels
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformpro-
zessen durch maßgeschneiderte
tribologische Systeme
LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn-
und Umformprozesses beim Fügen art-
ungleicher Werkstoffe mittels
Schneidclinchverfahren
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das
3-Rollen-Schubbiegen
LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome
Bahnplanung für ein sicheres und
flexibles Roboter-Assistenzsystem
in der Fertigung
FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die
Zuverlässigkeit der Lötverbindungen
von Hochleistungs-Leuchtdioden
FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab.
2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohrbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

„Die Entwicklung hochgradig digitalisierter Produkte und Anlagen stellt Hersteller vor die Herausforderung, die steigende technische Komplexität zu beherrschen. Dabei helfen Digitale Zwillinge. Die entwicklungsbegleitende Verifizierung, deren Aufgabe die Sicherstellung eines fehlerfrei funktionierenden Produktes ist, ist darin bislang unterrepräsentiert. Um dies zu ändern, muss das physikalische und steuerungstechnische Verhalten ebenfalls berücksichtigt werden, wofür die Inklusion multiphysikalischer Simulationsmodelle nötig ist.

In dieser Arbeit wird daher eine objektorientierte, Modelica-basierte Modellarchitektur zur Implementierung solcher Digitaler Zwillinge eingeführt. Diese bilden das bislang fehlende Modellverhalten ab und verfügen darüber hinaus über eine modulare, vielseitig konfigurierbare Struktur. Auf diese Weise kann das komplexe Wechselspiel der Systemkomponenten und verschiedener Systemkonfigurationen in den verschiedenen Entwurfs- und Integrationsphasen der Entwicklung virtuell analysiert und abgesichert werden.

Eine Methodik zur Integration der offen zugänglichen Modellschnittstelle Functional Mock-Up Interface (FMI) ermöglicht die Adaption der Digitalen Zwillinge durch Entwicklungswerkzeuge. Dadurch lassen sich die Digitalen Zwillinge einerseits für effektive Testautomatisierung nutzen. Andererseits sind etablierte Teilmodelle in das Systemmodell integrierbar.

Die Methodik wird anhand von Schnellzügen validiert, die sich durch das Wechselspiel eines komplexen Steuerungssystems, verteilter Traktion und Bremsen charakterisieren. Die Systemkomplexität verursacht unbeabsichtigte fahrdynamische Effekte, die zukünftig in Simulationen bereits während der Entwicklung erkannt und beseitigt werden können.“

