

Yin You

**Eine Studie zur Implementierung
des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes
in der verteilten Fahrzeugentwicklung
am Beispiel Antriebsstrangentwicklung**

A study of implementation
of IPEK-X-in-the-Loop-Approach
in distributed automotive development
by example of powertrain development

Band 107

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
(Hrsg.)

Yin You

Eine Studie zur Implementierung des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung am Beispiel Antriebsstrangentwicklung

A study of implementation of IPEK-X-in-the-Loop-Approach in distributed automotive development by example of powertrain development

Band 107

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright: IPEK ▪ Institut für Produktentwicklung, 2017
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen
06224-7697915

ISSN 1615-8113

**Eine Studie zur Implementierung
des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes
in der verteilten Fahrzeugentwicklung
am Beispiel Antriebsstrangentwicklung**

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation

von

M.Sc. Yin You
aus Shangrao

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Dezember 2017
Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Tong Zhang

Vorwort der Herausgeber

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Krafffahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 107

Die moderne Produktentwicklung, insbesondere im Fahrzeugbau, setzt zunehmend auf Kooperation zwischen OEM und Zulieferern. Gleichzeitig wird durch die Globalisierung eine Verteilung sowohl der Entwicklung als auch der Produktionsleistungen global zum Standard. In diesem Kontext stellt die Unterstützung der Entwicklungsprozesse in verteilten Standorten eine wichtige Aufgabenstellung dar, die besonders durch Grundlagenforschung und neue Ansätze und Konzepte für Produktentstehungsprozesse unter diesen Randbedingungen erfolgen muss. Diese Forschung ist seit einigen Jahren ein Kern der Arbeiten in der Gruppe um ALBERS, wo grundlegende Untersuchungen und daraus abgeleitete Lösungen generiert werden. Insbesondere die *PGE – Produktgenerationsentwicklung* und das Konzept der geschlossenen Validierung bei Verknüpfung des Produktes mit seinen Umgebungssystemen sind hier die grundlegenden Forschungsansätze. Diese Arbeiten haben schon erhebliche neue Möglichkeiten aufgezeigt, wie Entwicklungsprozesse auch in verteilten Umgebungen strukturiert durchgeführt werden können. So wurden das Thema *Virtuelle Entwicklungsteams* und *Kreativmethoden in virtuellen Entwicklungsteams* als Forschungsfelder sehr erfolgreich angegangen. Diese Arbeiten und auch die Arbeiten anderer Wissenschaftler zeigen, dass in der verteilten Produktentwicklung neue Herausforderungen auftreten, die ein grundlegendes Überdenken der Vorgehensweisen und Prozesse notwendig machen.

Eine zentrale Herausforderung in der Produktentwicklung ist die Validierung. In der Validierung wird der Abgleich zwischen den Kunden- und Unternehmenserwartungen an das neu zu entwickelnde Produkt, die im Zielsystem beschrieben sind, mit den erreichten Entwicklungsständen ermittelt. Hier verfolgt die Gruppe um ALBERS das Konzept der kontinuierlichen Validierung von Anfang an. Das heißt, in sehr frühen Phasen passende grundlegende Validierungsaktivitäten durchzuführen, da diese dann den Entwicklungsprozess entscheidend steuern. Die Herausforderung ist dabei natürlich, entsprechend valide Untersuchungen in diesem Kontext durchführen zu können. Hierzu sind neue Konzepte erforderlich. Insbesondere die Aspekte der schnellen Definition von Untersuchungsprototypen auf der Basis vorhergehender Produktgenerationen, aber auch die Integration von *Rapid Prototyping-Ansätzen* von Anfang an spielen hier eine wichtige Rolle. Dabei ist das Produkt natürlich als Leistungsbündel aus Produkt, Service und Geschäftsmodell zu verstehen. Im Allgemeinen haben wir heute mechatronische Produktlösungen, die gekoppelt sind mit Services und einer interaktiven Kopplung, z. B. im Rahmen der *car to car Kommunikation* sowie begleitet von angepassten Geschäftsmodellen. Alle diese Aspekte sind in der Produktentwicklung zu berücksichtigen und natürlich kontinuierlich zu validieren.

Um dies nun auch noch in verteilten Entwicklungsstandorten machen zu können, ist die Kopplung über Distanzen notwendig. Diese Kopplung kann natürlich durch entsprechende Datenleitungen innerhalb eines Unternehmens realisiert werden. Wenn die Standorte allerdings weiter voneinander entfernt sind, kommt hier der Einbindung des Internets eine entscheidende Bedeutung zu. An dieser Stelle setzt die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Yin You an. Er hat sich zum Ziel gesetzt, den *IPEK-XiL-Ansatz* unter dem Aspekt der verteilten Fahrzeugentwicklung zu untersuchen und hier grundlegende Zusammenhänge aufzuzeigen. Ferner leitet er grundlegende Vorgehensweisen auf um die verteilte Entwicklung in den Produktentstehungsprozess nutzbar zu machen. So leistet die Arbeit einen praxisorientierten Beitrag zur Validierung im Rahmen der KaSPro – Karlsruher Schule der Produktentwicklung.

Dezember, 2017

Albert Albers

Kurzfassung

Die Zusammenarbeit spielt immer eine wichtige Rolle in der Fahrzeugentwicklung. Heutzutage findet die Zusammenarbeit von unternehmensintern über Standorte und Zeitzonen hinweg bis hin zur unternehmens- und disziplinübergreifend statt. Dadurch lassen sich die Entwicklungszeit und der Entwicklungsaufwand hoch komplexer Produkte optimieren. Gleichzeitig stellen die vielfältigen Formen der Zusammenarbeit die Automobilhersteller und -zulieferer ständig vor neue Herausforderungen. Da die Validierung die zentrale Aktivität der Produktentwicklung darstellt, liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Validierung in der verteilten Fahrzeugentwicklung.

Der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz (Abkürzung: IPEK-XiL-Ansatz) stellt ein ganzheitliches Framework für die Validierung in der Fahrzeugentwicklung dar, welches die Validierung immer unter der Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Fahrer-Fahrzeug-Umwelt ermöglicht. Üblicherweise müssen zunächst alle Bestandteile an einem Standort zusammengeführt werden, um eine Validierung des System-in-Development im Gesamtsystemkontext zu ermöglichen. Im Fall der verteilten Fahrzeugentwicklung kann diese Zusammenführung jedoch sehr kosten- und zeitaufwendig sein. Daher wird in der vorliegenden Arbeit die Machbarkeit der Implementierung vom IPEK-XiL-Ansatz in der verteilten Fahrzeugentwicklung untersucht, damit die Validierung sich effizient und effektiv durchführen lässt.

Durch eine Vorstudie mittels Prüfstände an verschiedenen Standorten eines Instituts lässt es sich zeigen, dass eine Vernetzung zwischen räumlich verteilten Prüfständen innerhalb eines Unternehmensumfeldes möglich ist. Dazu werden unterschiedliche Konzepte erstellt, um den IPEK-XiL-Ansatz in der verteilten Fahrzeugentwicklung zu implementieren.

Des Weiteren werden die neu entwickelten Implementierungskonzepte in einem international kollaborativen Forschungsprojekt eingesetzt. Dadurch wird gezeigt, dass die Prüfstandsvernetzung anhand des IPEK-XiL-Ansatzes auch bei Anwendungen mit großen Distanzen verwendet werden kann.

Abschließend wird auf Basis der durchgeführten Untersuchungen ein Handlungsleitfaden erstellt, anhand dessen die Implementierung vom IPEK-XiL-Ansatz in der verteilten Fahrzeugentwicklung für den jeweiligen Anwendungsfall strukturiert werden kann. Dieser Handlungsleitfaden kann zunächst zu der Entscheidung beitragen, wann eine Vernetzung verteilter Teilsysteme sinnvoll realisiert wird. Darüber hinaus werden unterschiedliche Implementierungskonzepte bezüglich jeweiliger Stärken und Eingrenzungen differenziert, um die Implementierung vom IPEK-XiL-Ansatz unter verschiedenen Entwicklungsumgebungen zu unterstützen.

abstract

Cooperation plays an important role in the automotive development. Nowadays cooperation takes place both within the company across locations and time zones as well as between companies and across disciplines. This enables the optimization of development time and cost. At the same time, diverse cooperation models bring new challenges to automotive manufacturers and their suppliers. Since the validation is the central activity of product development, the focus of this thesis is the validation in distributed automotive development.

The IPEK-X-in-the-Loop-Approach (short: IPEK-XiL-Approach) represents a holistic framework for the validation in automotive development, which allows the consideration of the interaction between driver, vehicle and environment. Usually, all the components have to be brought together in one location firstly to conduct a complete validation of the System-in-Development. In the case of distributed automotive development, this may take much time and cost. Therefore, the feasibility of the implementation of the IPEK-XiL-Approach in the distributed automotive development will be investigated in this thesis, so that the validation in distributed automotive development can be carried out efficiently and effectively.

A preliminary study using test benches at different locations in an institution shows the feasibility of the remote joint validation with distributed test benches. Based on this study different concepts are developed for the implementation of the IPEK-XiL-Approach in distributed automotive development.

Furthermore, the newly developed implementation concepts are applied in an international collaborative research project. Thereby, it is shown that the IPEK-XiL-Approach can also contribute to the applications with great distances.

Based on the investigations a guideline will be generated, which supports the structure of the implementation of the IPEK-XiL-Approach in each concrete application. This guideline contributes firstly to the decision when a remote joint validation with distributed subsystems is appropriately to implement. Furthermore, the implementation concepts are differentiated regarding their strengths and limitations for supporting the implementation of IPEK-XiL-Approach under different development environments.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand zunächst in der Forschungsgruppe NVH/Driveability und später Systemische Mobilität am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Mein größter Dank gebührt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit, das entgegengebrachte Vertrauen und die Ermöglichung der tollen Rahmenbedingungen für meine Forschungsarbeiten. Insbesondere werde ich die fruchtbaren und spannenden Diskussionen sowie seine konstruktiven Denkanstöße in Erinnerung behalten.

Für die Übernahme des Koreferates bedanke ich mich ganz herzlich beim Herrn Prof. Dr.-Ing. Tong Zhang von der Tongji Universität. Ich hatte das Glück, unter anderem in einem Forschungsprojekt mit seinem kompetenten Team zusammenarbeiten zu dürfen, woraus tolle Erfahrungen entsprangen.

Ein besonderer Dank geht an meinem Oberingenieur und Kollegen Dr.-Ing. Matthias Behrendt für den wissenschaftlichen Austausch und die Anregungen bei wissenschaftlichen Gesprächen.

Des Weiteren möchte ich insbesondere den Kollegen der Forschungsgruppe Systemische Mobilität und NVH/Driveability für die tolle Zusammenarbeit und den sehr intensiven wissenschaftlichen Austausch danken, die meine Arbeit maßgebend mitgeprägt haben. Dies gilt ferner auch für alle Kolleginnen und Kollegen am Institut. Nicht nur die wissenschaftlichen Diskussionen und fruchtbaren Impulse, sondern auch das sehr angenehme und offene Arbeitsklima hat mich stets begeistert und angespornt.

Zudem danke ich meinen Eltern Kaifa You und Weihong Yu, die mich stets bei meiner Arbeit motiviert und unterstützt haben und mir in allen Lebenslagen den Rücken freigehalten haben.

Schließlich möchte ich mich ganz besonders bei meiner Frau Yuting Liu für ihr Verständnis, ihre Geduld und die vielfältige Unterstützung in den letzten Jahren bedanken.

Karlsruhe, den 13. Dezember 2017

Yin You

„Wer sich das Alte noch einmal vor Augen führt, um das Neue zu verstehen,
der kann anderen ein Lehrer sein“

Konfuzius, 551 v. Chr. – 479 v.Chr.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Stand der Forschung	4
2.1	Grundbegriffe.....	4
2.1.1	Verständnis der Produktentstehung	4
2.1.1.1	Die fünf zentralen Hypothesen der Produktentwicklung.....	4
2.1.1.2	Produktgenerationsentwicklung.....	7
2.1.2	Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM).....	8
2.1.3	Erweitertes ZHO-Modell	10
2.1.4	Validierung und Verifizierung im Produktentstehungsprozess	11
2.1.5	IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz	12
2.2	Verteilte Produktentwicklung	14
2.2.1	Arbeitsteilung	14
2.2.2	Betrachtungen der VPE.....	15
2.2.2.1	Ausprägungen der VPE.....	15
2.2.2.2	Wesentliche Aspekte zur VPE.....	16
2.2.2.3	Umfassende Beschreibungen der VPE	17
2.2.3	Strategische Konzepte zur Unterstützung der VPE	21
2.2.3.1	Concurrent Engineering (CE) und Simultaneous Engineering (SE)	22
2.2.3.2	Integrierte Produkterstellung	23
2.2.4	Informations- und Kommunikationstechnische Unterstützung der VPE	24
2.2.4.1	Modelle der Netzwerkprotokolle	25
2.2.4.2	Auswahl passender Methoden und Werkzeuge.....	27
2.2.4.3	Spezifische Ansätze und Konzepte zur Unterstützung der Kommunikation und des Informationsaustauschs.....	28
2.2.5	Ganzheitliche Vorgehensweisen der VPE	32
2.2.5.1	Integrierte virtuelle Produktentstehung	32
2.2.5.2	Integriertes Vorgehensmodell.....	34
2.2.5.3	Modellierung und Simulation der verteilten Produktentwicklungsprozesse	35
2.2.6	Zwischenfazit	36
2.3	Zusammenarbeit in der Fahrzeugentwicklung	37
2.3.1	Automobilhersteller	38
2.3.2	Automobilzulieferer	38
2.3.3	Hersteller – Zulieferer Beziehung	40
2.3.4	Zusammenarbeitsformen	43
2.3.5	Tendenzen der Zusammenarbeit bei der Fahrzeugentwicklung	48
2.3.5.1	Globalisierung	48

2.3.5.2	Disziplinübergreifende Entwicklung	49
2.3.5.3	Veränderungen der Zusammenarbeit in der Fahrzeugentwicklung.....	52
2.3.6	Zwischenfazit	54
2.4	Validierung in der Fahrzeugentwicklung	54
2.4.1	Historische Fahrzeugvalidierung	55
2.4.2	Klassische Validierungsmethode.....	56
2.4.2.1	Physischer Versuch	56
2.4.2.2	Virtuelle Simulation	57
2.4.3	Physisch und virtuell gemischte Validierung	59
2.4.4	Validierung anhand des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes	60
2.4.5	Validierung in der verteilten Fahrzeugentwicklung.....	62
2.4.6	Zwischenfazit	65
2.5	Prüfstandssysteme für Antriebsstrangentwicklung.....	65
2.5.1	Prozess-Ebene.....	68
2.5.2	Interface-Ebene.....	70
2.5.3	Operativ-Ebene	73
2.5.3.1	Echtzeitsystem in der Operativ-Ebene	74
2.5.4	Bedien-Ebene	77
2.5.5	Leit-Ebene.....	78
2.5.6	Zwischenfazit	78
2.6	Zusammenfassung	78
3	Motivation und Zielsetzung.....	80
3.1	Motivation	80
3.2	Zielsetzung	82
4	Forschungsdesign.....	84
5	Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung.	87
5.1	Implementierungsmöglichkeiten vom IPEK-XiL-Ansatz in der verteilten Fahrzeugentwicklung	87
5.1.1	Zusammenführung der verteilt entwickelten Systeme an einem Standort.....	88
5.1.2	Erstellung eines unternehmensübergreifenden Entwicklungsteams	88
5.1.3	Vernetzte Validierung über die Distanz.....	89
5.1.4	Zwischenfazit	90
5.2	Auslegungsmöglichkeiten der vernetzten Validierung über die Distanz	90
5.3	Zusammenfassung	91
6	Vorstudie des IPEK-XiL-Ansatzes mit verteilten Teilsystemen	93
6.1	Verwendete Prüfstände	93
6.1.1	Mini Hardware-in-the-Loop Prüfstand.....	93
6.1.2	Fahrsimulator	97
6.1.3	Dauerschlepp-Prüfstand.....	99

6.2	Vorgehensweise der Vorstudie.....	100
6.2.1	Einflussfaktoren.....	100
6.2.1.1	Fahrzyklus.....	100
6.2.1.2	Verteilungszustand.....	102
6.2.1.3	Hardware	103
6.2.1.4	Internetlatenzzeit.....	103
6.2.2	Erstellung des Testplans anhand statistischer Versuchsplanung	104
6.2.3	Analyse der Ergebnisse	104
6.2.4	Zwischenfazit	107
6.3	Implementierungskonzepte	107
6.3.1	Konzept 1: Host to Host	108
6.3.2	Konzept 2: Target to Target.....	108
6.3.3	Konzept 3: One Host to multiple Targets.....	109
6.4	Untersuchung der Gesamlatenzzeit der drei Konzepte	110
6.5	Zusammenfassung	116
7	Exemplarische Anwendungen	117
7.1	Anwendung innerhalb eines Unternehmensumfeldes.....	117
7.1.1	Fahrsimulator und Mini-HiL	117
7.2	Globale Anwendungen	119
7.2.1	Prüfstand und Hardware an der Tongji Universität	120
7.2.2	Analyse der drei Konzepte	124
7.2.3	Implementierung der Prüfstandsvernetzung	125
7.2.3.1	Fahrsimulator-IPEK mit VMS und Fahrzeugmodell Tongji.....	125
7.2.3.2	Fahrsimulator-IPEK mit Motor und Powertrain-Prüfstand Tongji.....	127
7.2.3.3	Sitzbox-Tongji mit Mini-HiL-IPEK	129
7.3	Bewertung der Ergebnisse und Zusammenfassung	131
8	Einsatzpotential und Handlungsleitfaden	132
8.1	Entscheidung für die Vernetzung verteilter Teilsysteme	132
8.2	Handlungsleitfaden des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Antriebsstrangentwicklung ..	135
8.2.1	Differenzierung der drei Konzepte	135
8.2.2	Validierungsanforderungen und –randbedingungen	137
8.2.3	Zwischenfazit	138
8.3	Zusammenfassung	139
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	140
9.1	Zusammenfassung	140
9.2	Ausblick	142
10	Literaturverzeichnis.....	144
	Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten.....	155
11	Anhang.....	156

11.1	Vorgehensweise DoE	156
11.2	Das orthogonale Formular und die Ergebnisse	157

1 Einleitung

Seit den Anfängen der Automobilindustrie spielt die Zusammenarbeit in der Fahrzeugentwicklung immer eine wichtige Rolle. Im Jahr 1913 wurde die Ford-Massenfertigung in die Automobilindustrie eingeführt, welche das erschwingliche Automobil ermöglicht². Eine Grundidee der Massenfertigung stellt die Arbeitsteilung dar, die als der Beginn der Zusammenarbeit in der Automobilindustrie identifiziert werden kann. Mit der Entwicklung der Automobilindustrie steigt die Komplexität des Fahrzeugs stetig. Demzufolge ist die Entwicklung eines Fahrzeugs nicht mehr von einzelnen Personen oder einzelnen Unternehmen, sondern nur durch Kooperation mehrerer Unternehmen zu gewährleisten. Die Entwicklung der Elektromobilität erfordert weitere interdisziplinäre Zusammenarbeit mit Unternehmen, die vorher nicht zu der Automobilindustrie gehörten. Daher werden immer mehr Unternehmen in die Fahrzeugentwicklung integriert. Für eine erfolgreiche Fahrzeugentwicklung ist es sehr wichtig, die Zusammenarbeit zwischen allen Beteiligten optimal durchzuführen.

Heutzutage kann die Zusammenarbeit in der Fahrzeugentwicklung sowohl unternehmensintern zwischen Entwicklern an verschiedenen Standorten, aber auch unternehmensübergreifend stattfinden. Diese standortübergreifende Produktentwicklung wird an einigen Forschungsinstituten als ein wichtiges Forschungsfeld erforscht. In diesem Forschungsfeld wurden zahlreiche Methoden und Werkzeuge entwickelt, um die Zusammenarbeit optimal auszuführen.

Die Validierung stellt nach ALBERS die zentrale Aktivität der Produktentwicklung dar³. Um diese zentrale Aktivität in der Fahrzeugentwicklung zu unterstützen, wird der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz (Abkürzung: IPEK-XiL-Ansatz) am IPEK - Institut für Produktentwicklung erforscht, implementiert und stetig erweitert⁴. Der IPEK-XiL-Ansatz stellt ein ganzheitliches Framework für die Validierung in der Fahrzeugentwicklung dar, welches die Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Fahrer-Fahrzeug-Umwelt in unterschiedlichen Detaillierungs- sowie Abstraktionsgraden ermöglicht. Dadurch lassen sich die Validierung und die Optimierung eines (Teil-)Systems immer unter Berücksichtigung des Gesamtsystems und seiner Umgebung durchführen.

Auch in der verteilten Produktentwicklung spielt die Validierung eine zentrale Rolle. Allerdings konzentrieren sich die bisher für die verteilte Produktentwicklung erarbeiteten Unterstützungsmethoden und –werkzeuge meistens auf die strategische Organisation und Koordination sowie auf die Kommunikation zwischen allen

² Reichhuber 2010

³ Albers 2010

⁴ Albers / Düser 2009

Beteiligten. Für die konkrete Durchführung der Validierung in der verteilten Produktentwicklung sind noch spezifische Methoden und Werkzeuge nötig, um eine effiziente und effektive Validierung zu ermöglichen. Üblicherweise werden alle Bestandteile des IPEK-XiL-Frameworks an einem Standort zusammengeführt, um eine vollständige Validierung des System-in-Development (Abkürzung: SiD) zu ermöglichen. Im Fall der verteilten Fahrzeugentwicklung kann diese Zusammenführung allerdings sehr Kosten- und Zeitaufwendig sein. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher die Machbarkeit der Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Antriebsstrangentwicklung untersucht werden.

Zu Beginn des 2. Kapitels werden die für diese Arbeit relevanten Grundbegriffe beschrieben, die als Grundlage dieser Arbeit dienen. Anschließend wird der derzeitige Forschungsstand zu vier Hauptthemen „verteilte Produktentwicklung“, „Zusammenarbeit in Fahrzeugentwicklung“, „Validierung in Fahrzeugentwicklung“ und „Prüfstandssystem“ ausführlich aufgezeigt. Zunächst werden im Allgemeinen die verteilte Produktentwicklung sowie verschiedene Betrachtungen vorgestellt. Darauf basierend werden verschiedene Unterstützungsmethoden und Werkzeuge dargestellt. Anschließend werden die wesentlichen Zusammenarbeitsformen in der Fahrzeugentwicklung beschrieben. Danach werden die Validierung in der Fahrzeugentwicklung und der IPEK-XiL-Ansatz präsentiert. Abschließend wird in diesem Kapitel noch das bei der Validierung zum Einsatz kommende Prüfstandssystem erklärt. Aus den vorgestellten Grundlagen und dem Stand der Forschung lässt sich in Kapitel 3 die Motivation und Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ableiten.

In Kapitel 4 wird das Forschungsdesign anhand des erweiterten ZHO-Modells⁵ erläutert, damit die Zielsetzung dieser Arbeit sinnvoll erreicht werden kann.

Um den IPEK-XiL-Ansatz in der verteilten Fahrzeugentwicklung einzusetzen, werden zunächst unterschiedliche Implementierungsmöglichkeiten in Kapitel 5 diskutiert. Die vernetzte Validierungsumgebung über die Distanz wird als eine ausführbare Lösung identifiziert. Demzufolge werden verschiedene Möglichkeiten für das Vernetzen verteilter Teilsysteme über die Distanz analysiert und verglichen.

Kapitel 6 zeigt, wie der IPEK-XiL-Ansatz konkret auf verteilten Prüfstandssystemen realisiert werden kann. Zunächst werden die eingesetzten Prüfstandssysteme ausführlich beschrieben. Mit Hilfe dieser Prüfstände wurde anschließend eine Vorstudie ausgeführt, um die Einsatzgrenzen des IPEK-XiL-Ansatzes mit verteilten Teilsystemen herauszufinden. Während der Vorstudie wurden Haupteinflussfaktoren sowie ihre Einflüsse auf die Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung identifiziert und analysiert. Darauf basierend lassen sich drei

⁵ Albers et al. 2012

Implementierungskonzepte entwickeln, damit der IPEK-XiL-Ansatz unter verschiedenen Randbedingungen der Vernetzung eingesetzt werden kann.

Nachdem die Machbarkeit festgestellt wurde, wird der IPEK-XiL-Ansatz anhand der Implementierungskonzepte exemplarisch auf verteilten Prüfstandssystemen demonstriert (Kapitel 7). Dies erfolgt einerseits an den Prüfstandssystemen innerhalb eines Unternehmensumfeldes, andererseits wird die Prüfstandsvernetzung im Rahmen eines Forschungsprojekts in internationaler Dimension eingesetzt.

Weiterhin wird auf Basis der durchgeführten Untersuchungen ein Handlungsleitfaden erstellt (Kapitel 8), anhand dessen die Implementierung vom IPEK-XiL-Ansatz in der verteilten Fahrzeugentwicklung für den jeweiligen Anwendungsfall strukturiert werden kann. Dieser Handlungsleitfaden sollte zunächst zu der Entscheidung beitragen, wann eine Vernetzung verteilter Teilsysteme sinnvoll realisiert wird. Darüber hinaus werden drei Implementierungskonzepte bezüglich jeweiliger Stärken und Eingrenzungen voneinander differenziert, um die Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes unter unterschiedlichen Entwicklungsumgebungen zu unterstützen.

Abschließend wird nach einer Zusammenfassung ein Ausblick auf weitere Applikationsmöglichkeiten gegeben. Hierbei stellt die Verbindungsqualität bzw. Latenzzeit und Datenaustauschfrequenz einen wichtigen Aspekt dar, da die Einsetzbarkeit des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Antriebsstrangentwicklung von der Verbindungsqualität wesentlich abhängt. Des Weiteren sollte der IPEK-XiL-Ansatz in zukünftigen Projekten weiter zum Einsatz kommen. Nur dadurch lassen sich weitere Erfahrungen bei der Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung sammeln, die dann in den Entwicklungsprozess für verteilte Fahrzeugentwicklung einfließen.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Das folgende Kapitel dient der Vorstellung der wissenschaftlichen Grundlagen der vorliegenden Arbeit und der systematischen Zusammenfassung des relevanten Stands der Forschung.

2.1 Grundbegriffe

2.1.1 Verständnis der Produktentstehung

Die Produktentstehung beinhaltet die Produktentwicklung, die Produktionsvorbereitung (Produktplanung) und die Produktion sowie alle Tätigkeiten, die mit der Vermarktung in Zusammenhang stehen^{6,7}. Auf Basis langjähriger Forschung und durchgeführter Projekte im Bereich der Produktentstehung am IPEK hat ALBERS die fünf zentralen Hypothesen der Produktentstehung abgeleitet⁸.

2.1.1.1 Die fünf zentralen Hypothesen der Produktentwicklung

Hypothese 1: Einzigartigkeit von Produktentstehungsprozessen

Jeder Produktentstehungsprozess ist einzigartig und individuell⁹.

Auf Grund der Vielfältigkeit von Entwicklungszielen, Einschränkungen und Kompetenzen der Entwickler kann kein Produktentstehungsprozess exakt gleich wie ein zweiter sein.

Hypothese 2: System der Produktentstehung

Basierend auf der Systemtechnik kann die Produktentstehung als die Überführung eines Zielsystems in ein konkretes Objektsystem durch ein Handlungssystem beschrieben werden¹⁰.

Mittels der allgemeinen Systemtechnik können die komplexen Produktentstehungsprozesse so beschrieben werden, dass eine globale Optimierung des ganzen Prozesses möglich ist. Anhand des ZHO-Modells ist die Produktentstehung durch drei Teilsysteme: Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem abzubilden (Bild 2-1)^{11,12,13}.

Handlungssystem

⁶ Albers 2010

⁷ Pahl / Beitz 2005

⁸ Albers 2010

⁹ Albers 2010

¹⁰ Albers 2010

¹¹ Albers et al. 2012

¹² Lohmeyer 2013

¹³ Albers et al. 2016b

Das Handlungssystem beschreibt das Entstehen eines Produkts. Es ist ein soziotechnisches System und beinhaltet sowohl die strukturierten Aktivitäten in der Produktentstehung, Methoden und Prozesse, als auch die benötigten Ressourcen bzw. Entwickler, Kapital und Material, etc. Das Handlungssystem erzeugt und vernetzt das Zielsystem und das Objektsystem.

Zielsystem

Das Zielsystem stellt alle relevanten Ziele und ihre Wechselwirkung, sowie die Randbedingungen dar. Eine erfolgreiche Produktentstehung basiert immer auf einer korrekten, konsistenten, vollständigen und kontinuierlich verfeinerten Definition des Zielsystems.

Objektsystem

Aus dem Zielsystem wird kontinuierlich das Objektsystem entwickelt, das nicht nur die zielentsprechenden Lösungen, sondern auch die Zwischenergebnisse (z.B. Modelle und Prototypen, etc.) enthält.

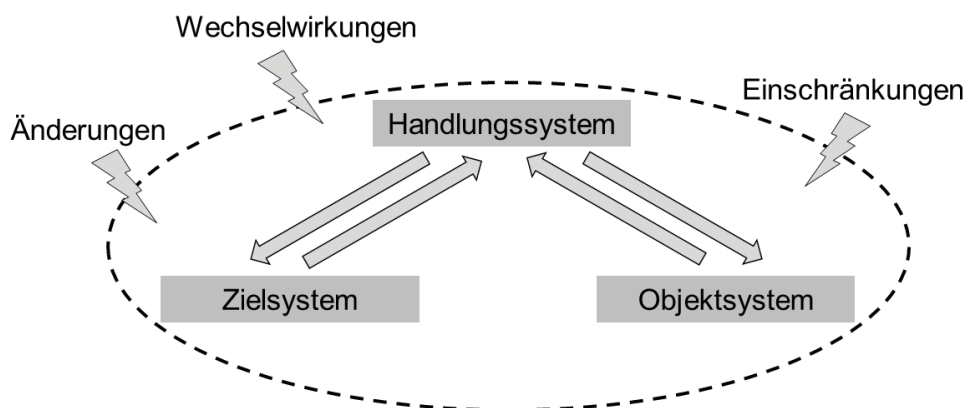


Bild 2-1: System-Tripel bei Produktentstehungsprozessen¹⁴

Hypothese 3: Validierung

Die Validierung ist die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess¹⁵.

In der Validierung wird die zielgerichtete Fortentwicklung des Zielsystems und damit der Erfolg des Produktes durch die kontinuierliche Spiegelung des erreichten Ist-Zustandes an dem geplanten Soll-Zustand definiert¹⁶. Validierung muss in der Produktentstehung kontinuierlich erfolgen. Nur durch Validierung wird Wissen generiert. Das gewonnene Wissen kann wieder in den Entwicklungsprozess zurückfließen¹⁷.

¹⁴ Albers 2010

¹⁵ Albers 2010

¹⁶ Oerding 2009

¹⁷ Lohmeyer 2013

Hypothese 4: Zielbeschreibung in der Problemlösung

Um die Ziele transparent zu halten, müssen die im Produktentstehungsprozess erstellten Objekte immer in Bezug auf die gewünschten Funktionen, die Teil des Zielsystems sind, beschrieben werden¹⁸.

Die Optimierung des Systems der Produktentstehung muss unter Berücksichtigung aller drei Teilsysteme - Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem – erfolgen. Die Überführung von Zielen in Objekte kann als Problemlösungsprozess betrachtet werden. Allerdings läuft dieser Prozess nicht linear, sondern iterativ und rekursiv ab und wird immer von Erfahrung und Qualifikation der Entwickler geprägt. Daher ist eine kohärente Modellierung von Zielen und Objekten während der hoch dynamischen Problemlösungsprozesse notwendig. Der Contact & Channel-Ansatz (C&C²-A) hilft, die Ziele und individuellen Objekte durch Funktionen zu verknüpfen¹⁹.

Hypothese 5: Beschreibung der Funktionen

Die Beschreibung einer technischen Funktion benötigt immer mindestens zwei Wirkflächenpaare und die sie verbindenden Leit-Stütz-Strukturen sowie zwei Konnektoren. Ein System kann seine Funktion(en) nur in Wechselwirkung mit seiner Umgebung erfüllen – ein Bauteil allein hat keine Funktion²⁰!

Mit Hilfe des von ALBERS und MATTHIESEN entwickelten Contact & Channel-Ansatzes^{21, 22} können die technischen Systeme durch Wirkflächenpaare (WFP), Leitstützstrukturen (LSS) und Connectoren beschrieben werden^{23,24}. Somit können die Systeme immer unter Betrachtung der Einflüsse von den benachbarten Systemen und ihrer Umgebung entwickelt werden. Die Aufgabe der Entwickler ist die Entwicklung der WFP und LSS²⁵.

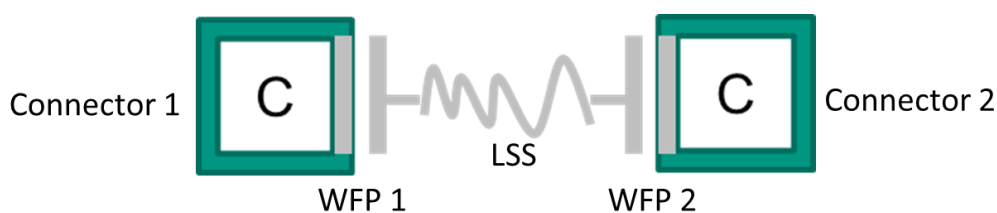


Bild 2-2: Modell einer Funktion anhand des C&C²-Ansatzes²⁶

¹⁸ Albers 2010

¹⁹ Albers et al. 2010a

²⁰ Albers et al. 2011a

²¹ Matthiesen 2002

²² Albers / Wintergerst 2014

²³ Matthiesen 2002

²⁴ Albers et al. 2016b

²⁵ Albers / Wintergerst 2014

²⁶ Albers / Wintergerst 2014

2.1.1.2 Produktgenerationsentwicklung

*Als Produktgenerationsentwicklung wird die Entwicklung technischer Produkte verstanden, die sowohl durch die Anpassung von Teilsystemen als Übernahmeveränderung, als auch durch eine Neuentwicklung von Teilsystemen charakterisiert ist*²⁷.

Neue Produktgenerationen basieren immer auf Referenzprodukten, welche die grundsätzliche Struktur beschreiben²⁸. Als Referenzprodukt werden ein Vorgänger- bzw. Wettbewerbsprodukt oder technische Lösungen aus völlig anderen Produktbereichen verstanden, auf deren Grundlagen die Entwicklung einer neuen Produktgeneration angegangen werden soll. Des Weiteren sind oft mehrere Referenzprodukte vorhanden. Durch die Neuentwicklungsanteile einer neuen Produktgeneration sollen Differenzierungsmerkmale zum Referenzprodukt erzielt werden.

Eine Unterscheidung, ob die Entwicklung eines Produkts als Ganzes in Neu-, Anpassungs- oder Variantenkonstruktion eingestuft werden soll, ist aus der oben genannten Perspektive wenig praktikabel. Vielmehr müssen jeweils individuell die Anteile der Konstruktionsumfänge eingeordnet werden: Während bestimmte Funktionseinheiten je nach Zielstellung mithilfe eines neuen Lösungsprinzips entwickelt werden (Prinzipvariation), können andere Teilsysteme meist auf der Basis existierender Lösungsprinzipien neu gestaltet werden (Gestaltvariation)²⁹.

Nach diesem Modell setzt sich eine neue Produktgeneration (G_{n+1}) zusammen aus: Einer Menge von Teilsystemen (TS), die bei möglichst geringen Anpassungen übernommen werden (ÜS); einer Menge von neuentwickelten TS durch Gestaltvariation (GS) und einer Menge von neuentwickelten TS durch Prinzipvariation (PS)³⁰:

$$\mathbf{ÜS}_{n+1} \{TS|\mathbf{ÜV}_{(TS)}\}; \mathbf{GS}_{n+1} \{TS|GV_{(TS)}\}; \mathbf{PS}_{n+1} \{TS|PV_{(TS)}\}^{31}$$

$$\text{Damit gilt: } G_{n+1} = \mathbf{ÜS}_{n+1} \cup \mathbf{GS}_{n+1} \cup \mathbf{PS}_{n+1}^{32}$$

Auf der Basis der Forschungsarbeiten zur PGE-Produktgenerationsentwicklung können neue Methoden, Prozesse und Werkzeuge für eine Produktentwicklung erforscht werden. Unternehmen sollten damit in die Lage versetzt werden, sowohl Produkte mit sehr hohen Neuentwicklungsanteilen auf Basis der Prinzipvariation, als auch Produkte mit hohen Neuentwicklungsanteilen auf Basis der Gestaltvariation erfolgreich umsetzen zu können.

²⁷ Albers et al. 2015

²⁸ Albers et al. 2015

²⁹ Albers et al. 2015

³⁰ Albers et al. 2015

³¹ Albers et al. 2016a

³² Albers et al. 2016a

2.1.2 Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM)

Seit der Industrialisierung werden Prozesse und Modelle entwickelt, um die Produktentstehung effizient und erfolgreich zu gestalten³³. Die VDI-Richtlinie 2221³⁴, das Stage-Gate-Modell von Cooper³⁵, das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206³⁶ und die integrativen Ansätze nach Ehrlenspiel³⁷ sind die zurzeit bekanntesten Prozessmodelle. Jedoch wird die Entwicklungsmethodik aus Praxissicht als zu kompliziert und zu theoretisch angesehen. Darüber hinaus hängt die Effizienz der Methoden und Prozesse stark von den situativen und kontextbezogenen Faktoren jedes individuellen Produktentstehungsprozesses ab und lässt sich nicht pauschal als optimal festlegen³⁸. Daher müssen die Methoden und Prozesse immer an sich ändernde Randbedingungen und stetig steigende Komplexität angepasst werden.

Ausgehend von den fünf zentralen Hypothesen wurde das integrierte Produktentstehungsmodell - iPeM von ALBERS am IPEK entwickelt, implementiert und im Kontext von neuen Forschungsergebnissen stets optimiert³⁹ (siehe Bild 2-3). Das iPeM ist ein Metamodell und umfasst alle für die Produktentwicklung notwendigen Elemente, um jeden individuellen Produktentstehungsprozess beschreiben zu können. Basierend auf der Systemtheorie besteht das iPeM aus Zielsystem, Objektsystem und Handlungssystem, welches durch Aktivitätenmatrix, Ressourcensystem und Phasenmodell beschrieben wird. Im Gegensatz zu klassischen Vorgehens- und Prozessmodellen ist kein allgemeingültiger Prozess vorhanden, sondern es kann ein individueller Prozessverlauf mittels des Metamodells für jede Produktentstehung geplant und gesteuert werden.

³³ Meboldt 2008

³⁴ VDI 2221

³⁵ Cooper 1994

³⁶ VDI 2206

³⁷ Ehrlenspiel 2009

³⁸ Meboldt 2008

³⁹ Albers / Meboldt 2007

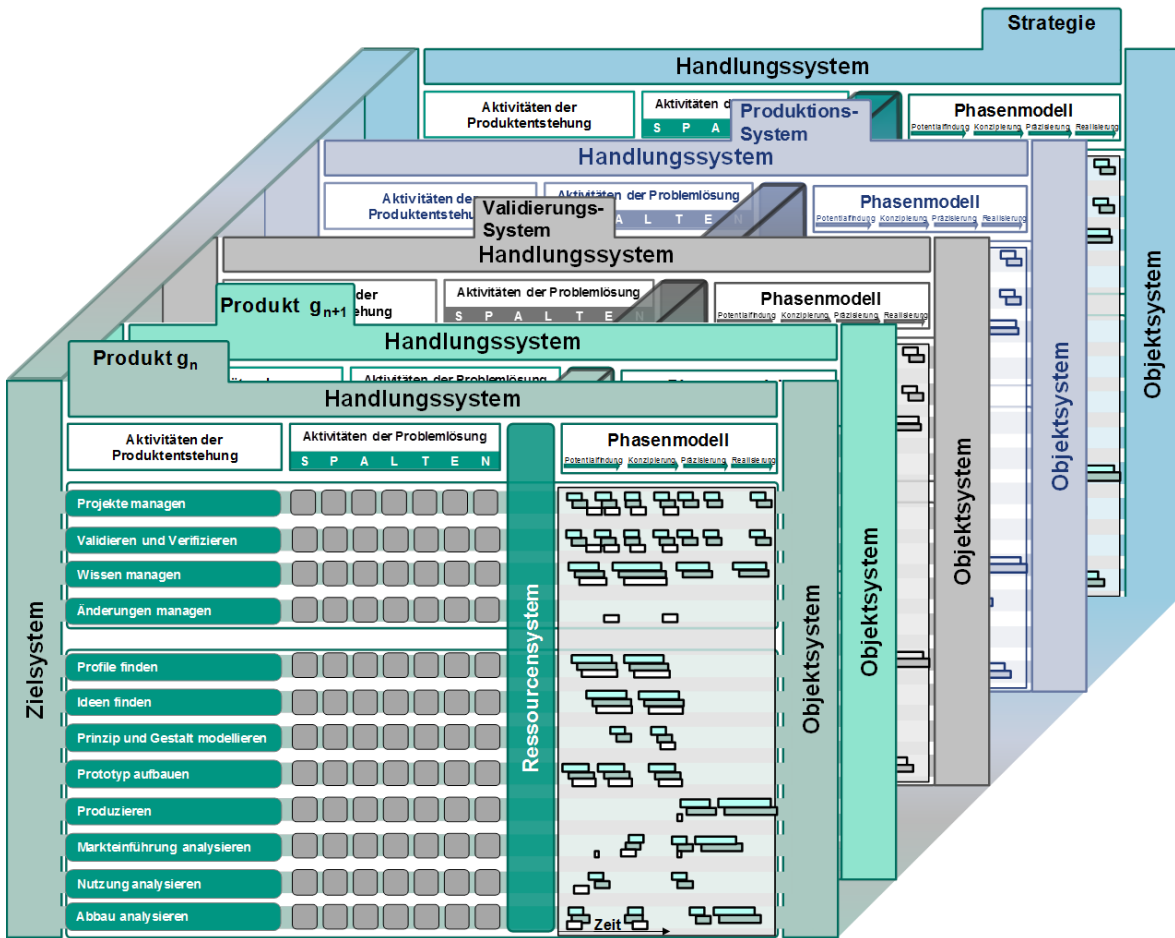


Bild 2-3: Schematische Darstellung des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM)⁴⁰

Im Kontext von der Produktgenerationsentwicklung wurde das iPeM auf mehreren Layers erweitert, die aus den Methoden für die Produktentwicklung und Produktgenerationsentwicklung (Produkt, Strategie, Produktionssystem und Validierungssystem) und den einzelnen Produktgenerationen bestehen⁴¹.

Die **Aktivitätenmatrix** enthält die Aktivitäten der Produktentstehung und die Aktivitäten der Problemlösung. Die Aktivitäten der Produktentstehung bestehen aus zwei Cluster, bzw. Cluster „Aktivitäten der Produktentwicklung“ und Cluster „Basis Aktivitäten“⁴². Die Aktivitäten der Problemlösung bestehen aus dem universell einsetzbaren Problemlösungsprozess SPALTEN, der die verschiedenen Randbedingungen und Komplexitätsgrade bei der Problemlösung berücksichtigt. SPALTEN steht als Akronym für: **S**ituationsanalyse, **P**roblemeingrenzung, **A**lternative Lösungssuche, **L**ösungsauswahl, **T**ragweitenanalyse, **E**ntscheiden und Umsetzen, **N**achbereiten und Lernen⁴³.

⁴⁰ Albers et al. 2016b
⁴¹ Albers et al. 2016b
⁴² Albers et al. 2016b
⁴³ Albers et al. 2005

Das **Ressourcensystem** umfasst sowohl Mitarbeiter als auch für die Entwicklung verfügbares Budget sowie Information und Arbeitsmittel, z.B. Material, Prüfstände und Maschinen, etc.

Im **Phasenmodell** werden die Aktivitäten der Produktentstehung als Phasen auf einem Zeitstrahl abgebildet. In jeder Phase werden verschiedene Aktivitäten und teilweise auch parallel ablaufende Aktivitäten mit bestimmter zeitlicher Dauer in Form von Balken dargestellt. Dieses Modell ist dynamisch und kann an die individuellen Projektsituationen angepasst werden. Für ein konkretes Projekt kann anhand eines spezifischen Referenzprozessmodells je nach Entwicklungsaufgabe und verfügbaren Ressourcen ein Implementierungsmodell erstellt und umgesetzt werden. Während der Durchführung des Projekts werden die Veränderungen des am Projektanfang erstellten Implementierungsmodells und der reale Produktentstehungsprozess als Anwendungsmodell aufgezeichnet, um das Referenzprozessmodell kontinuierlich zu verbessern⁴⁴.

2.1.3 Erweitertes ZHO-Modell

Basierend auf dem ZHO-Modell der Systemtechnik wurde am IPEK ein erweitertes Modell entwickelt, das den Entwickler als denkenden und handelnden Menschen im Mittelpunkt des Produktentstehungsprozesses beschreibt (vgl. Bild 2-4)^{45, 46}. Im erweiterten ZHO-Modell wird der Mensch bzw. der Entwickler als Handlungssystem beschrieben.

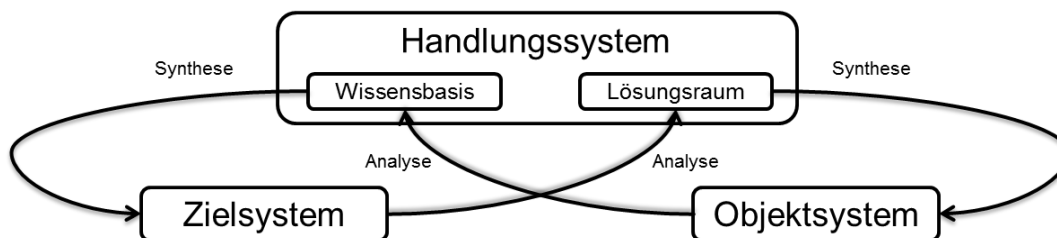


Bild 2-4: Erweitertes ZHO-Modell^{47,48}

Ausgehend von der individuellen Wissensbasis des Entwicklers wird das Zielsystem definiert. Durch Analyse des Zielsystems wird ein individueller Lösungsraum auf Basis der Wahrnehmung und Interpretation des Entwicklers erstellt. Die Lösungen entstehen zunächst in Form mentaler Modelle der Entwickler und werden dann als virtuelle oder physische Objekte umgesetzt und analysiert. Somit wird neues Wissen generiert, das die Wissensbasis des Entwicklers erweitert und dazu hilft, das

⁴⁴ Düser 2010

⁴⁵ Albers et al. 2012

⁴⁶ Lohmeyer 2013

⁴⁷ Albers et al. 2013a

⁴⁸ Albers et al. 2012

Zielsystem weiter zu verfeinern. Dieser Prozess wiederholt sich bis das Ziel- und Objektsystem übereinstimmt und keine weitere Veränderung notwendig ist⁴⁹.

2.1.4 Validierung und Verifizierung im Produktentstehungsprozess

Nach der dritten Hypothese von ALBERS stellt die Validierung die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess dar. Eine zentrale und stets wiederkehrende Herausforderung im Produktentstehungsprozess besteht in der umfassenden Verifizierung und Validierung der Produkteigenschaften^{50, 51}. ALBERS sieht die Verifizierung als einen Bestandteil der Validierung (vgl. Bild 2-5). Durch Verifizierung wird überprüft, ob die Eigenschaften des entwickelten Systems die definierten Anforderungen erreichen. D.h. es wird beurteilt, *ob ein System richtig entwickelt*⁵² wurde. Bei der Validierung wird darüber hinaus beurteilt, ob die Anforderungen den Kundenwünschen wirklich entsprechen. D.h. durch Validierung wird die Frage beantwortet, *ob ein richtiges System entwickelt*⁵³ wurde. Dementsprechend müssen die zu validierenden Systeme immer unter realistischen Bedingungen, orientiert an den Kundenwünschen, untersucht werden. Somit kann die Validierung nicht nur als ein formaler Abgleich zwischen dem Produkt und der Spezifikation verstanden werden, sondern der Prozess zur Gewinnung der Spezifikation muss hierbei ebenfalls überprüft werden, wobei auch subjektive Kriterien zu berücksichtigen sind⁵⁴.

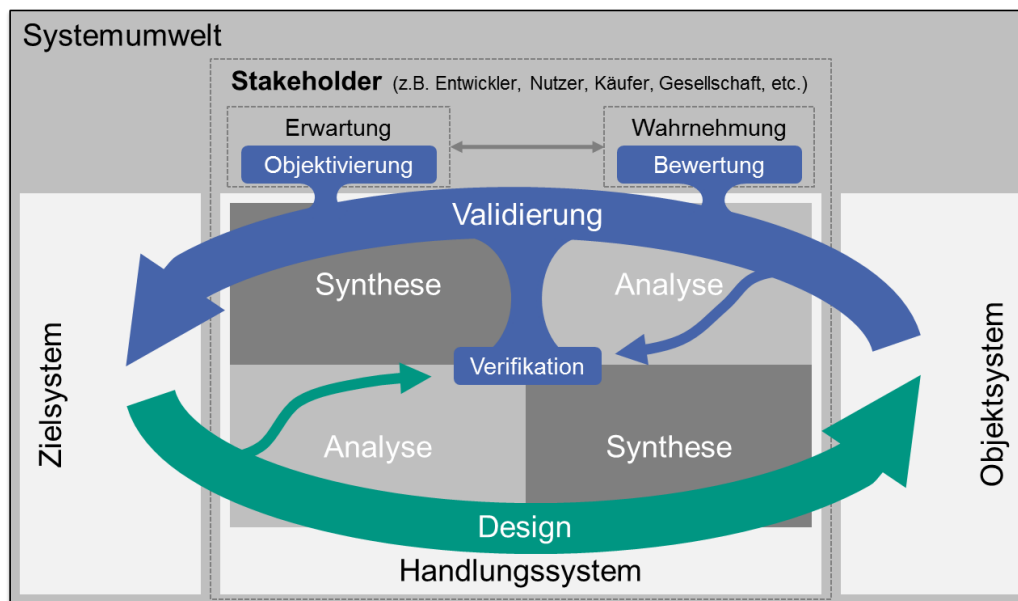


Bild 2-5: Verifizierung und Validierung im Zusammenhang mit ZHO-Systemtripel und Systemumwelt⁵⁵

⁴⁹ Lohmeyer 2013

⁵⁰ Albers / Düser 2011

⁵¹ Albers et al. 2016c

⁵² VDI 2206

⁵³ VDI 2206

⁵⁴ Albers et al. 2016c

⁵⁵ Albers et al. 2016c

2.1.5 IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz

In der Entwicklung eines komplexen Produkts müssen unterschiedliche und sogar konfliktäre Anforderungen und Kundenwünsche gleichzeitig berücksichtigt werden. Darüber hinaus steigt die Komplexität der Validierungsmethoden und Werkzeuge mit der steigenden Komplexität des Produkts. Außerdem müssen bei der Validierung eines Produkts die mit dem Produkt interagierenden Systeme bzw. Umwelt und Nutzer in Betracht gezogen werden. Um diesen Herausforderungen in der Produktentwicklung gerecht zu werden, wurde ein durchgängiger Validierungsansatz, der sog. IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz^{56,57} (Abkürzung: IPEK-XiL-Ansatz) von ALBERS et al. entwickelt und implementiert. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Fahrzeugentwicklung liegt, wird im Folgenden der IPEK-XiL-Ansatz am Beispiel der Validierung in der Fahrzeugentwicklung vorgestellt.

In der Fahrzeugentwicklung müssen unterschiedliche Aspekte, wie z.B. Sicherheit, CO₂-Ausstoß, NVH und Fahrbarkeit, Energieeffizienz, Haltbarkeit und Kosten, etc., gleichzeitig berücksichtigt werden⁵⁸. Weiterhin müssen bei der Validierung des Fahrzeugsystems die drei interagierenden Systeme, System „Fahrzeug“, System „Umwelt“ und System „Fahrer“, gemeinsam betrachtet werden^{59,60} (Bild 2-6).



Bild 2-6: Drei interagierende Systeme⁶¹

⁵⁶ Albers et al. 2016c

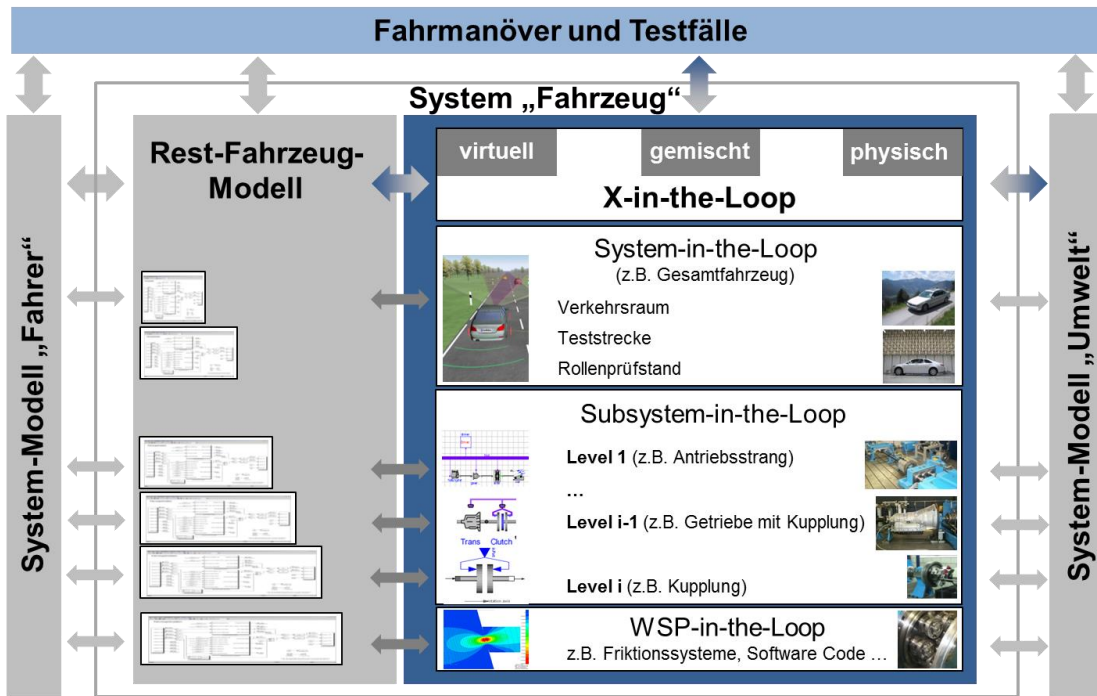
⁵⁷ Albers / Düser 2009

⁵⁸ Düser 2010

⁵⁹ Albers / Düser 2009

⁶⁰ Albers et al. 2016c

⁶¹ Albers / Düser 2009

Bild 2-7: IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz⁶²

Das Bild 2-7 stellt den IPEK-XiL-Ansatz am Beispiel der Fahrzeugentwicklung dar. Das „X“ ist hierbei definiert als: *das physische und/oder virtuelle (Teil-)System, welches im Fokus einer spezifischen Validierungsaktivität ist und über welches dabei Erkenntnisse gewonnen werden sollen*⁶³. Aus Sicht des Entwicklers bzw. Entwicklungsteams lässt sich das „X“ als System-in-Development (SiD) verstehen⁶⁴. Im Vergleich zu dem klassischen Hardware-in-the-Loop⁶⁵ kann das SiD sowohl virtuelle Modelle als auch physische Prototypen sein. Je nach Detaillierungsgrad befindet sich das SiD in verschiedenen Layern von Gesamtfahrzeug über Subsystem bis hin zu Wirkflächenpaar. Für jeden Layer wird das Restfahrzeugmodell in entsprechender Detailtiefe virtuell oder physisch simuliert und integriert, damit das SiD unter realitätsnahen Bedingungen und unter den beeinflussenden Wechselwirkungen untersucht werden kann. Um das SiD am Kundenwunsch orientiert zu untersuchen, werden das System „Fahrer“ und das System „Umwelt“ ständig einbezogen. Außerdem müssen alle Untersuchungen unter anwendungsspezifischen Fahrmanövern und Testfällen durchgeführt werden. Darüber hinaus können das System-Modell „Fahrer“, System-Modell „Umwelt“, Restfahrzeugmodell und sogar die Fahrmanöver und Testfälle je nach Entwicklungsziel als SiD betrachtet werden.

⁶² Albers et al. 2016c⁶³ Albers et al. 2016c⁶⁴ Albers et al. 2016c⁶⁵ Brendecke 2002

2.2 Verteilte Produktentwicklung

Die Entwicklung komplexer Produkte erfordert immer spezialisiertes Wissen in mehreren Fachgebieten. Diese lässt sich oftmals nicht von einer Einzelperson bearbeiten, sondern muss auf verschiedene Partner verteilt werden. Daher stellt der Begriff „Verteilte Produktentwicklung“ (Abkürzung: VPE) ursprünglich die Arbeitsteilung bei der Produktentwicklung dar⁶⁶.

2.2.1 Arbeitsteilung

Seit 1919 wurde die Trennung von Arbeitsausführung und Leitung von TAYLOR eingeführt. Die Leitung versteht TAYLOR als die Verwaltungsorgane, die den Arbeitsablauf im Unternehmen anleiten. Für einzelne Arbeitselemente werden das am besten geeignete Personal von der Leitung ausgewählt und ausgebildet, um die Effektivität und Effizienz der Arbeitsabläufe zu gewährleisten. Bei komplexen Aufgabenstellungen ist die Aufgabenteilung unbedingt notwendig, damit die Aufgabenstellungen effektiv und effizient bewältigt werden können⁶⁷. Nach TAYLOR ist die Betriebsführung als Wissenschaft angesehen⁶⁸. Auch PAHL et al. und EHRENSPIEL betrachten die Bewältigung komplexer Aufgabenstellungen in der Produktentwicklung als arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse. Des Weiteren sehen sie in der Arbeitsteilung die Grundlage zur Bewältigung der Komplexität der Produktentwicklung^{69,70}. Nach FRANKENBERGER schließt die Produktentwicklung die Bewältigung verteilter Teilaufgaben in der unternehmensweiten Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Abteilungen ein⁷¹. Daher stellt Gruppenarbeit ein Merkmal der Produktentwicklung dar⁷².

WELP erläutert den internen und externen Bezug der Produktentstehung. Der Einfluss von interner Organisationsstruktur auf den Ablauf des Produktentstehungsprozesses wird als interner Bezug betrachtet. Die Beziehungen zwischen dem Hersteller eines Produktes, seinen Zulieferern und Kunden weisen den externen Bezug der Produktentstehung auf⁷³. Auch KRAUSE sieht die Notwendigkeit der Kooperation zwischen Herstellern und Zulieferern⁷⁴. Außerdem beschreibt KRAUSE die verteilte Produktentwicklung als die kooperative Bearbeitung unterschiedlicher Teilaufgaben der Produktentwicklung⁷⁵. Die VPE ist durch das gemeinschaftliche Lösen einer Gesamtproblemstellung sowie den dafür notwendigen

⁶⁶ Kern 2005

⁶⁷ Gierhardt 2001

⁶⁸ Taylor / Volpert 1977

⁶⁹ Pahl / Beitz 2005

⁷⁰ Ehrlenspiel 2009

⁷¹ Frankenberger 1997

⁷² Gierhardt 2001

⁷³ Welp 1996

⁷⁴ Krause et al. 1994

⁷⁵ Krause et al. 1994

Informationsaustausch zwischen den Beteiligten und die Integration der Teillösungen gekennzeichnet⁷⁶. Heutzutage werden diese Merkmale durch eine räumliche Trennung erweitert, d.h. die Interaktionen der Partner können über größere räumliche Distanz stattfinden⁷⁷. Weiterhin kann die VPE unternehmensintern bzw. zwischen Entwicklern an verschiedenen Standorten, aber auch unternehmensübergreifend stattfinden.

2.2.2 Betrachtungen der VPE

Um die Komplexität der VPE zu verstehen und dadurch systematische Vorgehensweisen bereitzustellen, werden in diesem Abschnitt die Ausprägungen und Betrachtungen der VPE aus unterschiedlichen Perspektiven vorgestellt.

2.2.2.1 Ausprägungen der VPE

Die zu überwindende Distanz in der VPE besteht nicht nur aus geographischer und zeitlicher Trennung, sondern auch aus sozialer Distanz und unternehmensbedingter Distanz. LARSSON et al. betrachten die kulturellen Unterschiede und Zeitunterschiede als wichtige Einflüsse und Herausforderungen⁷⁸. Des Weiteren wird die Wichtigkeit der organisatorischen Dimensionen von KATZY hervorgehoben⁷⁹. Basierend auf diesen Kenntnissen lässt sich die Ausprägung der VPE zwischen zwei Partnern nach KERN durch kulturelle Distanz und unternehmensbedingte Distanz charakterisieren (vgl. Bild 2-8)⁸⁰. Auf der X-Achse wird die unternehmensbedingte Distanz dargestellt. Die Y-Achse beschreibt die durch Partnerherkunft bestimmte kulturelle Distanz. Je mehr sich die Partner in unterschiedlichen Dimensionen voneinander unterscheiden, desto größer sind die Distanzen zwischen den Partnern⁸¹. Allerdings gilt diese Aussage nur bei erstmaliger Kooperation zwischen zwei Partnern. Die Distanzen können durch langfristige Zusammenarbeit verkürzt werden.

⁷⁶ Krause et al. 1994

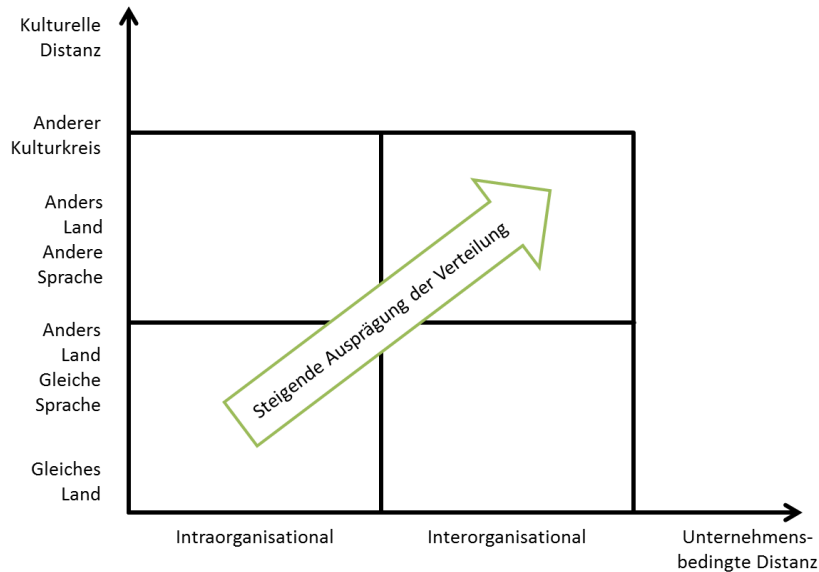
⁷⁷ Gierhardt 2001

⁷⁸ Larsson et al. 2003

⁷⁹ Katzy et al. 2000

⁸⁰ Kern 2005

⁸¹ Kern 2005

Bild 2-8: Charakterisierung der Ausprägung der VPE⁸²

2.2.2.2 Wesentliche Aspekte zur VPE

Zur Durchführung der Zusammenarbeit über eine gewisse Distanz hinweg sind die Kommunikation und der Informationsaustausch zwischen den Partnern erforderlich. Nach WELP, KRAUSE und SELIGER sind Kommunikation und Informationsaustausch die grundlegende Problemstellung der Kooperation^{83, 84}. Außer der Kommunikation stellt KRAUSE noch die Integration der Teillösungen (Koordination) sowie auf Prozess- und Organisationsebene das Lösen der Teilaufgaben (Kooperation) als die zentralen Aspekte der verteilten Produktentwicklung dar⁸⁵. In zahlreichen Projekten und Forschungen wird die VPE mit unterschiedlichen Fokussen betrachtet. Beispiele dafür sind VAJNA und SOSA, die sich auf die Kommunikation und das Wissensmanagement in der VPE fokussieren. In^{86, 87} werden die Kommunikation und der Wissensaustausch in der VPE als die Schlüsselfaktoren der VPE angesehen. Teamentwicklung als ein essentieller Bestandteil des Produktentwicklungsprozesses wird oftmals erforscht. PICOT betrachtet die Optimierung der Verteilung und Vernetzung von Entwicklungsressourcen⁸⁸. Neben dem Projektmanagement wird die Wichtigkeit der gesamten Organisation von DÜR MÜLLER betont. Die gesamte Organisation umfasst nach DÜR MÜLLER verschiedene thematische Schwerpunkte, wie die Kultur, das

⁸² Kern 2005

⁸³ Welp 1996

⁸⁴ Seliger et al. 1997

⁸⁵ Krause et al. 1994

⁸⁶ Vajna / Marosvary 2004

⁸⁷ Sosa et al. 2002

⁸⁸ Picot et al. 2003

Führungs- und Organisationsmodell, Projektportfolio und Ressourcenmanagement sowie Projektmanagement (vgl. Bild 2-9)⁸⁹.

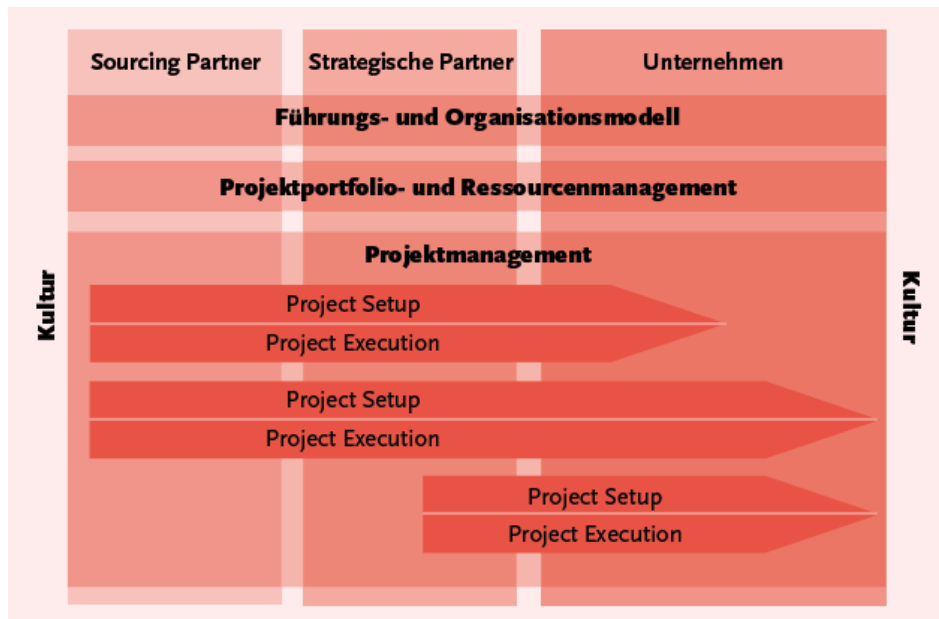


Bild 2-9: Verschiedene thematische Schwerpunkte bei VPE⁹⁰

2.2.2.3 Umfassende Beschreibungen der VPE

Auf Basis der örtlichen Aspekte und spezieller Erfahrungen, die aus langjähriger Forschung und zahlreichen Projekten gewonnen sind, wurden verschiedene umfassende Beschreibungsmodelle der VPE entwickelt. Diese Modelle bieten eine komplette Übersicht von VPE, damit die Entwicklungsaufgaben und die Gestaltung der Organisation miteinander verknüpft werden können. Weiterhin werden eine systematische Berücksichtigung der Charakteristiken aller teilnehmenden Projektpartner und deren Wechselwirkungen dadurch ermöglicht.

3-Dimensionen Modell nach KERN

KERN stellt drei Gestaltungsdeterminanten der VPE dar - Entwicklungsaufgabe, Partnercharakteristika und Kooperationsgestaltung⁹¹. Darauf basierend lässt sich die VPE mit drei Dimensionen, der Interaktion, Verteilung sowie der Integration, umfassend beschreiben (vgl. Bild 2-10). Die Interaktion umfasst die Kollaboration, Kooperation, Koordination und Kommunikation⁹² und ist durch das Ziel der Interaktion, Richtung und Häufigkeit der Interaktion sowie Reichhaltigkeit der übermittelten Information gekennzeichnet⁹³. Zur Erstellung einer konkreten und situationsspezifischen Gestaltung der VPE ist es notwendig, den individuellen

⁸⁹ Dürmüller 2007

⁹⁰ Dürmüller 2007

⁹¹ Kern 2005

⁹² Kern 2005

⁹³ Wheelwright et al. 1994

Verteilungszustand näher zu charakterisieren. Die typischen Probleme und deren Auswirkungen, die aus räumlicher oder sozialer sowie unternehmensbedingter Distanz resultieren können, sind in⁹⁴ umfassend erläutert. Als dritte Dimension beinhaltet die Integration auf verschiedenen Ebenen alle Elemente zur Zusammenführung der teilnehmenden Partner zu einer Einheit.

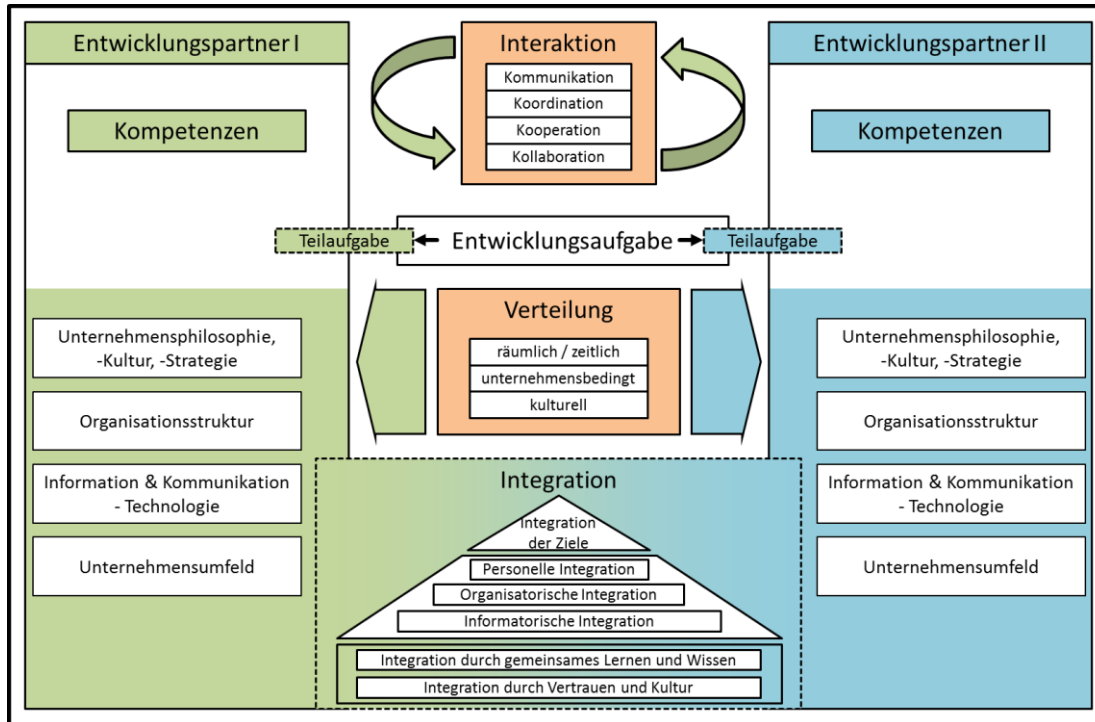


Bild 2-10: Modell zur Beschreibung der VPE nach Kern⁹⁵

Kooperationsmodell der verteilten Produktentwicklung nach GIERHARDT

Aus Prozesssicht versteht GIERHARDT den Begriff der VPE als die Kombination und Konfiguration der Prozesselemente, die Menschen, Material, Aktivitäten, Methoden sowie Werkzeuge einschließen, zwecks der effektiven und effizienten Entwicklung von Produkten⁹⁶. Nach GIERHARDT wird die VPE durch zwei zentrale Elemente charakterisiert (Bild 2-11). Das erste Element sind die Entwicklungspartner, die durch fünf Ebenen, die Prozess-, Organisations-, Produkt-, Wissen- und Zielebene, beschrieben werden können. Das zweite Element ist der Verteilungsraum. Der wesentliche Bestandteil des Verteilungsraums ist die Verständigung, die durch Information als Inhalt und Kommunikation als Übertragungsprozess repräsentiert wird. Als zweites Element bestimmt der Verteilungsraum, wer welche Prozessphasen der Produktentwicklung, mit welchem Inhalt, wann und wo durchführt und so die Produktinformationen generiert, verarbeitet und weiterleitet⁹⁷.

⁹⁴ Kern 2005

⁹⁵ Kern 2005

⁹⁶ Gierhardt 2001

⁹⁷ Gierhardt 2001

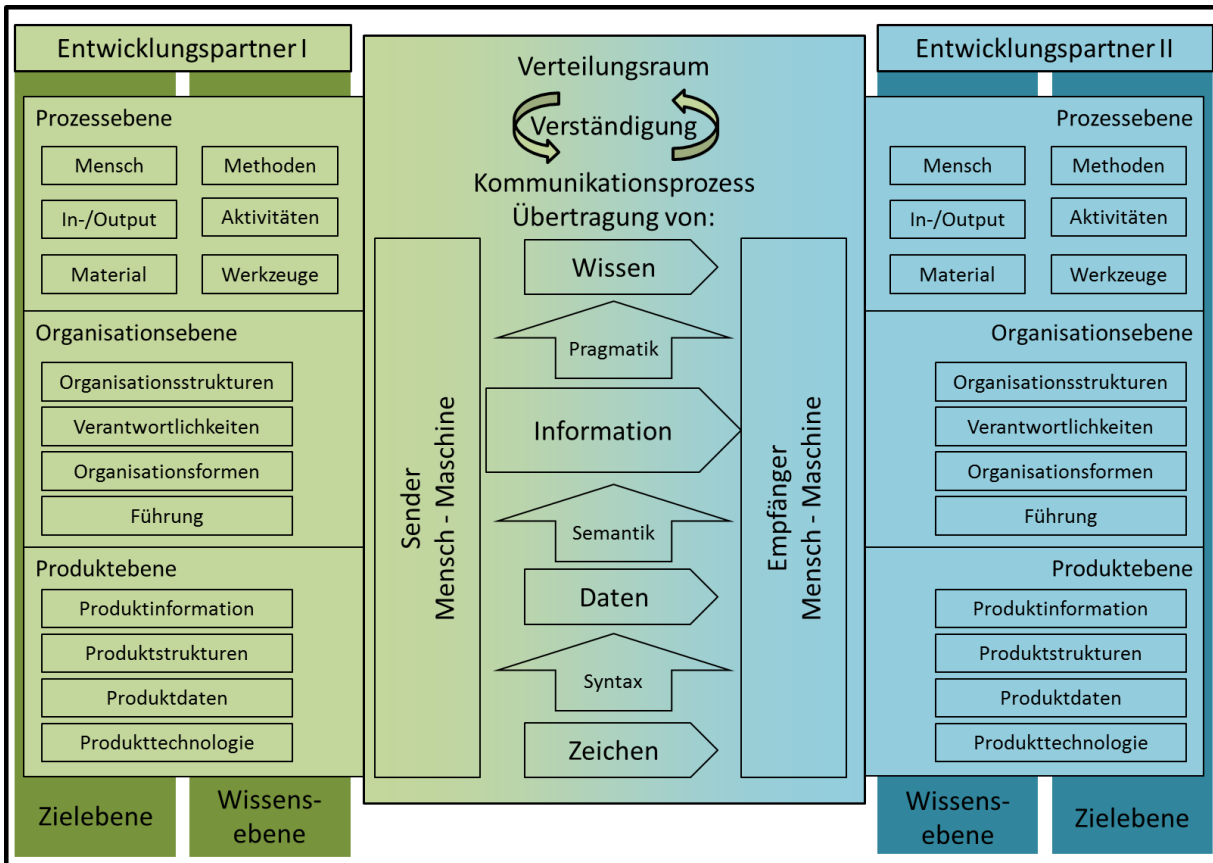


Bild 2-11: Kooperationsmodell der verteilten Produktentwicklung nach Gierhardt⁹⁸

Der individuelle Verteilungszustand jedes Entwicklungsprozesses lässt sich durch verschiedene Merkmale und deren Ausprägungen detailliert beschreiben. Basierend auf diesen Überlegungen wurde ein Merkmalsystem entwickelt, womit der Verteilungszustand in der VPE charakterisiert werden kann (vgl. Tabelle 2-1)⁹⁹. Aus dem anhand des Merkmalsystems generierten charakteristischen Profil der VPE können die typischen Problemstellungen, die im Ablauf des Entwicklungsprozesses geschehen können, mittels einer aus Praxiserfahrungen und Literaturquellen zusammengestellten Problemliste frühzeitig ermittelt werden. Aus theoretischen Überlegungen und Erfahrungen aus Projekten wird eine Gewichtung nicht nur für ein einzelnes Problem, sondern auch für jedes Merkmal je nach Ausprägung vorgenommen, da die Ursachen desselben Problems in mehreren Merkmalen liegen können. Mittels dieser gewichteten Liste können die mit großer Wahrscheinlichkeit auftretenden Probleme sowie die Merkmale, die die meisten Probleme verursachen, identifiziert werden¹⁰⁰. Ebenfalls können die Randbedingungen mit Hilfe einer Checkliste untersucht werden. Unter Beachtung der Randbedingungen können den Problemen entsprechende Lösungsansätze und notwendige Ressourcen angepasst

⁹⁸ Gierhardt 2001

⁹⁹ Gierhardt 2001

¹⁰⁰ Gaul 2001

und zugeordnet werden oder die Ausprägungen der Merkmale verändert werden, um die Probleme zu vermeiden oder zumindest effektiv bewältigen zu können¹⁰¹. Um das Merkmalsystem einfach zu verwenden, wurde ein Software-Tool „MMS“ von GAUL entwickelt, mit dem der Anwender Schritt für Schritt durch die Erstellung des Verteilungsprofils geführt wird¹⁰². Die gewichtete Problemliste mit zugeordneten Lösungsvorschlägen wird automatisch generiert. Des Weiteren wurde ein Erfahrungsspeicher von ANDERL und OTT entwickelt, womit die aus der Durchführung der verteilten Projekte gewonnenen Erkenntnisse gespeichert und einfach in den weiteren Projekten benutzt werden können¹⁰³.

Tabelle 2-1 Merkmalsystem zur Charakterisierung des Verteilungszustandes der VPE^{104,105}

Merkmalsystem	Anmerkung	Ausprägung
Anzahl der Partner	Wie viele Entwicklungspartner kooperieren?	2, >2, unüberschaubar
Ort	An welchen geographischen Standorten befinden sich die verschiedenen Entwicklungspartner?	anderer Raum, anderer Standort, anderes Land
Zeit	In welcher zeitlichen Relation stehen die Entwicklungsaktivitäten der kooperierenden Partner?	parallel, sequentiell, Mischform
Sprache	Welche Sprache sprechen die Entwicklungspartner?	gleich, unterschiedlich
Organisation	Innerhalb welcher organisatorischen Einheit befinden sich die Entwicklungspartner?	gleiche Organisationseinheit, gleiches Unternehmen, unterschiedliche Unternehmen
Größe der Organisation	Wie groß ist die Organisation, der die verschiedenen Entwicklungspartner angehören?	kleines Unternehmen, mittleres Unternehmen, großes Unternehmen

¹⁰¹ Gaul 2001

¹⁰² Gaul 2001

¹⁰³ Anderl / Ott 2000

¹⁰⁴ Gierhardt 2001

¹⁰⁵ Gaul 2001

Intensität der Zusammenarbeit	Wie intensiv ist die Zusammenarbeit der verschiedenen Entwicklungspartner?	lose verknüpft, integriert
Komponentenverteilung	Werden Teilsysteme eines Gesamtsystems (eines Produktes) verteilt entwickelt und dann wieder zu einem Gesamtsystem zusammengefügt oder wird das Gesamtsystem als Ganzes bearbeitet wird?	ja / nein
Aufgabenverteilung	Werden Arbeitsaufgaben innerhalb des Entwicklungsprozesses von den Partnern verteilt bearbeitet?	ja / nein
Anzahl der Schnittstellen	Wie groß ist die Anzahl der Schnittstellen zwischen den Entwicklungspartnern aus organisatorischer, informationstechnischer sowie produkttechnischer Sicht?	gering, mittel, hoch
Informationszugriff	Ist der Zugriff der Entwicklungspartner auf alle relevanten Informationen zur Entwicklungsaufgabe sichergestellt?	nicht möglich, möglich
Kompetenz	Verfügt ein Partner über die zur Bearbeitung der Aufgabe benötigte Kompetenz?	gering, mittel, hoch
Kapazität	Sind die Ressourcen der verschiedenen Partner zur Lösung der Entwicklungsaufgabe ausreichend?	nicht ausreichend, ausreichend
Methodenkompatibilität	Sind die eingesetzten Methoden der Entwicklungspartner kompatibel?	ja / nein
Werkzeugkompatibilität	Sind die eingesetzten Werkzeuge der Entwicklungspartner kompatibel?	ja / nein

2.2.3 Strategische Konzepte zur Unterstützung der VPE

Zur Unterstützung der VPE wurden einige systematische Konzepte entwickelt, die sich in grundlegenden strategischen Konzepten und an bestimmten Aspekten orientierten spezifischen Methoden unterscheiden. Dieser Abschnitt zeigt die in der VPE vorrangig angewendeten strategischen Unterstützungskonzepte.

2.2.3.1 Concurrent Engineering (CE) und Simultaneous Engineering (SE)

Der Begriff des CE definiert nach WINNER einen systematischen Ansatz zur integrierten und parallelisierten Entwicklung der Produkte und damit relevanter Prozesse. Dies fordert die Entwickler zur Berücksichtigung aller Elemente des Produktlebenszyklus wie Qualität, Entwicklungszeit und -kosten sowie Kundenanforderungen auf¹⁰⁶.

Ausgangsidee des CE ist die Parallelisierung der traditionell sequentiell durchgeführten Arbeitsabläufe mit dem Ziel der Verkürzung von time-to-market sowie der Verringerung der Kosten und gleichzeitig der Verbesserung von Produktqualität¹⁰⁷. Die Parallelisierung der Arbeitsabläufe führt zu höherem Synchronisierungsbedarf und Koordinationsaufwand. Dazu sind folgende operative Maßnahmen von PRASAD und EVERSHEIM von Bedeutung¹⁰⁸

- frühzeitige Problemerkennung im Entwicklungsprozess,
- frühe und konsistente Entscheidungsfindung,
- frühzeitige Vereinigung von Planungswissen der indirekten Bereiche mit der Anwendungserfahrung der direkten Bereiche,
- strukturierte Arbeitsumgebung zur optimierten Zusammenführung und Abstimmung der Entwicklungsaufgaben entlang der parallelisierten Entwicklungsprozesse,
- konstante und konsistente Zielsetzungen auf Produkt-, Prozess- und Organisationsebene.

Weiterhin definiert PRASAD in¹⁰⁹ sieben korrelierenden Einflussfaktoren als Handlungsfelder zur Realisierung des Concurrent Engineering:

- *Tasks: die Entwicklungsaufgaben,*
- *Teams: die kooperative Problemlösung im Team,*
- *Talents: die Fähigkeiten der beteiligten Mitarbeiter,*
- *Technology: die eingesetzten Technologien zur Realisierung des Produktes,*
- *Tools: die zur Realisierung eingesetzten Werkzeuge,*
- *Techniques: die zur Realisierung eingesetzten Methoden und Techniken,*
- *Time: Verkürzung der Entwicklungszeit durch Parallelisierung der Aufgaben sowie die Abstimmung zwischen diesen Aufgaben.*

¹⁰⁶ Winner et al. 1998

¹⁰⁷ Albers 1994

¹⁰⁸ Prasad 1996

¹⁰⁹ Prasad 1996

Die Bezeichnung des Concurrent Engineering hat sich im amerikanischen Sprachraum durchgesetzt, wohingegen im europäischen Sprachraum die Bezeichnung Simultaneous Engineering verwendet wird¹¹⁰. SE stellt eine Strategie zur Überwindung von Effizienzsenken dar¹¹¹. Die Leitsätze, die die Richtung zur Gestaltung des Entwicklungsprozesses bestimmen und die Auswahl der geeigneten Maßnahmen ermöglichen, sind nach BULLINGER Parallelisieren, Standardisieren und Integrieren¹¹². Außerdem werden die interdisziplinären und institutionalisierten Teamarbeiten auch als ein wesentliches Element des SE betrachtet¹¹³.

Die Grundgedanken des CE / SE bilden die Grundlagen aller derzeit angewendeten Ansätze zur Gestaltung der VPE ab.

2.2.3.2 Integrierte Produkterstellung

Die integrierte Produkterstellung stellt nach EHRENSPIEL einen Lösungsansatz zur Überwindung der Probleme in der stark arbeitsteiligen Produkterstellung dar¹¹⁴. Schon alleine durch die Bezeichnung wird klar, dass die integrierte Produkterstellung auf dem „Leitbild der Integration“ basiert. Die Integration unterscheidet sich hierbei zwischen persönlicher, informatorischer und organisatorischer Integration¹¹⁵. Diese drei Integrationsebenen werden in verschiedene Teilbereiche untergliedert, womit die bereits verbreiteten Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung der Integration zugeordnet werden können. Dadurch entsteht das Kernelement – ein Methodensystem für die Integrierte Produkterstellung (vgl. Bild 2-12).

Zusammenfassend kann die integrierte Produkterstellung als eine Weiterentwicklung der Grundidee des CE / SE betrachtet werden. Sie beschreibt und vernetzt die Methoden und Werkzeuge zur Gesamtoptimierung der Produkterstellung und zieht die Sichten der Produktion, der Ressourcen und der Kunden in Betracht.

¹¹⁰ Gaul 2001

¹¹¹ Bullinger et al. 1997

¹¹² Bullinger et al. 1997

¹¹³ Bullinger et al. 1997

¹¹⁴ Ehrlenspiel 2009

¹¹⁵ Ehrlenspiel 2009



Bild 2-12 Arten und Methoden der integrierten Produkterstellung nach Ehrlenspiel¹¹⁶

2.2.4 Informations- und Kommunikationstechnische Unterstützung der VPE

Beim Produkterstellungsprozess ist es sehr wichtig, dass für Entscheidungen die richtigen Informationen zum richtigen Zeitpunkt zur Verfügung stehen¹¹⁷. Dabei kommt den Informationssystemen und Kommunikationssystemen eine große Bedeutung zu. Die Informationssysteme stellen die benötigten Informationen zur richtigen Zeit und am richtigen Ort zur Verfügung. Kommunikationssysteme hingegen unterstützen die Übermittlung der Informationen zwischen Entwicklungspartnern. Mit

¹¹⁶ Ehrlenspiel 2009

¹¹⁷ Ehrlenspiel 2009

Rücksicht auf den Umfang dieser Arbeit werden in diesem Kapitel nur die wichtigsten auf Informations- und Kommunikationstechnik basierten Ansätze und Konzepte vorgestellt.

2.2.4.1 Modelle der Netzwerkprotokolle

Ein Kommunikationssystem besteht aus Endsystemen, Transitsystemen und Übertragungsmedien¹¹⁸. Die Regeln für die logische und zeitliche Steuerung eines Kommunikationsablaufs werden Kommunikationsprotokoll genannt¹¹⁹. Handelt es sich um die Kommunikation im Rechnernetz, so nennt man es Netzwerkprotokoll. Zur Reduzierung des Realisierungsaufwandes und zur Weiterentwicklung müssen die verwendeten Netzwerkprotokolle standardisiert werden.

OSI-Referenzmodell

Das Open Systems Interconnection Model (OSI-Referenzmodell) wird von International Standardization Organization (ISO) und International Telecommunication Union (ITU) entwickelt, um die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Systemen zu ermöglichen und zu beschreiben¹²⁰. Das OSI-Modell ist ein gedankliches Modell, welches alle Teilaufgaben eines Kommunikationsvorgangs hierarchisch in sieben übereinander liegenden Schichten gliedert (Bild 2-13)¹²¹. Nach dem OSI-Modell basiert die offene Kommunikation auf folgenden Prinzipien¹²²:

- Die Kommunikationsteilaufgaben sind in Schichten gegliedert;
- jede Schicht stellt genau festgelegte Dienste für die direkt übergeordnete Schicht bereit;
- die Schicht N greift ausschließlich auf die Dienste der Schicht N-1 über die Dienstzugangspunkt zu;
- die Kommunikation zwischen zwei Bearbeitungseinheiten derselben Schicht in zwei Endsystemen oder Transitsystemen wird durch ein standardisiertes Protokoll festgelegt.

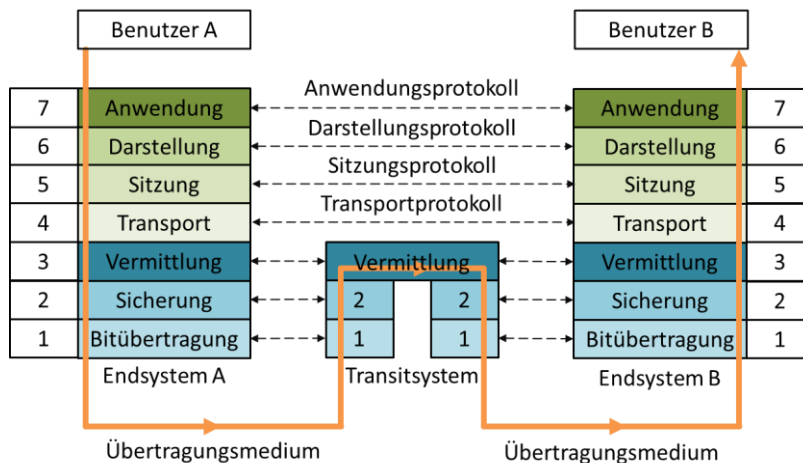
¹¹⁸ Nocker 2005

¹¹⁹ Nocker 2005

¹²⁰ ISO/IEC 7498-1: 1994

¹²¹ Nocker 2005

¹²² Nocker 2005

Bild 2-13 Informationsfluss beim OSI-Referenzmodell¹²³

Internet-Protokollfamilie

Die Internet- Protokollfamilie wurde aus der Arbeit von Advanced Research Project Agency (ARPA) entwickelt und im ARPANET verwendet. Nach der Entwicklung der zwei wesentlichen Protokolle TCP (Transmission Control Protocol) und IP (Internet Protocol) wurde die Internet-Protokollfamilie auch als TCP/IP-Referenzmodell bezeichnet. Nach dem TCP/IP-Modell sind die Protokolle in nur vier Schichten zugeordnet. Die Basis-Protokolle sind IP, TCP und UDP (User Datagramm Protocol).

IP gehört zur Netzwerkschicht, die die Übermittlung einzelner Datenpakete von einem Sender-Rechner zu einem Empfangs-Rechner ermöglicht. Um die Pakete richtig zuzustellen, enthalten die Pakete die Adressen von Sende-Rechner und Empfangs-Rechner¹²⁴. Aktuell wird meistens die IP Version 4 (IPv4) eingesetzt. Der Nachfolger IPv6 bietet eine größere Anzahl von Adressen (maximal 3.4×10^{38}) und wird zurzeit auch von zahlreichen Betriebssystemen und Anwendungen unterstützt. Bei IPv6 können im Header die Prioritäten vergeben und bei der Weiterleitung berücksichtigt werden, was die Realisierung der Echtzeitanwendungen erleichtert¹²⁵.

TCP und UDP sind die Protokolle in der Transportschicht und für die Transportdienste der einzelnen Datenpakete zwischen Softwareanwendungen zuständig. TCP realisiert einen zuverlässigen (mit Empfangsbestätigung) und verbindungsorientierten Transportdienst von einer Softwareanwendung auf einem Rechner zu einer Softwareanwendung auf einem Empfangs-Rechner. Verbindungsorientiert bedeutet, dass am Kommunikationsbeginn eine Verbindung zwischen beiden Parteien erstellt wird. Weil TCP für seine Transportdienste ausschließlich das IP benutzt, spricht man auch von TCP/IP-Protokollen. UDP

¹²³ Nocker 2005

¹²⁴ Nocker 2005

¹²⁵ Nocker 2005

realisiert hingegen einen verbindungslosen und unsicheren (ohne Empfangsbestätigung) Transportdienst. Im Vergleich zu TCP ist die Geschwindigkeit der Übertragung hier wichtiger als die Genauigkeit, was bedeutet, dass möglichst viele Datenpakete möglichst schnell gesendet werden.

Diese zwei unabhängig voneinander entwickelten Modelle sind die wesentlichsten Modelle für Netzwerkprotokolle. Allerdings verfolgen sie denselben Grundsatz: Der Kommunikationsvorgang wird in unabhängige Teilaufgaben aufgeteilt und zu Schichten zugeordnet. Für jede Schicht werden standardisierte Protokolle festgelegt (Bild 2-14). Das OSI-Modell wird häufig vorteilhaft für theoretische Überlegungen als Referenzmodell verwendet. Im Gegensatz dazu werden die TCP/IP-Protokolle in der Praxis mehr verwendet. Als Grundlage für das heutige Internet wird das TCP/IP-Modell allein schon wegen seiner Protokolle anerkannt.

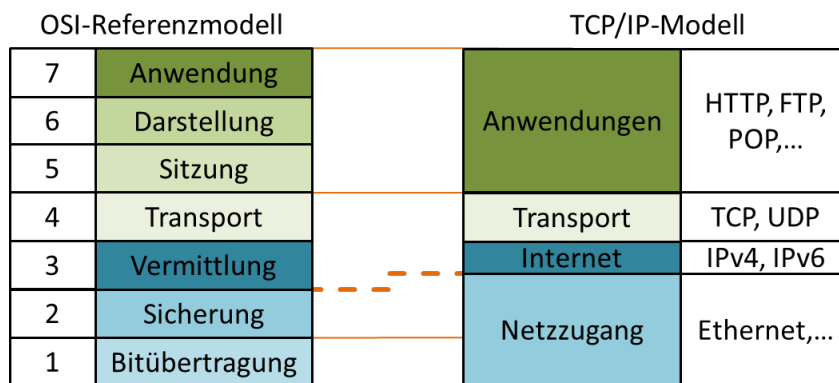


Bild 2-14: OSI-Referenzmodell und TCP/IP-Modell¹²⁶

2.2.4.2 Auswahl passender Methoden und Werkzeuge

Heutzutage stehen zahlreiche Methoden und Werkzeuge für die Kommunikation in der verteilten Produktentwicklung zur Verfügung. Allerdings sollen für jede spezifische Situation geeignete Methoden und Werkzeuge zum Einsatz kommen. Zur Unterstützung dieser Auswahl wurde ein Konzept von ALBERS et al. entwickelt¹²⁷. Anhand dieses Konzepts wird zuerst ein Modell erstellt, welches die Situationen durch Aktivitäten und die Werkzeuge durch Eigenschaften beschreibt. Anschließend werden diese Aspekte systematisch miteinander verbunden. Zusätzliche Elemente des Modells beziehen sich unter anderem auf die Möglichkeit der Kombination verschiedener Werkzeuge oder Ressourcen. Basierend auf diesem Modell werden Methoden für die Auswahl der Werkzeuge sowohl auf strategischer als auch auf operativer Ebene entwickelt.

¹²⁶ Nocker 2005

¹²⁷ Albers et al. 2016e

Hiermit basiert die Beschreibung einer Situation auf den Aktivitäten, die in dieser Situation ausgeführt werden. Um die Aktivitäten im Detail zu beschreiben, wird die gleiche Definition verwendet, die auch als eine Basis vom iPeM dient: Eine Aktivität besteht aus einer Aktion, einer ausführenden Ressource, einer nutzbaren Ressource und einer chronologischen Verbindung¹²⁸. Außerdem lässt sich eine Situation durch die Charaktere von Gruppen der Beteiligten beschreiben. „Nutzbare Ressourcen“ stellt die verwendeten Medien dar, die in diesem Konzept durch allgemeine Merkmale bezeichnet werden¹²⁹.

Eine weitere Herausforderung der standortübergreifenden Zusammenarbeit stellt die Verwendung entsprechender Entwicklungsmethoden dar, da die Integration der Methoden wie der 6-3-5-Methode oder des Brainwriting Pools in Softwaretools bislang nicht umgesetzt ist¹³⁰. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen die Entwicklungsprozesse, Entwicklungsmethoden und Softwaretools für standortenübergreifende Entwicklungsteams anhand der Entwicklung eines technischen Systems ganzheitlich betrachtet werden¹³¹ (Bild 2-15).

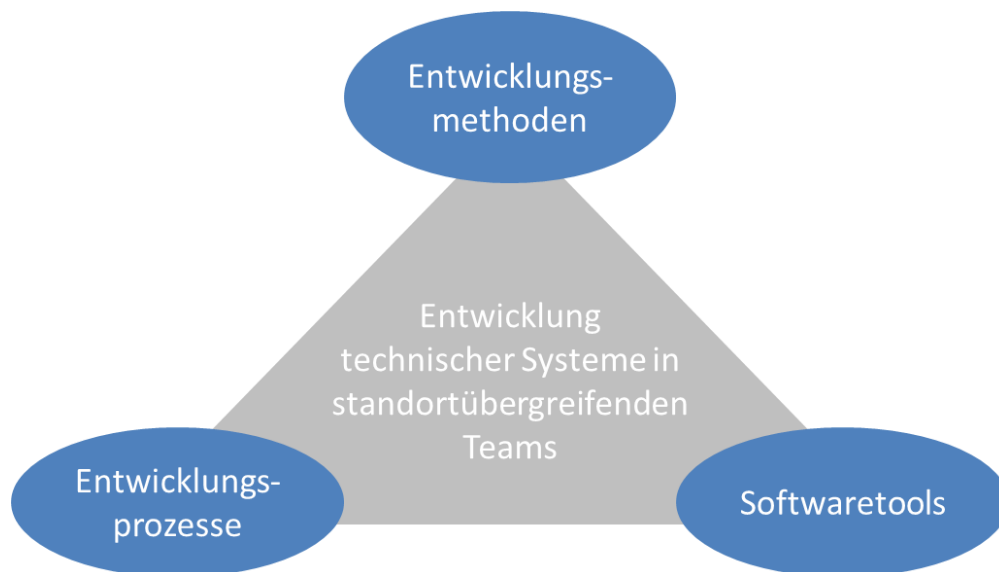


Bild 2-15 Ganzheitliche Betrachtung zur Produktentwicklung in standortübergreifenden Teams nach Albers¹³²

2.2.4.3 Spezifische Ansätze und Konzepte zur Unterstützung der Kommunikation und des Informationsaustauschs

Die Kommunikation und der Informationsaustausch können danach klassifiziert werden, ob die Kommunikationspartner sich am selben Ort befinden und ob sie

¹²⁸ Walter et al. 2016

¹²⁹ Walter et al. 2016

¹³⁰ Albers et al. 2016e

¹³¹ Albers et al. 2016e

¹³² Albers et al. 2016e

gleichzeitig anwesend sind (siehe Bild 2-16)¹³³. Ziel dabei ist, die optimale Kommunikationsart einer bestimmten Situation zuzuordnen. Hierzu bietet heutzutage CSCW (Computer Supported Cooperative Work) auf Basis der sich rasend entwickelnden Informations- und Kommunikationstechnologie immer mehr Möglichkeiten. Das folgende Teilkapitel zeigt die Ansätze, die sich schwerpunktmäßig mit der Verbesserung der Kommunikation und Informationsstruktur zwischen Entwicklungspartnern befassen.

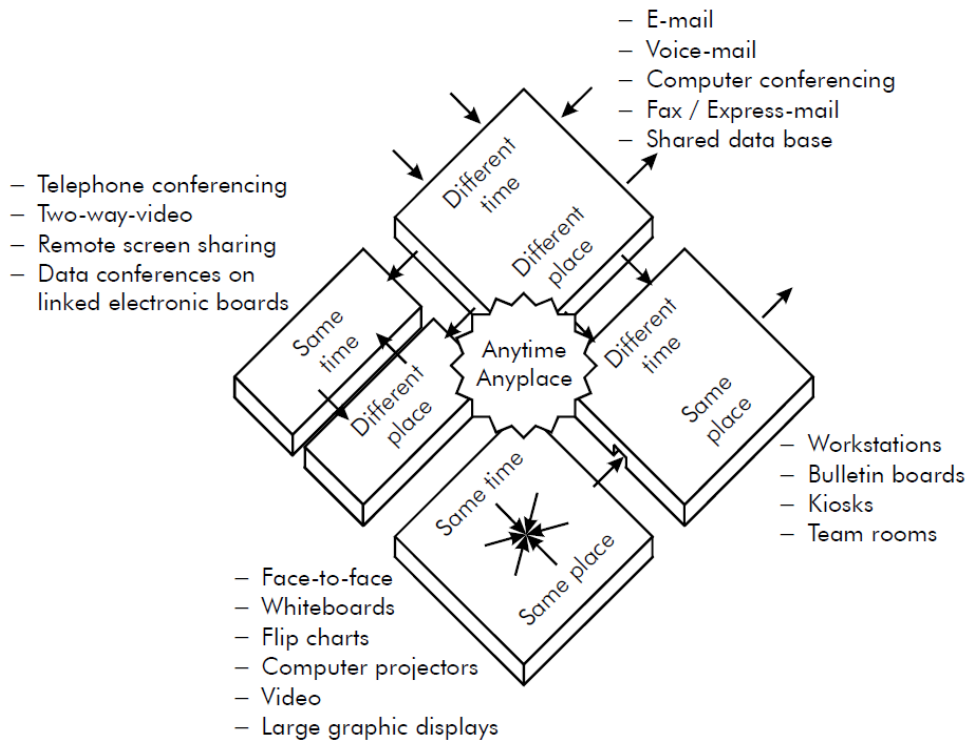


Bild 2-16: Anytime / Anyplace-Matrix¹³⁴

Same time and same place

Die Werkzeuge dieser Dimension sind Tools, mit denen die Entwicklungspartner zur gleichen Zeit zusammenkommen und ihre Kooperation durchführen können. Zunächst sind die Table-Based Szenarien zu nennen. Hierzu gehören unter anderem das klassische Flipchart, Whiteboard, die Pinnwand oder der Videoprojektor. Mit der Entwicklung der Benutzereingabemethoden sind die Sprachsteuerung und Touch-Technologie immer beliebter geworden. Seit der Einführung der Multi-Touch-Technologie wird eine große Menge von Geräten für Benutzerinteraktion entwickelt. Ein Beispiel hierfür ist das von Müller-Tomfelde entwickelte Tabletops. Auf Basis der Mehrbenutzer-Editoren wird es ermöglicht, die Informationen gemeinsam auf einem Tisch zu verarbeiten¹³⁵. Der Tisch wird meistens von Projektoren, Kamera,

¹³³ O'Hara-Devereaux / Johansen 1994

¹³⁴ O'Hara-Devereaux / Johansen 1994

¹³⁵ Müller-Tomfelde 2010

Tonaufnahmegeräten und der Oberfläche mit Fingererkennung, die zur Präsentation und gleichzeitige Interaktion mit Anwendungen verwendet wird, eingerichtet.

Different time and same place

Nach Funktionen und Einsatzbereichen sind die meisten Ansätze und Werkzeuge schwerpunktmäßig zu den anderen drei Situationen zugeordnet. Viele davon können jedoch auch in dieser Dimension verwendet werden. Diese dienen dazu, dass die Informationen zur Benachrichtigung hinterlegt werden können. Beispielsweise lassen sich die Nachrichten mittels eines Telesekretärs aufnehmen und von den weiteren Personen anhören. Darüber hinaus können der Klebezettel und das schwarze Brett dieser Kategorie zugeordnet werden¹³⁶.

Same time and different place

Im Folgenden werden die Ansätze und Werkzeuge zusammengefasst, die zur gleichen Zeit aber von unterschiedlichen Standorten aus benutzt werden können. Diese Ansätze und Werkzeuge lassen sich zu Kommunikationszwecken und Konstruktionszwecken unterscheiden.

Ein typisches Beispiel stellt das Instant-Messaging-System dar, mit dem die Teilnehmer durch bestimmte Software textuell in Echtzeit sich über Ortsgrenzen unterhalten können. Verbreitete Software sind z.B. Skype¹³⁷, WhatsApp¹³⁸, etc. Diese Software ist in erster Linie ausschließlich für textbasierte Unterhaltung entwickelt worden. Nach einigen Funktionserweiterungen ist es jetzt mit neuen Versionen dieser Softwaretypen möglich, mehrere Beteiligte in Echtzeit über das Internet anzusprechen oder mit ihnen Videokonferenzen durchzuführen.

Ebenfalls werden Werkzeuge aus den Grundlagen von Mehrbenutzer-Editoren und IT für die gleichzeitige Produktdatenverarbeitung in verschiedenen Orten entwickelt. KLEMMER & EVERITT stellen fest, dass der Bedarf nach Interaktion zwischen verteilten Entwicklungseinheiten sowohl mit elektronischen als auch mit physischen Medien entsteht¹³⁹. Das sogenannte „Smart Board“ stellt eine physisch-elektronische Schnittstelle bereit, welche ermöglicht, die auf einer Seite physisch vorhandenen Objekte auf der verteilten Seite elektronisch darzustellen¹⁴⁰. Auf ähnliche Weise beschäftigt MILNE sich mit dem Kommunikationswerkzeug „GroupBoard“, welches mehrere unabhängige Kommunikationskanäle bzw. Audio-, Video-, Skizzen- und Applikation-Sharing integriert¹⁴¹.

¹³⁶ Leimeister 2014

¹³⁷ <https://www.skype.com/>

¹³⁸ <https://www.whatsapp.com/>

¹³⁹ Klemmer / Everitt 2002

¹⁴⁰ Klemmer / Everitt 2002

¹⁴¹ Milne 2005

Zur Unterstützung der kooperativen Konstruktions- und Simulationsaktivitäten wurden zahlreiche Ansätze und Werkzeuge entwickelt. Viele davon sind rechnerbasiert und können mit Hilfe der modernen Informationstechnik miteinander vernetzt werden.

Diese Vernetzung findet nicht unbedingt zwischen verschiedenen Orten, sondern zwischen verschiedener Software statt. Weil die Entwicklungspartner meist unterschiedliche Software verwenden, müssen die Daten und Modelle möglichst ohne Informationsverlust konvertiert werden können. Beispielsweise können verschiedene CAx-Software und auch PDM-Systeme durch die CAx-Technologien der PROSTEP AG integriert werden¹⁴².

Das Virtual Reality-System nach REINHART ermöglicht den Zugriff auf die Simulationsdaten über das Internet. Somit ist es möglich, dass mehrere geografisch verteilte Entwicklungspartner gleichzeitig mit der Simulation interagieren¹⁴³. Basierend auf dieser Grundidee können verschiedene Simulationsprogramme und Modellierungswerkzeuge durch Integratoren gekoppelt werden. Durch diese Kopplung lässt sich ein Gesamtsystem, das aus mehreren multidisziplinären Teilsystemen besteht, simulieren. Je nach Anzahl der Integratoren und der Modellierungswerkzeuge sind unterschiedliche Kopplungsansätze einzusetzen¹⁴⁴.

Different time and different place

Auf Basis der Informationstechnik und Web 2.0 werden immer mehr Werkzeuge in dieser Dimension entwickelt und erweitert, die die gleichzeitige Anwesenheit der verschiedenen Projektpartner nicht erfordern. Ein Beispiel hierfür ist die E-Mail, die heutzutage als ein unverzichtbares Werkzeug zur elektronischen Informations- bzw. Datenübermittlung zwischen verschiedenen Partnern verwendet wird.

Ein anderer häufig verwendeter Ansatz in dieser Dimension ist das Produktdatenmanagement. ZWICKER entwickelt ein Produktinformationssystem zur Unterstützung der unternehmensübergreifenden Produktentwicklung. Fokus dieses Systems liegt auf der Bereitstellung von benötigten Produktinformationen für alle beteiligten Entwicklungspartner¹⁴⁵.

GAUSEMEIER betont die Wichtigkeit des konsequenten Informations- und Wissensmanagements in der verteilten Produktentwicklung. Auf Basis von Internet, Beschreibungssprachen, Kommunikationstechnologie, Systemarchitekturen, Modellierung von Wissen sowie Agententechnologie stellen die Autoren Ansätze und Konzepte zur Informations- und Wissensmanagement vor. In Bezug auf

¹⁴² Poststep AG, <http://www.prostep.com/>

¹⁴³ Reinhardt et al. 2001

¹⁴⁴ Geimer et al. 2006

¹⁴⁵ Zwicker 1998

Informationsmanagement werden PDM (Produktdatenmanagement) und PLM (Produktlebenszyklusmanagement) Systeme näher betrachtet. Darüber hinaus werden Ansätze zum Wissensmanagement und zur Kommunikation von Produktdaten berücksichtigt¹⁴⁶.

Die Wiki als ein Mehrbenutzereditor kann in Kooperationsprojekten dazu verwendet werden, um Ideen zu generieren oder gewonnene Kenntnisse zu speichern. Dazu wird eine Wikiseite als Datenbank erstellt, auf die jeder Entwicklungspartner Zugriff hat und dezentral für das Eintragen und Pflegen der Inhalte aus seinem Teilbereich verantwortlich ist. Diese Inhalte beschreiben das gewonnene Konstruktionswissen und alle Varianten sowie Entwicklungszwischenergebnisse eines Produkts, um die Nachvollziehbarkeit der Entwicklungsschritte zu gewährleisten¹⁴⁷. Allerdings wird die Inhaltstruktur der Wiki nicht automatisch, sondern vom Benutzer erstellt. Semantic-Wiki stellt nicht nur die Funktionalitäten normaler Wiki, sondern auch die Möglichkeit zur Verbesserung der Inhaltstruktur der Wiki zur Verfügung¹⁴⁸. ALBERS et al. entwickelten eine Methode, deren Inhaltstrukturierung von Semantic-Wiki nach iPeM erfolgt¹⁴⁹. Durch eine Implementierung dieser Methode in einer industriellen Entwicklungsumgebung werden die Machbarkeit und weitere Verbesserungsmöglichkeiten gezeigt¹⁵⁰.

Das zu dieser Kategorie gehörende Shared File Repository stellt eine über ein Netzwerk zur Verfügung gestellte gemeinsame Datenbasis dar, auf die eine Gruppe zugreifen, Daten speichern, bearbeiten, organisieren und untereinander teilen kann¹⁵¹.

2.2.5 Ganzheitliche Vorgehensweisen der VPE

Zur effektiven und effizienten Durchführung verteilter Produktentwicklungsprojekte wurden unterschiedliche ganzheitliche Vorgehensweisen und -modelle auf Basis der oben genannten Methoden und Konzepte entwickelt. Im Vergleich zu den allgemeinen Produktentwicklungsprozessen liegt der Schwerpunkt hierbei auf der optimalen Behandlung der von Verteilung verursachten Problemstellungen. In diesem Abschnitt werden exemplarisch drei aus unterschiedlichen Überlegungen entstandene Vorgehensweisen vorgestellt.

2.2.5.1 Integrierte virtuelle Produktentstehung

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Leitprojekts „integrierte Virtuelle Produktentstehung“ (iViP) wurde eine vollständige IT-Systemwelt zur Integration aller

¹⁴⁶ Gausemeier 2006

¹⁴⁷ Leimeister 2014

¹⁴⁸ Völkl et al. 2006

¹⁴⁹ Albers et al. 2010b

¹⁵⁰ Albers et al. 2010b

¹⁵¹ Leimeister 2014

Informationsflüsse und Software über den gesamten Produktentstehungsprozess zur Entwicklungskooperation geschaffen. Als Integrationswerkzeuge wurden die iViP-Plattform und der iViP-Client entwickelt. Die iViP-Plattform stellt ein Framework für die Integration der Softwaremodule zur Schaffung einer Client-Server-Umgebung bereit. Der iViP-Client bietet eine einheitliche Benutzeroberfläche an, unter der sich die Werkzeuge für Produktplanung, -konstruktion, -erprobung sowie Fertigungsvorbereitung bereitstellen lassen. Dies ermöglicht den Zugriff auf die Daten im Netzwerk sowie die lokale Nutzung von im Netzwerk verfügbaren Anwendungen und Hochtechnologiesystemen von allen berechtigten Partnern, damit sie sich zu Entwicklungskooperation zusammenschließen und den globalen Wettbewerbsanforderungen begegnen können. Ein Kernelement der iViP-Plattform stellt die Schnittstelle zu den PDM-Basisdiensten dar, die die bedarfsgerechte Integration in vorhandenen Systemen sowie mit externen Werkzeugen ermöglicht. Um die im Verlauf des Projekts erarbeiteten IT-Standards für die Integration von Produktentwicklungswerkzeugen weiterzuentwickeln, wurde der in 2.2.4.3 erwähnte Pro-Step Verein durch eine Satzungsänderung in den Pro-Step-iViP überführt^{152,153,154}.

Bild 2-17: iViP Architektur¹⁵⁵¹⁵² Krause et al. 2001¹⁵³ Krause et al. 2002a¹⁵⁴ Krause et al. 2002b¹⁵⁵ Krause et al. 2002b

2.2.5.2 Integriertes Vorgehensmodell

Ein integriertes und ganzheitliches Vorgehensmodell beinhaltet ein Vorgehen, bei dem die Methoden und Werkzeuge für das Projektmanagement, den Informationsaustausch, die Produktentwicklung sowie die Teamentwicklung systemisch vernetzt werden. Mit Hilfe eines Vorgehensmodells können projektspezifische Problemstellungen frühzeitig ermittelt werden. Zur Lösung dieser Problemstellungen werden passende Methoden und Werkzeuge ausgewählt, so dass die Projektplanung optimal erstellt werden kann.

Ein Beispiel hierfür ist das Vorgehensmodell nach GIERHARDT (vgl. Bild 2-18). Mittels seines Merkmalsystems werden die individuellen und komplexen Problemstellungen abgeleitet. Zur Lösung dieser Problemstellungen dient das Vorgehensmodell als Leitfaden¹⁵⁶. Die Grundlage für das Vorgehensmodell bildet das vernetzte Denken, mit dessen Hilfe der Aktionsbereich des Vorgehensmodells herausgearbeitet wird. Durch diese Aktionen soll zuerst der Problembereich je nach Projekt auf drei Ebenen (Produkt-, Prozess-, Organisationsebene) identifiziert werden, damit sich der Verteilungszustand ermitteln lässt. Somit können entsprechende Kooperationsabläufe in der verteilten Umgebung verstanden und modellhaft dargestellt werden. Letztendlich wird ein individuelles Problemprofil für das Vorgehensmodell bereitgestellt¹⁵⁷. Die Lösungsebene und Integrationsebene bilden die Arbeitsebenen des Vorgehensmodells. Auf der Integrationsebene werden die Maßnahmen zur Analyse global verteilter Entwicklungsprojekte sowie das Verstehen der Zusammenhänge und Wechselwirkungen deren Eigenschaften und damit die Identifikation des Problemprofils erfasst. Ebenfalls gehört die Implementierung der Problemlösungsmaßnahmen hierzu. Auf der Lösungsebene werden zuerst Lösungsmuster für die durch das Problemprofil beschriebenen Problemstellungen aufgezeigt und adaptiert, damit eine projektspezifische Lösungsbasis in den Bereichen Prozess- und Projektmanagement, Systementwicklung, Informationslogistik, Lessons Learned, Teamentwicklung und Coaching ausgearbeitet werden kann. Durch die Implementierung der Lösungen in individuellen Entwicklungsprojekten werden Erfahrungen gewonnen, somit können neue Lösungsmuster entwickelt werden. Mit diesen Erfahrungen und entwickelten Lösungsmustern lässt sich die Wissensbasis im Lernprozess aufbauen und erweitern.

¹⁵⁶ Gierhardt 2001

¹⁵⁷ Gierhardt 2001

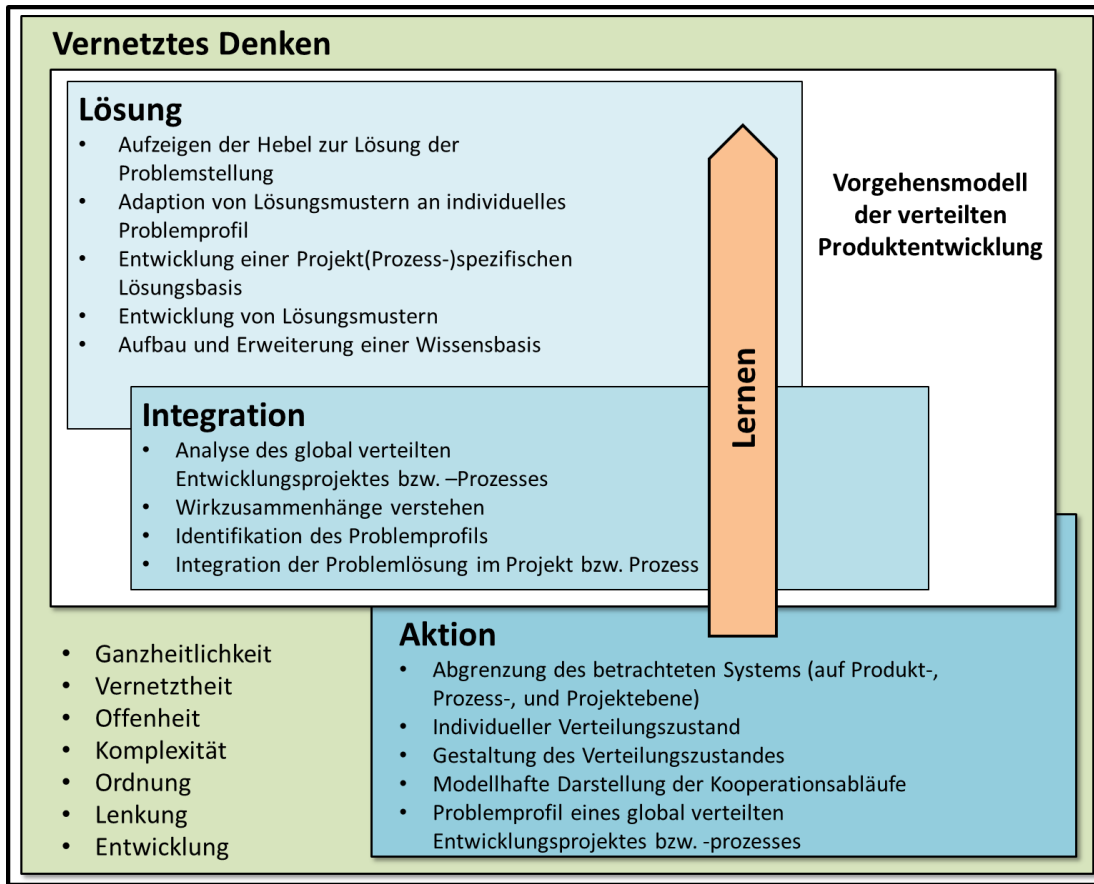


Bild 2-18: Vorgehensmodell der VPE als Problemlösungsmethodik nach Gierhardt¹⁵⁸

2.2.5.3 Modellierung und Simulation der verteilten Produktentwicklungsprozesse

Um die verteilten Produktentwicklungsprozesse optimal vorzubereiten und durchzuführen spielt das Prozessmanagement eine wichtige Rolle. Das Prozessmanagement enthält die Planung, Steuerung sowie die Durchführung der Entwicklungsprozesse. Zur Planung der Entwicklungsprozesse werden verschiedene Werkzeuge eingesetzt, die sich prinzipiell in qualitative und quantitative Werkzeuge unterscheiden¹⁵⁹. Das im 2.2.2.3 beschriebene Merkmalsystem stellt ein Beispiel für qualitative Werkzeuge dar, die keine Kennzahlen zur Planung und Analyse der Entwicklungsprozesse erfordern. Zur Anwendung der quantitativen Werkzeuge werden bestimmte Kennzahlen benötigt, damit die Entwicklungsprozesse geplant und analysiert werden können. Aus Sicht der Manager ist eine Gesamtübersicht über alle Entwicklungsprojekte bezüglich Kennzahlen bzw. Entwicklungszeit und -kosten, etc. sehr wichtig, damit die Projekte miteinander verglichen und entsprechende Prioritäten gesetzt werden können. Ein Beispiel hierfür ist die Prozessmodellierung und -simulation.

¹⁵⁸ Gierhardt 2001

¹⁵⁹ Biantoro 2007

In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3633 wird ein Lösungsansatz zur Prozessmodellierung und Simulation von BIANTORO vorgeschlagen¹⁶⁰. Als Modellformalismus wird das objektorientierte Petri-Netz (OOPN) ausgewählt¹⁶¹. Das Gesamtmodell besteht aus mehreren Unternehmensgliederungen, die ein Datenmodell und ein Ressourcenmodell sowie verschiedene Prozessmodelle enthalten. Für jedes Prozessmodell wird eine Kommunikationsschnittstelle eingeführt, damit die Prozesse und Zwischenergebnisse überhaupt synchronisiert werden können. Diese Kommunikationsschnittstellen erlauben nicht nur den unternehmensinternen Informationsaustausch, sondern auch die Integration von unternehmens- und disziplinübergreifend freigegebenen Prozessmodellen. Somit kann jeder Projektbeteiligte eigene Modelle mittels Client-Server-Architektur unter Berücksichtigung der Modelle von Projektpartner aufbauen und mit verschiedenen Szenarien simulieren. Mit den Simulationsergebnissen ist es möglich, den Entwicklungsprozess im Hinblick auf Entwicklungszeit und -kosten sowie Ressourcenauslastung vor oder während des Prozessablaufs dynamisch zu analysieren und zu optimieren. Basierend auf den oben genannten Überlegungen wurde ein Prototyp zur Modellierung und Simulation der verteilten Produktentwicklungsprozesse für mechatronische Systeme DimSiMP (Distributed Modeling and Simulation of Mechatronical Product Development Processes) mittels Moses-Basissystems entwickelt (Details siehe¹⁶²).

2.2.6 Zwischenfazit

In Kapitel 2.2 wurde einen Überblick der verteilten Produktentwicklung in Bezug auf verschiedene Betrachtungsweisen und existierende Unterstützungskonzepte gegeben. Zunächst wurde der Ursprung bzw. die Geschichte von verteilter Produktentwicklung vorgestellt. Anschließend wurden die Betrachtungen der VPE mit unterschiedlichen Fokussen erklärt. Basierend auf diesen Aspekten wurden umfassende Beschreibungen von VPE entwickelt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche Beschreibungen vorgestellt, von denen die folgende Arbeit geprägt wird. Um die Aspekte und Herausforderungen in der VPE zu beherrschen, wurden zahlreiche Unterstützungskonzepte entwickelt, die in 2.2.3 und 2.2.4 nach unterschiedlichen Anwendungszwecken in zwei Kategorien unterteilt wurden. Des Weiteren wurden drei ganzheitliche Vorgehensweisen vorgestellt, die die oben genannten Unterstützungskonzepte umfassen. Darüber hinaus wurde der Beitrag des iPeMs sowohl zur strategischen als auch zur kommunikationstechnischen Unterstützung der VPE gezeigt. Zusammenfassend erkennt man, dass zurzeit zahlreiche Unterstützungskonzepte zur Kommunikation, Koordination, Kooperation

¹⁶⁰ Biantoro 2007

¹⁶¹ Biantoro 2007

¹⁶² Biantoro 2007

und Kollaboration existieren. Allerdings werden die Validierungsaktivitäten nur sehr begrenzt unterstützt. Daher besteht die Notwendigkeit spezifische Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung der Validierung in der verteilten Produktentwicklung zu entwickeln oder die vorhandenen Methoden und Werkzeuge zu erweitern.

2.3 Zusammenarbeit in der Fahrzeugentwicklung

Wie bereits der Titel verdeutlicht, liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Produktentwicklung in der Automobilindustrie. Die Automobilindustrie, die heutzutage zu den wichtigsten Industriezweigen der Welt zählt, entstand mit der Erfindung des Automobils im Jahr 1886 durch Carl Benz. Den ersten entscheidenden Aufschwung der Automobilindustrie bewirkt die Innovation der Massenfertigung durch Ford¹⁶³. Eine der Grundideen der Massenfertigung ist die Arbeitsteilung. Dies bedeutet, dass jeder Mitarbeiter nur einige bestimmte Teilaufgaben im gesamten Produktionsverfahren erledigt. Aufgrund der ständig steigenden Produktkomplexität sind die Aufgaben nicht mehr im Alleingang von einem Unternehmen zu bewältigen, sondern nur noch durch Zusammenarbeit mit Partnerunternehmen. Daher werden immer mehr Unternehmen in die Automobilindustrie einbezogen. Im Rahmen der Massenproduktion wird die Individualisierung von PKW als Entwicklungstrend identifiziert¹⁶⁴. Des Weiteren entsteht seit den 1990er Jahren ein Druck durch steigende Fahrzeugnachfrage und durch die Verkürzung der Time-to-Market bzw. Zeit bis zur Markteinführung¹⁶⁵. Verschärfte Wettbewerbsbedingungen (Innovations- und Kostendruck sowie sinkende Entwicklungs- und Herstellungszeit) sowie steigende Kundenanforderungen führen zu einer Veränderung der Arbeitsteilung in der Automobilindustrie und demzufolge zu Veränderungen der Struktur der zwischenbetrieblichen Zusammenarbeit¹⁶⁶.

Die Zusammenarbeit in der Automobilindustrie findet unternehmensintern über Standorte und Zeitzone hinweg, aber auch unternehmensübergreifend in Form von strategischen Allianzen, Joint Ventures, Fusionen und Akquisitionen statt¹⁶⁷. Grundsätzlich kann diese Zusammenarbeit in fünf Bereichen eingeordnet werden: Forschung und Entwicklung (F&E), Qualität, Fertigung, Logistik und Marketing. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Zusammenarbeit in der F&E. In den folgenden Unterkapiteln werden zuerst die zwei wichtigsten Akteure in der Automobilindustrie, die Hersteller und Zulieferer, vorgestellt. Danach wird die Hersteller - Zulieferer Beziehung als die Kernbeziehung der Automobilwertschöpfungskette betrachtet. Anschließend werden zwei bedeutende Zusammenarbeitsformen bzw. strategische

¹⁶³ Reichhuber 2010

¹⁶⁴ Brunn 2009

¹⁶⁵ Brunn 2009

¹⁶⁶ Albers 1994

¹⁶⁷ Heftrich 2001

Allianzen und Joint Ventures berücksichtigt. Zum Schluss werden noch einige Tendenzen der Zusammenarbeit in der Fahrzeugentwicklung entsprechend den Ergebnissen der Literaturrecherche und der Experteninterviews zusammengefasst.

2.3.1 Automobilhersteller

Die Unternehmen, die eigengefertigte oder belieferte Teilsysteme zum Gesamtfahrzeug verarbeiten und diese am Markt den Kunden anbieten, werden als Fahrzeughersteller (Original Equipment Manufakturen, Abkürzung: OEM) definiert¹⁶⁸. Der Druck der wirtschaftlichen Herausforderungen mündet in zwei wesentliche Entwicklungsrichtungen von Automobilhersteller. In der Automobilhistorie ist eine Konzentrationstendenz der Hersteller zu verzeichnen. Während im Jahr 1964 noch 53 unabhängige Hersteller auf dem Automobilmarkt wirkten, sank diese Zahl auf 29 im Jahr 1980¹⁶⁹. Bis zum Jahr 2000 hat sich die Anzahl von dominierenden Herstellern weiter auf 15 reduziert¹⁷⁰. Allerdings wächst die Bedeutung der heute noch kleinen Hersteller wie SAIC, FAW, etc. zunehmend. Außer der Konsolidierung reduzieren die Hersteller ihre Fertigungstiefe und die Zahl der Direktlieferanten¹⁷¹. Die Reduktion der Fertigungstiefe ermöglicht die Kosteneinsparung und die verstärkte Konzentration auf ihre Kernkompetenzen, die bislang Innovation und Entwicklung, Produktion, Integration und Endmontage beinhalten¹⁷². Mit dem Konzept der Modularisierung werden die einbaufertigen Komponenten bzw. komplexe Module und Systeme ausschließlich von ausgewählten, qualifizierten Lieferanten in Eigenverantwortung entwickelt und geliefert. Dies bewirkt auch eine Reduzierung des Koordinationsaufwands, da die Koordination von niedrigeren Tier-Lieferanten (Bild 2-19 rechts) über Tier-1 Zulieferer läuft. Jedoch übernehmen die Hersteller die strategische Führung des Unternehmensnetzwerks in dem Automobil Supply Chain, weil nur die Hersteller sowohl die Produktionsprozesse als auch Beschaffungsprozesse vor der Produktion und die Vertriebsprozesse nach der Produktion beeinflussen können. Darüber hinaus verfügen die Hersteller über einen ganzheitlichen Überblick über die Anforderungen vom Endkunden für die Produktentwicklung und das Management des Supply Chain¹⁷³.

2.3.2 Automobilzulieferer

Die Unternehmen, die Teilsysteme sowie Teile der Teilsysteme an Automobilhersteller liefern, werden als Automobilzulieferer bezeichnet. In den klassischen Logistikanätzen werden Zulieferer ohne Systemzusammenhang isoliert

¹⁶⁸ Eckhard 2009

¹⁶⁹ Eckhard 2009

¹⁷⁰ Eckhard 2009

¹⁷¹ Albers 1994

¹⁷² Eckhard 2009

¹⁷³ Pollmeier 2008

aufgefasst. Bei jedem Zulieferer wird einzelne Leistungserstellung angenommen. Zur Sicherstellung der Qualität und Zuverlässigkeit erfolgt der Wandel von traditionellen einzelnen Zulieferern zu einem kooperativen Zulieferernetzwerk, in dem die Automobilzulieferer sich nach der Wertigkeit von gelieferten Produkten am Endprodukt in Tier-1, Tier-2 oder Tier-3 unterscheiden (Bild 2-19) (Unter der Pyramide befinden sich die nicht abgebildeten Rohmaterialzulieferer, die im Rahmen dieser Arbeit nicht konkret berücksichtigt werden)¹⁷⁴. Dieser Wandel führt zu einer Abnahme des direkten Einflusses von OEMs auf bestimmte Zulieferer (Tier-2 und Tier-3) und auch einer Verlagerung der Verantwortung auf Tier-1 Zulieferer¹⁷⁵. Im Vergleich zum Tier-2 und Tier-3 arbeiten die Tier-1 Zulieferer in engerer Kooperation und auf höherem Leistungsniveau mit Herstellern zusammen¹⁷⁶. Die OEMs werden hauptsächlich von Tier-1 Zulieferern beliefert. Jedoch ist die Belieferung direkt durch Tier-2 und Tier-3 auch möglich, weil nicht alle Bestandteile des Fahrzeugs als System oder Modul bezogen werden können. Neben den klassischen Automobilzulieferern spielen die Entwicklungsdienstleister, die auf Dienstleistung spezialisiert sind und keine Bauteile produzieren, auch eine wichtige Rolle in der Wertschöpfungskette der Automobilindustrie¹⁷⁷. Allerdings stellen die Hersteller-Zulieferer-Beziehungen bezogen auf Entwicklungsdienstleister eine vernetzte und wechselseitige Lieferbeziehung dar. Daher ist es in modernen Zulieferernetzwerken oftmals schwierig, einen Zulieferer in eine bestimmte Gruppe einzuordnen.

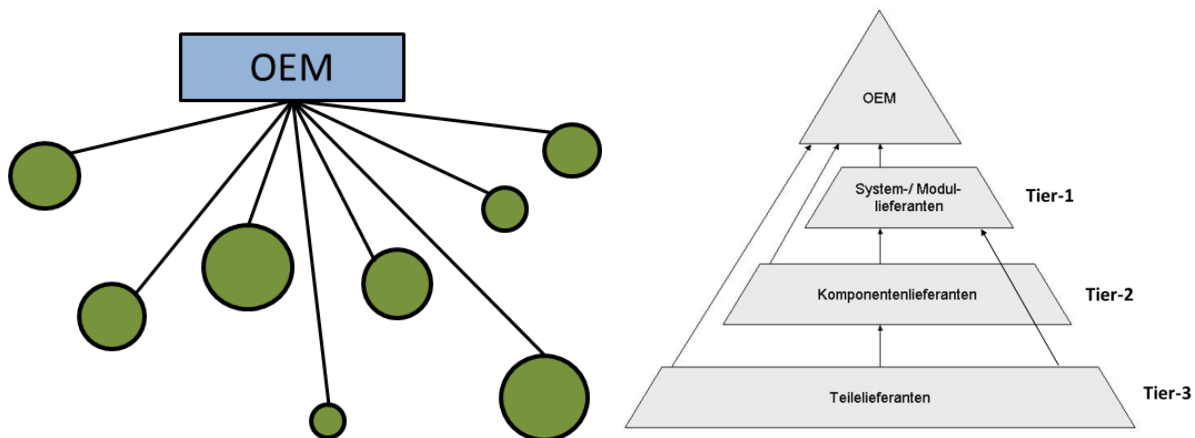


Bild 2-19: Einzelne Zulieferer (links)¹⁷⁸ und Pyramidenförmige Zulieferstruktur (rechts)¹⁷⁹

¹⁷⁴ Pollmeier 2008

¹⁷⁵ Winners 2003

¹⁷⁶ Albers 1994

¹⁷⁷ Reichhuber 2010

¹⁷⁸ Winners 2003

¹⁷⁹ Albers 1994

2.3.3 Hersteller – Zulieferer Beziehung

Am Ende der 1980er war die Hersteller-Zulieferer-Beziehung noch hauptsächlich durch informelle persönliche Beziehung geprägt. Auf Grund der zunehmenden wirtschaftlichen Herausforderungen verändert sich diese Beziehung von ehemals „flachem“ System zu einer „pyramidenförmigen“ Wertschöpfungskette, die aus drei Akteuren der Automobil Supply Chain besteht: Hersteller, Zulieferer und Automobilhändler¹⁸⁰. Allerdings verändert sich nicht nur die Zusammenarbeit innerhalb einer Wertschöpfungskette, sondern auch die Kette selbst. Die bislang bekannte Wertschöpfungskette befasste sich hauptsächlich mit der Zusammenarbeit und Integration über Hersteller und verschiedenen Zulieferstufen¹⁸¹. Nach AMMER werden diese vertikalen Ketten zu Wertschöpfungsnetzwerken integriert¹⁸². In diesen Wertschöpfungsnetzwerken werden auch die horizontale Integration entlang der Geschäftsprozesse Engineering, Produktion, Distribution, Sales und Service betrachtet. Die von einem Mitglied des Wertschöpfungsnetzwerks getätigten Maßnahmen können die Profitabilität von allen anderen Mitgliedern beeinflussen. Deswegen nehmen die einzelnen Unternehmen nicht als Einzelkämpfer sondern mehr als Teil eines Netzwerks am globalen Wettbewerb teil¹⁸³.

Vertikale Beziehung (Hersteller-Zulieferer)

Die Beziehung zwischen Hersteller und Zulieferer in der Automobilindustrie wird als „vertikale Beziehung“ bezeichnet¹⁸⁴. Der Innovations- und Kostendruck erfordert eine enge Zusammenarbeit von Hersteller und Zulieferer, welche zu einer verstärkten Wettbewerbsfähigkeit und einer Verteilung des Risikos führt. Mit der zunehmenden Integration von Zulieferern ist eine Intensivierung der Zusammenarbeit zwischen Hersteller und Zulieferer verbunden. Dies umfasst vor allem die Einbindung der Zulieferer in den Bereich Forschung und Entwicklung, da der technische Wandel beispielsweise in der Elektrik von den Hersteller nicht mehr allein, sondern durch die Nutzung der Ressourcen und des Know-hows der Zulieferer in Form von Entwicklungspartnerschaft bewerkstelligt werden kann¹⁸⁵.

Grundsätzlich werden fünf Zeitpunkte der Zuliefererintegration in die Entwicklung unterschieden. Der frühestmögliche Zeitpunkt liegt in der Planungsphase des Fahrzeugdesigns. Danach erfolgt die Einbindung der Zulieferer in die Spezifikationsentwicklung bzw. Konzeptphase. Weiterhin ist eine Integration nach der Spezifikationsphase oder nach der Beschaffungsentscheidung sowie schließlich in

¹⁸⁰ Wilhelm 2008

¹⁸¹ Albers 1994

¹⁸² T Systems 2009

¹⁸³ Winners 2003

¹⁸⁴ Eckhard 2009

¹⁸⁵ Wojda / Barth 2006

der Anlaufphase der Produktion auch möglich¹⁸⁶. Eine frühzeitige Einbindung der Zulieferer ist mit vielen Vorteilen verbunden. Durch die Nutzung ihrer produktspezifischen Kenntnisse können die Spezifikationen präziser festgelegt werden. Eine parallele Verwendung von einem Teil für andere Modelle oder Standardisierung und Vereinfachung der Teilkonstruktion lassen sich eher vom Zulieferer bestimmen. Mit Hilfe der Fachkompetenzen der Zulieferer ist eine frühzeitige Einschätzung über entwicklungskritische Teile möglich, damit die Entwicklungszeit verkürzt werden kann¹⁸⁷. Des Weiteren können die Teilkonstruktion an die Fertigungsbedingungen der Zulieferer angepasst werden, um die Kostensenkung zu realisieren. Trotz der damit verbundenen Vorteile wird die frühzeitige Zuliefererintegration von Hersteller nur zögerlich eingesetzt, da die Angst vor einem Abfluss der wettbewerbskritischen Informationen dominiert. Dies gilt insbesondere, wenn der Zulieferer damit den anderen Wettbewerber auch beliefert.

Je nach Tiefe der Zuliefererintegration findet die Zusammenarbeit in drei Formen statt: White-Box, Gray-Box und Black-Box. Bei dem White-Box Ansatz stellt der Hersteller die Konstruktionszeichnungen zur Verfügung, die die Grundlage der Aktivitäten der Zulieferer ist. Bei dem Gray-Box-Ansatz handelt es um eine gemeinsame Entwicklung, was bedeutet, dass der Hersteller ein detailliertes Lastenheft für den Zulieferer als Entwicklungsgrundlage erstellt und der Zulieferer entsprechende Lösungen oder Entwicklungsdienste anbietet. Die Entwicklungsverantwortung liegt jedoch noch beim Hersteller. Der Black-Box-Ansatz bedeutet, dass bestimmte Entwicklungsaufgaben oder Bauteile von qualifizierten Zulieferern autonom nur nach grober Spezifikation des Kunden bearbeitet werden. Bei diesem Ansatz sind die Details der Entwicklung vom Hersteller unabhängig bzw. unsichtbar¹⁸⁸.

Die Einbindung der Zulieferer können in „sequentiell“ und „parallel“ unterschieden werden. In dem ersten Fall geben die Hersteller die Entwicklungsaufgabe am bestimmten Zeitpunkt an den Zulieferer weiter. Eine parallele Einbindung bezeichnet eine intensive Zusammenarbeit über den ganzen Entwicklungsprozess zwischen beiden Seiten. Für die Entwicklung eines komplexen Produkts wie eines Fahrzeugs werden integrierte und zeitlich parallele Konzepte, Concurrent Engineering und Simultaneous Engineering, in der Praxis eingesetzt¹⁸⁹.

Ein konkretes Beispiel für die vertikale Zusammenarbeit stellt das BMW-Netzwerk dar. BMW gehört mit 76,8 Milliarden Euro Umsatz und knapp 2 Mio. ausgelieferten

¹⁸⁶ Wilhelm 2008

¹⁸⁷ Wilhelm 2008

¹⁸⁸ Koufterosa et al. 2007

¹⁸⁹ Wilhelm 2008

Fahrzeugen im Jahr 2013 zu den zehn größten Automobilherstellern weltweit^{190,191}. Im Vergleich zu Volkswagen und Daimler investiert BMW hauptsächlich für das Premiumsegment überdurchschnittlich viel in die Forschung und Entwicklung. Nach der Untersuchung von WOLTERS hatte BMW schon früh die Anzahl seiner Direktzulieferer reduziert¹⁹². Beispielsweise waren 150 „Kernlieferanten“ schon früh bei der Entwicklung des BMW 3-er integriert. Durch die langjährige Zusammenarbeit zwischen BMW und ausgewählten Kernlieferanten (z.B. ZF Friedrichshafen AG und Robert Bosch GmbH, etc.) in Bereichen Baureihen sowie Entwicklung und Innovation zeigt, dass BMW schon früh die Bedeutung eines Entwicklungsnetzwerks zumindest auf der Tier-1 Ebene erkannt hat.

Horizontale Beziehung (Hersteller-Hersteller und Zulieferer-Zulieferer)

Die Hersteller-übergreifende Zusammenarbeit bezieht sich auf gemeinsame Entwicklung in verschiedenen Ebenen von Bauteil-Ebene bis zur Gesamtfahrzeug-Ebene. Die Zusammenarbeit auf Subsystemebene (Plattform, Modul, Komponenten und Bauteil) erfolgt oftmals innerhalb der Konzerne¹⁹³. Ein Beispiel auf der Plattformebene ist die Volkswagen A-Klasse Plattform zu nennen, welche als Plattform für den VW Golf, den VW Golf Variant, den VW Jetta, den VW Touran, den Audi A3, den Skoda Octavia und den Seat Toledo dient¹⁹⁴. Als Beispiel auf der Gesamtfahrzeugebene weist die Zusammenarbeit zwischen Daimler und Renault-Nissan zur Entwicklung eines Fahrzeugs im Kleinwagensegment auf. In ähnlicher Weise arbeiten BMW und Toyota in der Entwicklung umweltfreundlicher Fahrzeuge in Bezug auf Brennstoffzellen und Elektroantrieb zusammen¹⁹⁵.

Während die Hersteller im Bereich der horizontalen Zusammenarbeit aktiv sind, finden die Kooperationsaktivitäten zwischen Zulieferern jedoch zögerlich statt. Der Grund dafür könnte der hohe Anteil von klein- und mittelständischen Unternehmen in der Zuliefererindustrie sein, die die Kooperation relativ schwierig und auch kritisch handhaben können¹⁹⁶. Allerdings haben die großen Zulieferer angefangen, horizontal zu kooperieren. Bei horizontaler Zusammenarbeit in der Zuliefererindustrie werden die unternehmensübergreifenden Kooperationsaktivitäten oftmals von einem großen Systemlieferant oder Megalieferant geführt und koordiniert. Seit langem haben die führenden Lieferanten bei Abgasanlagen z.B. Eberspächer, Zeuna/stärker, Boysen, Gillet in unterschiedlichen kooperativen Verhältnissen eine Systemführerschaft

¹⁹⁰ BMW Group 2014

¹⁹¹ Fuß, 2014

¹⁹² Wolters 1995

¹⁹³ Neubauer / Rudow 2012

¹⁹⁴ Neubauer / Rudow 2012

¹⁹⁵ Becker 2010

¹⁹⁶ Wilhelm 2008

etabliert¹⁹⁷. Zurzeit sind zahlreiche Beispiele für die horizontale Zusammenarbeit zu finden. Ein bekanntes Beispiel stellt die Kopplung komplementärer Kompetenzen in Form der Systemkooperation der Behr-Hella Fahrzeugsysteme, Behr-Hella Thermocontrol und OASYS dar¹⁹⁸. Auch die Konkurrenten teilen sich die zunehmenden Kosten für Forschung und Entwicklung. Zum Beispiel hat Bosch mit seinen Konkurrenten Joint Ventures gegründet, um gemeinsam Produkte zu entwickeln und zu vermarkten.

VOß konstatiert in seiner Dissertation den Einfluss von Kunden auf die Zulieferer-Kooperation. Je nachdem, ob eine Zuliefererkooperation positive oder negative Einflüsse auf einem Kunden hat, wird der Kunde versuchen, diese Kooperation zu fördern oder zu verhindern¹⁹⁹.

2.3.4 Zusammenarbeitsformen

Bei der Durchführung der Zusammenarbeit sind verschiedene Formen vorhanden, die durch unterschiedliche Randbedingungen und Bindungsintensitäten (0-100%) geprägt sind. In Abhängigkeit von der Bindungsintensität stellt Bild 2-20 die unterschiedlichen Ausprägungen der Zusammenarbeitsformen von Markt (0%) bis Hierarchie (100%) dar²⁰⁰.

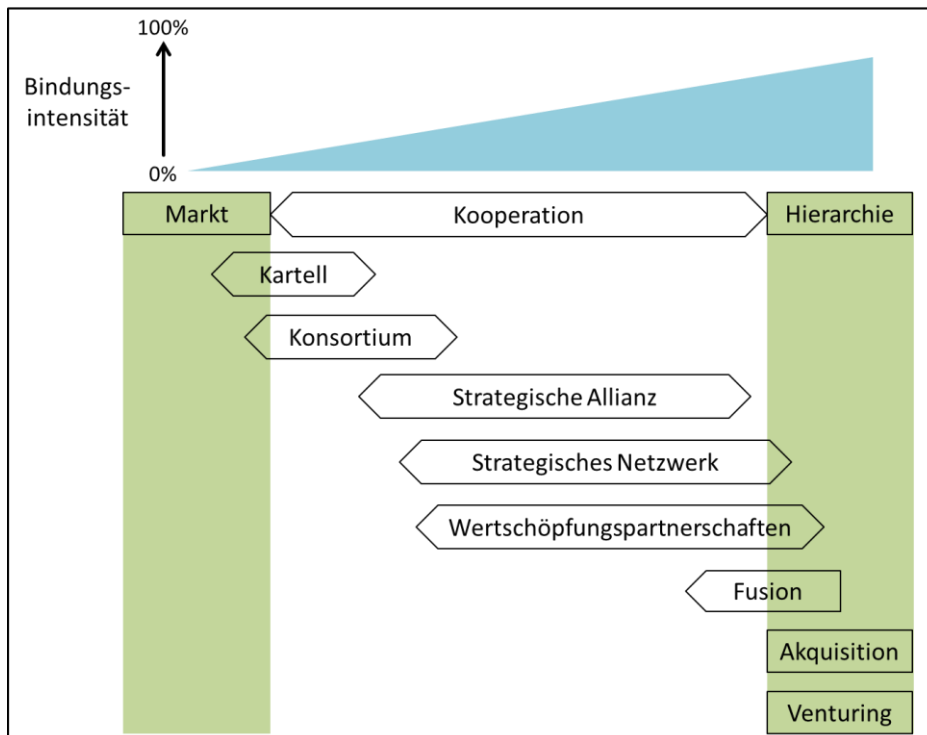


Bild 2-20: Zusammenarbeitsformen von Markt bis Hierarchie²⁰¹

¹⁹⁷ Hahn / Kaufmann 2002

¹⁹⁸ Wilhelm 2008

¹⁹⁹ Voß 2008

²⁰⁰ Heftrich 2001

²⁰¹ Heftrich 2001

Die Formen Kartell und Konsortium werden zwar zumindest partiell in der Automobilindustrie angewendet, sind aber für die F&E Zusammenarbeit weniger relevant²⁰². Die Formen Fusion und Akquisition wurden in der Automobilindustrie in vielen Fällen eingesetzt. Allerdings waren die Anwendungen weniger erfolgreich als zunächst angenommen. Als Beispiel sind hier die Übernahme von Rover durch BMW und die Fusion von Daimler-Benz und Chrysler zu nennen. Inzwischen wurden Rover und Chrysler weiterveräußert²⁰³. Die strategische Gruppe und Wertschöpfungspartnerschaften werden im Gegensatz häufig in der Praxis als Zusammenarbeitsform eingesetzt und gewinnen heutzutage zunehmende Bedeutung in der Automobilindustrie. In diesem Unterkapitel werden zwei wesentliche Ausprägungen der Zusammenarbeit bzw. strategische Allianz und Joint Venture erläutert.

Strategische Allianz

Strategische Allianz steht für den Strategiebezug von Kooperationen, die durch eine zwischen zwei oder mehreren selbstständigen Unternehmen gegründete Koalition zur Verstärkung der Fähigkeiten in einzelnen Geschäftsfeldern bezeichnet werden. Die Grundidee der strategischen Allianz besteht in Realisierung der Wettbewerbsvorteile durch eine langfristige und strategische Kooperation. Das Wort „Allianz“ beschreibt eigentlich, dass mehrere Unternehmen das gemeinsam machen, was sie allein auch tun können²⁰⁴. Dies bezieht sich im allgemeinen Sprachgebrauch eher auf die horizontalen Kooperationen. In letzter Zeit kommt der Begriff „strategische Netzwerke“ innerhalb der Automobilindustrie vermehrt zur Anwendung. Bei erfolgreichen Allianzen / Netzwerken weisen die Kooperationspartner ähnliche Kulturen auf und haben eindeutige Ziele sowie Verantwortlichkeiten für die Gemeinschaftsaufgaben definiert und eine gemeinsame Vision von dem zu entwickelnden Produkt²⁰⁵. Da die beteiligten Unternehmen in vielen Fällen außerhalb der Allianz gleichzeitig Konkurrenten sind, wird die Bildung des Vertrauensverhältnisses dadurch erschwert.

Ein Beispiel hierfür stellt die Allianz zwischen Renault und Nissan dar. Schon im Jahr 1999 wurde einen Allianzvertrag von Renault und Nissan untergezeichnet²⁰⁶. Auf Basis dieser Allianz wurde die Renault-Nissan B.V. GmbH mit Sitz in Amsterdam und Büros in Paris und Tokio von den zwei Partnern im Jahr 2002 gemeinsam gegründet, um die Kooperationsaktivitäten zu steuern. Dank dieser Allianz haben die beiden Partner gemessen an ihrem jeweiligen Umsatz einen deutlich höheren Gewinn im Jahr 2006 erzielt. Im Jahr 2010 war die Renault-Nissan Allianz viertgrößter

²⁰² Heftrich 2001

²⁰³ Wallentowitz et al. 2009

²⁰⁴ Heftrich 2001

²⁰⁵ Wallentowitz 2009

²⁰⁶ Quelle: Nissan Motor Cooperation

Automobilhersteller hinter Toyota-Konzern, General Motors, Volkswagen-Konzern²⁰⁷. Weiterhin wurde im Jahr 2010 eine strategische Kooperation mit Daimler AG gestartet, um gemeinsam hocheffizienter Dieselmotoren und Benzinmotoren zu verbessern und die Kooperation im Bereich Nutzfahrzeug zu verstärken.

Darüber hinaus wurde eine Entwicklungspartnerschaft mit dem Name „AUTOSAR“ von Automobilherstellern, Zulieferern und Steuergeräteherstellern etabliert, um die Softwarearchitektur im Automobil zu standardisieren²⁰⁸.

Joint Venture

Ein Joint Venture wird auch als eine institutionelle Ausgestaltung von strategischer Allianz identifiziert²⁰⁹. Während die strategischen Allianzen meist nicht zur Gründung eines gemeinsamen Unternehmens führen, wird die Gründung eines gemeinsamen rechtlich selbstständigen Unternehmens im Rahmen einer zwischenbetrieblichen Kooperation als Joint Venture verstanden. Durch ein Joint Venture werden sowohl die Führungskraft als auch das finanzielle Risiko auf allen beteiligten Partner geteilt. Wie bei der strategischen Allianz kommen Größenvorteile für horizontale Kooperation in Betracht. Allerdings müssen alle beteiligten Partner sich nicht zwingend auf einer Wertschöpfungsstufe befinden²¹⁰.

Da der alleinige Eintritt in den ausländischen Markt über eine Gründung eines 100% Tochterunternehmens oftmals nicht möglich ist, stellt das Joint Venture eine Markteintrittsstrategie dar, um bestimmte Eintrittsbarrieren zu begegnen²¹¹. Mit den Marktkenntnissen von lokalen Partnern, die sich mit den marktspezifischen Kundenanforderungen besser auskennen und häufig bereits den Kontakt zur Regierungen und Behörden besitzen, kann der Markteintritt ohne große Rückschläge vorgezogen werden. Außerdem erfordert ein Joint Venture meistens eine kürzere Aufbauphase und Anlaufzeit. Im Vergleich zur Unternehmensübernahme wird beim Joint Venture kein erheblicher Ressourceneinsatz benötigt²¹². Darüber hinaus wird ein Joint Venture bevorzugt, um von den Stärken des Kooperationspartners zu lernen.

Als ein Beispiel an dieser Stelle dient der Toyota Peugeot Citroën Automobile (TPCA), welches ein Joint Venture von Toyota und PSA Peugeot Citroën im Jahr 2002 in der Industriezone Kolín gegründet wurden. Im Rahmen dieser Kooperation können das Werk in Kolín von Toyota und PSA genutzt werden, um moderne und hochwertige Kleinwagen zu produzieren und sie in diesem Preissegment auf dem

²⁰⁷ Quelle: Car Center Automotive Research

²⁰⁸ Kirschke-Biller et al. 2011

²⁰⁹ Heftrich 2001

²¹⁰ Wallentowitz et al. 2009

²¹¹ Hanschen 2010

²¹² Wang 2014

europäischen Markt zu vertreiben. Des Weiteren können die komplementären Kernkompetenzen von beiden Partnern ausgenutzt werden. PSA ist wegen seiner Erfahrungen mit dem Zielmarkt und fortgeschrittener Kenntnisse bezüglich Dieselmotoren für Einkaufsoperation, Zuliefererkoordination und Dieselmotoren zuständig. Toyota bringt im Gegensatz sein Know-how für Produktionssysteme und Benzinmotoren in die Kooperation mit²¹³.

In 2005 wurde die Produktion des Toyota Aygo, Peugeot 107 und Citroën C1 gestartet. Bis 2014 wurden insgesamt mehr als 2,3 Mio. Fahrzeuge hergestellt. Ab Mai 2014 werden die neuen Modelle von Toyota Aygo, Peugeot 108 and Citroën C1 dort produziert²¹⁴. Da PSA und Toyota durch das Joint Venture schneller als geplant exzellent zusammenarbeiten und die kulturellen und unternehmensbedingte Hindernisse erfolgreich überwunden haben²¹⁵, gilt das TPCA als Musterbeispiel für gelungene Kooperationen.

Ein weiteres Beispiel sollen die deutschen Unternehmen im chinesischen Markt bilden. China ist mit einem erheblichen jährlichen Wachstum des Bruttoinlandsproduktes (BIP) in Höhe von durchschnittlich mehr als 9 % in den letzten 17 Jahren (1996 - 2014) die zweitgrößte Wirtschaftsmacht der Welt hinter den USA und weist demzufolge eine hohe Anziehungskraft auf ausländische Investoren auf²¹⁶. Ein anderes wesentliches Argument stellt das hohe Absatzpotenzial auf Grund der großen Bevölkerung dar. Seit der Öffnungs- und Reformpolitik in 1978 begann der Eintritt der deutschen Unternehmen auf dem chinesischen Markt. Joint Venture war die erste legale Unternehmensstruktur für ausländische Investoren auf dem chinesischen Markt²¹⁷. Hierbei nehmen ein hoher Anteil der Direktinvestitionen die Form Joint Venture ein²¹⁸. Noch Mitte der 1990er Jahre hatte die chinesische Regierung versucht, außer den bereits existierenden Automobilherstellern Joint Ventures nur noch sehr beschränkt ausländische Hersteller in China zuzulassen. Da dadurch auch die chinesischen Hersteller beeinträchtigt wurden, wurde diese Politik eingestellt. Seit dem WTO-Beitritt (Welthandelsorganisation) in 2001 sind kontinuierlich steigende ausländische Direktinvestitionen entstanden. Für die ausländischen Automobilhersteller müssen sie mit chinesischen Unternehmen Joint Ventures eingehen, an denen sie maximal einen Kapitalanteil von 50% halten dürfen²¹⁹. Bis 2013 haben ca. 5000 deutsche Unternehmen in China investiert. Wegen des hohen Absatzpotenzials sind weiter steigende deutschen Investitionen in

²¹³ Wallentowitz et al. 2009

²¹⁴ Quelle: Toyota Peugeot Citroën Automobile (TPCA)

²¹⁵ Quelle: Toyota Peugeot Citroën Automobile (TPCA)

²¹⁶ International Monetary Fund (IMF) 2014

²¹⁷ Hoffmann 2007

²¹⁸ Hanschen 2010

²¹⁹ Depner / Dewald 2004

der Zukunft vorgesehen²²⁰. Aus empirischen Untersuchungen von WANG lässt sich feststellen, dass der Großteil der deutschen Investoren seine geplanten Ziele gut bis sehr gut erreichen konnte²²¹.

Volkswagen ist aufgrund seines frühzeitigen Eintritts in den chinesischen Markt und der dadurch bedingten langen Investitionsdauer der Pionier der deutschen Unternehmen in China. Volkswagen begann seine Präsenz in China mit der Gründung eines Joint Ventures (Shanghai Volkswagen Abkürzung: SVW) mit der heutigen SAIC im Jahre 1984. Am Anfang war SVW nur für den Import sämtlicher Komponenten und den Zusammenbau des Gesamtfahrzeugs zuständig. Durch politischen Druck sah SVW sich gezwungen, den „local content“ zu erhöhen²²². Mit Unterstützung der Shanghaier Stadtregierung hatte SVW am Anfang 2002 sein lokales Zuliefernetzwerk auf 371 Lieferanten erweitert²²³. Durch die langjährige Marktpräsenz hat Volkswagen umfangreiche Erfahrungen gesammelt und sein eigenes Unternehmenssystem einschließlich F&E Zentrum, Werken, Zuliefer- und Absatzkanälen in mehreren Provinzen entwickelt²²⁴. Mittlerweile ist Volkswagen der Marktführer in China und verkauft dort zurzeit mehr Fahrzeuge als in Deutschland.

In den letzten Jahren hat die chinesische Regierung sich bemüht, die technische Entwicklung der chinesischen Industrie durch bestimmte Maßnahmen zu fördern. Das offizielle Ziel der chinesischen Regierung ist im Jahr 2020 2,5 Prozent des BIPs für Forschung auszugeben²²⁵. Dies verursacht den stetig steigenden Wettbewerbsdruck für ausländische Unternehmen. Daher sehen viele ausländische Unternehmen die Notwendigkeit ihre F&E sowohl im Heimatland als auch in China weiter zu verstärken. Zur Unterstützung der Produkt- und Produktionsprozessentwicklung spezifisch für den chinesischen bzw. asiatischen Markt haben einige Unternehmen ihr Forschungszentrum für den gesamten Asien- und Pazifikraum in China aufgebaut. Demzufolge ist es erforderlich, solche marktspezifische F&E vor Ort mit der allgemeinen Produktentwicklung im gesamten Unternehmen eng miteinander kooperativ durchzuführen. Durch eine gezielte Anpassung des Produkt- und Produktionsprozesses an den lokalen Markt kann neues Wissen wieder ins Unternehmens-Know-how einfließen²²⁶.

²²⁰ Wang 2014

²²¹ Wang 2014

²²² Depner / Dewald 2004

²²³ Depner / Dewald 2004

²²⁴ Wang 2014

²²⁵ Kyriasoglou 2012

²²⁶ Wang 2014

2.3.5 Tendenzen der Zusammenarbeit bei der Fahrzeugentwicklung

In diesem Unterkapitel sollten die Tendenzen und daraus resultierten Veränderungen der Zusammenarbeit in der Fahrzeugentwicklung auf Basis von Literaturrecherchen und Expertenbefragungen beleuchtet werden.

2.3.5.1 Globalisierung

Globalisierung bedeutet, dass alle Beteiligten in einem wirtschaftlichen Raum an dem Wertschöpfungsprozess teilhaben wollen, sondern nicht lediglich durch Kaufentscheidungen den Export anderer konsumieren²²⁷.

Die Globalisierung kann mit der Liberalisierung bzw. Öffnung neuer Nachfragemärkte in den sich entwickelnden Regionen bezeichnet werden. In den 80er Jahren lag der Fokus auf den Lateinamerikamärkten. Seit Ende 90er Jahren wurden immer mehr Aufmerksamkeiten dem chinesischen Markt geschenkt. Heutzutage wird Indien mit knapp einer Milliarde Bevölkerung als Zukunftsmarkt identifiziert²²⁸. Weitere Triebkräfte der Globalisierung sind die rasche Entwicklung der Kommunikations- und Informationssysteme sowie die effizienten Logistiksysteme, die die Warenströme fast zu jedem Ort der Welt hin effizient abwickeln können.

Außer den globalen Absatzmärkten bietet die Globalisierung auch ein großes Potenzial der Innovationsfähigkeit, Kostensenkung, Flexibilität am lokalen Markt und Optimierungsmöglichkeit zur Verteilung und Integration der Entwicklungsressourcen sowie des Kapitals. Gleichzeitig stellt die steigende Internalisierungstendenz die Automobilhersteller und -zulieferer ständig vor neuen Herausforderungen.

Vor allem ermöglicht die Globalisierung der Wertschöpfungskette, die Kostenvorteile in Niedriglohnländern zu nutzen und die ausländischen Märkte unmittelbar zu beherrschen. Jedoch werden die ausländischen Unternehmen durch die zum Teil überdurchschnittlich hohen Importzölle und Local-Sourcing-Quoten gefordert, nach neuen qualifizierten Entwicklungspartnern vor Ort zu suchen. Wenn deren Qualität stimmt, können die sich auf Grund des Preisvorteils auch für andere Standorte empfohlen werden²²⁹. Als Konsequenz wird die Komplexität der Logistik und des Managements der globalen Wertschöpfungskette deutlich erhöht. Daher gewinnen sowohl die Vor-Ort-Entwicklungen im Ausland, als auch geografisch verteilte Entwicklungen mittlerweile mehr an Bedeutung. Zur Bewältigung der Komplexitäten von verteilten Entwicklungen sind die in Kapitel 2.2 beschriebenen methodischen Unterstützungen und modernen Kommunikations- und Informationssysteme vor allem wichtig.

²²⁷ Wildmann 1999

²²⁸ Sanz et al. 2007

²²⁹ Wyman 2008

2.3.5.2 Disziplinübergreifende Entwicklung

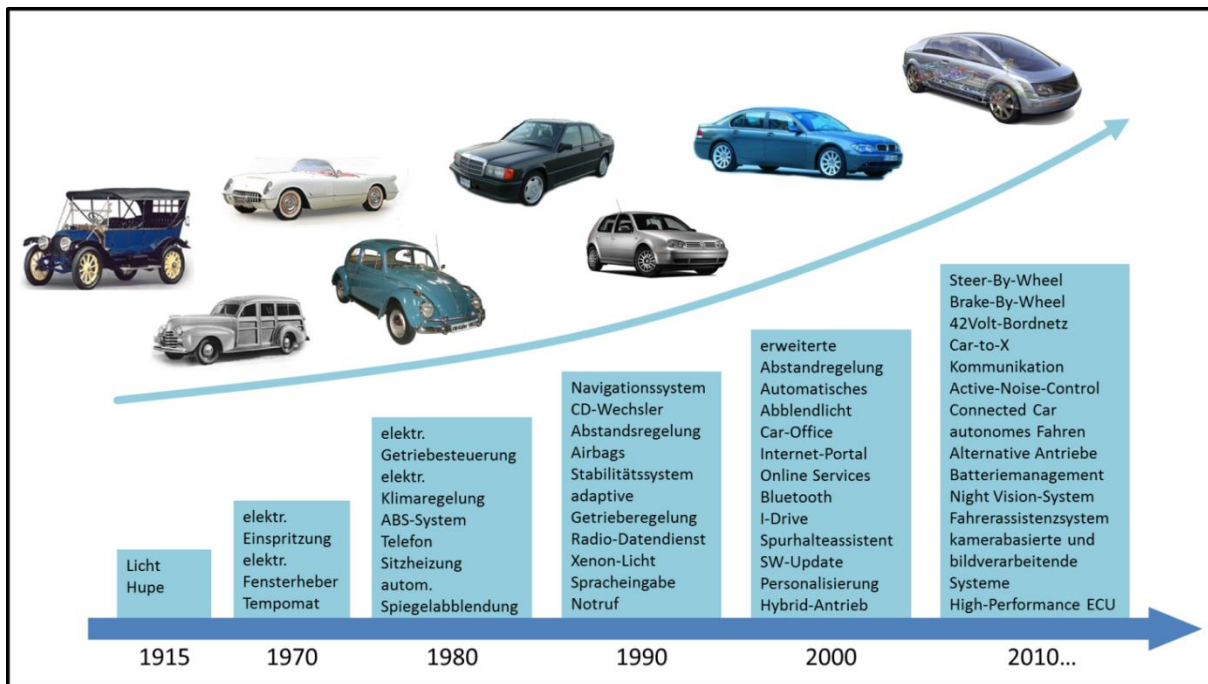
Aufgrund der hohen Komplexität von Produkten wie z.B. Gesamtfahrzeugsystemen sind die Entwicklungsaufgaben nicht mehr von einer einzelnen Person oder einer Entwicklungsgruppe aus einer Disziplin zu erledigen. Zur Entwicklung eines Gesamtfahrzeugsystems oder komplexer Komponenten existiert eine Vielzahl von Anforderungen anderer Fachdisziplinen an die Funktionsentwicklung, wie beispielsweise in den Bereichen der elektrischen Antriebsysteme sowie der mechatronische und on-Board IT Systeme. Durch den steigenden Anteil an mechatronischen und on-Board IT Systemen sowie die Entwicklung der Elektrofahrzeuge erhöht sich die Anforderung an disziplinübergreifenden Entwicklungen.

Mechatronische und IT-Systeme im Fahrzeug

Seit der Erfindung des Automobils sind immer mehr Elektroniksysteme im Fahrzeug vorhanden. Mit der Entwicklung des Automobils entwickeln sich die Elektroniksysteme auch gleichzeitig. Immer mehr Funktionen vom Fahrzeugsystem werden mittels Elektronik anstelle reiner Mechanik erledigt. Deswegen steigt die Anzahl der Elektroniksysteme ständig an (Bild 2-21)²³⁰. Der rasante Anstieg der Preis-Leistungsverhältnisse elektronischer Bauteile haben in den letzten Jahren zu einem extremen Anstieg an mechatronischen Systemen im Automobil geführt²³¹. Die immer ansteigenden kundenrelevanten Funktionen in den Bereichen Komfort und Sicherheit lassen sich nur durch moderne Elektronik erfüllen. Daher basieren die meisten Innovationen im Automobil heute auf Software und Elektronik. Auch aus den Ergebnissen von Experteninterview im Rahmen eines Forschungsprojekts lässt sich feststellen, dass die IT-Dienste eine immer wichtigere Rolle spielen werden.

²³⁰ Seeliger 2007

²³¹ Diehl 2009

Bild 2-21: Entwicklung der Elektrik/ Elektronik im Kraftfahrzeug²³²

Elektrifizierung

Im Jahr 2012 wird knapp 20% des gesamten CO₂-Ausstoßes vom Verkehr verursacht²³³. Die Elektrifizierung des Antriebssystems ermöglicht, die Abhängigkeit vom Öl zu reduzieren, die Emissionen zu minimieren (bei niedriger CO₂-Gesamtbilanz) und die Fahrzeuge besser in ein multimodales Verkehrssystem zu integrieren. Deswegen ist die Elektrifizierung des Antriebssystems eine sehr wichtige Entwicklungsrichtung für die zukünftige Mobilität. Allerdings müssen im Zuge der Elektrifizierung des Antriebssystems nicht nur neue Antriebskomponenten entwickelt werden, sondern auch neue Entwicklungsmethoden sowie vernetzte Toolketten, neue Geschäftsmodelle und neue Steuerungsmöglichkeiten für intelligente Stromnetze. Mittlerweile sind fast alle Automobilhersteller in diesem Bereich sehr aktiv und haben in den letzten Jahren ihre Elektrofahrzeuge angekündigt. Toyota ist sehr erfolgreich in diesem Bereich mit seinem Hybridmodell Prius. Die amerikanische Firma Tesla hat 22.477 Modelle seines elektrischen Sportwagens Model S in 2013 verkauft. Volkswagen bringt gerade dem e-Golf das zweite reinelektrische Fahrzeug nach E-up! auf den Markt. BMW i3 ist seit seiner Ankündigung immer gefragt. Außerdem liefert BMW den Hybridsportwagen i8 seit 2014 aus. Auch Daimler hat kürzlich das mit seinem chinesischen Partner BYD gemeinsam entwickelte Elektroauto Denza vorgestellt.

²³² Seeliger 2007

²³³ Quelle: Umweltbundesamt

Gleichzeitig unterstützen viele Regierungen die Entwicklung der Elektromobilität durch politische und finanzielle Fördermaßnahmen, um eine führende Position in diesem Bereich zu halten. Beispielsweise unterstützt die chinesische Regierung seit 2001 massiv die Entwicklung der Elektrofahrzeuge in China. Mit den „Mega-Projekt für Elektrofahrzeuge“ im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms 863 wird gezielt die Entwicklung der Elektromobilität in China vorangebracht²³⁴. Im Rahmen dieses Mega-Projektes werden insgesamt drei Antriebskonzepte bzw. Batterie-, Hybrid- und Brennstoffzellenelektrofahrzeug gefördert. Zwischen den sogenannten „drei Säulen“ ergeben sich auch Synergien, die aus drei Kernkomponenten bestehen. Dies sind die sogenannten „drei Ebenen“: Energiespeichersystem (inkl. Batterie und Brennstoffzellen), Elektromotorsystem und Gesamtfahrzeugsteuerungssystem.

Die Entwicklung der Elektromobilität erfordert eine enge Zusammenarbeit der Fahrzeughersteller, Automobilzulieferer, Energieversorger, IT-Unternehmen sowie Forschungsinstitute. Um diese drei Säulen- und drei Ebenen-Struktur zu verwirklichen, hat die chinesische Regierung viele Teilprojekte mit konkreten Zielen in Gang gesetzt, an denen zahlreiche Universitäten, Forschungsinstitute und Unternehmen beteiligt sind. Darüber hinaus werden Forschungsprojekte in Kooperation mit ausländischen Universitäten und Forschungsinstituten stark unterstützt, damit die Forschung nicht nur in einem geschlossenen Kreis stattfindet.

Ein Beispiel hierzu stellt das „Sino-German Network on Electromobility“ dar. Das „Sino-German Network on Electromobility“ wird vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem chinesischen Ministerium für Wissenschaft und Technologie gemeinsam gefördert, um die Entwicklung der Elektromobilität in Deutschland und China voranzutreiben und ein Forschungsnetzwerk zwischen deutschen und chinesischen Universitäten zu entwickeln. Im Rahmen dieses Netzwerks arbeiten sieben qualifizierte Universitäten (drei deutsche und vier chinesische) gemeinsam an drei wesentlichen Themen: Energiespeichersystemen, Entwicklungs- und Validierungsmethoden sowie Infrastrukturen für Elektromobilität. In einem Projekt im Rahmen des „Sino-German Network on Electromobility“ wurde eine Studie über Entwicklungsprozesse der Elektromobilität in Deutschland und China durchgeführt, um Tendenzen und Herausforderungen zukünftiger Elektrofahrzeugentwicklung mit Schwerpunkt auf Validierung zu erkennen. Diese Studie hat folgende Ergebnisse erbracht²³⁵:

- Die Experten sehen das fehlende Erfahrungswissen insbesondere in den Bereichen EMV und Hochvoltsystemen als problematisch an. Zudem verändern sich die Anforderungen im Bereich der NVH grundlegend, sodass auch hier wenig auf

²³⁴ Canzel / Schmidt 2008

²³⁵ Albers et al. 2014d

vorhandenes Wissen zurückzugreifen ist. Diesen Entwicklungen kann nur durch systematisches und methodisches Vorgehen begegnet werden.

- Durchweg wird als Konsequenz eine verstärkte Entwicklung hin zur Plattformstrategie gesehen. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass die Entwicklungstiefe der Lieferanten stark zunehmen wird. Dementsprechend wird der Kommunikationsaufwand steigen und die Zusammenarbeit zwischen OEMs und Zulieferern vertieft werden müssen.
- Langzeitstabilität und Sicherheit werden als Problem durch kaum vorhandene Erfahrung genannt, dem durch angepasste Prozesse entgegnet werden muss. Dem kann nur durch projektbegleitende Validierung in enger Zusammenarbeit mit den Zulieferern begegnet werden.
- Eine rein virtuelle Validierung wird nicht zielführend und zudem nicht effizient sein. Die virtuellen Validierungsmethoden müssen in geeigneter Weise mit physischen Modellen gekoppelt werden. Durch verstärkten Softwareanteil in E-Fahrzeugen können die bekannten und derzeit weit verbreiteten Dauerlauftests die Validität nicht mehr in geeigneter Art und Weise sicherstellen, stattdessen müssen Use-Case basierte Validierungsmethoden definiert werden.
- Die Validität bestimmter Mobilitätskonzepte ist abhängig vom Einsatzort und -zweck. Hier werden skalierbare Methoden benötigt, die die speziellen Einflussfaktoren des Zielmarktes (regionale Anforderungen) und der Nutzungsszenarien einschließen und berücksichtigen.

2.3.5.3 Veränderungen der Zusammenarbeit in der Fahrzeugentwicklung

Auf Basis der oben aufgeführten Tendenzen können vier wesentliche Veränderungen der Randbedingungen in der Automobilindustrie identifiziert werden²³⁶:

- Auslagerung der Wertschöpfung
- Modularisierung und Integration in der technischen Entwicklung
- Steigende Globalisierung der Wertschöpfungsprozesse
- Konsolidierung der Zuliefererindustrie

Um den von den neuen Randbedingungen resultierten Herausforderungen zu begegnen, muss die Zusammenarbeit im automobilen Wertschöpfungsnetzwerk eine neue Qualität erreichen. Eine gute Zusammenarbeit erkennt OETINGER an²³⁷:

- Vertrauen: Offene Kommunikation auch in kritischen Situationen
- Effizienz: Zusammenarbeit mit hoher Qualität und hohem Servicegrad

²³⁶ Sanz et al. 2007

²³⁷ Oettinger 2008

- Zukunft: Gemeinsame Entwicklung -- Mehrwert für Kunden
- Kommunikation auf breiter Basis
- Kontinuierliche Verbesserung der Zusammenarbeit

Dafür sind die Verbindungen zwischen Unternehmen, Technologien und Menschen besonders wichtig, um eine intensiv kooperative und hoch effiziente Zusammenarbeit zu verwirklichen²³⁸. Nach AMMER lassen sich die Verbesserungen der Zusammenarbeit in Bezug auf Vernetzung in der nachfolgenden Tabelle 2-2 zusammenstellen.

Tabelle 2-2 Paradigmenwechsel in der Zusammenarbeit²³⁹

	Heute	Zukünftig
Innovation	<ul style="list-style-type: none"> • Überwiegend bilaterale Problemlösungen • Kein spezieller Anreiz für Innovationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Vernetzte Problemlösung • Incentivierung von Innovation
Führung und Kommunikation	<ul style="list-style-type: none"> • Unternehmensspezifische Verbesserung • Unternehmensspezifische Wertschöpfungsstrategien • Stark individuelle Prozesse • Von Commitment geprägte Kommunikation • Hierarchische Zusammenarbeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Unternehmensübergreifende Verbesserung • Integrierte Wertschöpfungsstrategien / vereinte und sich gegenseitig ergänzende Kompetenzen • Integrierte Prozesse • Auf Vertrauen basierende intensive Kommunikation
Zugriff	<ul style="list-style-type: none"> • Lokale bzw. unternehmensspezifische Standards • Unabhängige Unternehmensplanung und -kontrolle • Unabhängige Ressourcen und Investitionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Volle Vernetzung und Integration von Spezialwissen • Gemeinsame Zielvereinbarungs- und Eskalationsprozesse • basierend auf einheitlichen Standards • Integrierte Unternehmens-

²³⁸ T-Systems 2009

²³⁹ T-Systems 2009

	<ul style="list-style-type: none"> • Lose Zusammenarbeit 	<ul style="list-style-type: none"> • planung und -kontrolle • Gemeinsame Ressourcen und Investitionen
Risiko	<ul style="list-style-type: none"> • Kurzfristige Gewinnmaximierung • Einfache vertragliche Regelung von Informationsaustausch 	<ul style="list-style-type: none"> • Intensive Zusammenarbeit • Gemeinsame Gewinn- und Risikoteilung • Verträge zur Sicherung von Intellectual Property

2.3.6 Zwischenfazit

Dieses Unterkapitel beschäftigte sich mit der Zusammenarbeit in der Automobilindustrie bzw. in der Fahrzeugentwicklung bzgl. deren jetzigen Stands und möglicher Änderungen in Zukunft. Zunächst wurden die zwei wesentlichen Teilnehmer der Automobilindustrie (Hersteller und Zulieferer), und die Beziehung sowie die Zusammenarbeitsformen zwischen den zwei Teilnehmern vorgestellt. Unter Berücksichtigung der oben genannten Tendenzen und Veränderungen sind immer mehr kooperative Entwicklungen von unternehmensintern über Standorte und Zeitzone hinweg, aber auch unternehmens- und disziplinübergreifend vorhergesehen. Daher erkennt man, dass die verteilte Zusammenarbeit bzw. kooperative Entwicklung eine wichtige Rolle in der Fahrzeugentwicklung spielen werden.

2.4 Validierung in der Fahrzeugentwicklung

Wie in 2.1.1.1 erklärt, ist Validierung nach ALBERS die zentrale Aktivität der Produktentwicklung. Dies gilt natürlich auch für das Produkt „Fahrzeug“. Schon in der Frühzeit des Automobils war die große Bedeutung der Validierung erkannt worden. Mit der Entwicklung der Automobilindustrie sind auch die Validierungsaktivitäten in der Fahrzeugentwicklung immer vielfältiger und komplexer geworden. Mit Hilfe der Informationstechnik werden moderne Simulationswerkzeuge und Prüfstandssysteme zur effizienten Validierung entwickelt und verbreitet.

Im Folgenden werden zunächst die historischen Validierungsaktivitäten in der Fahrzeugentwicklung vorgestellt und dann auf den heutigen physischen Versuch, die virtuelle Simulation und die Integration dieser beiden Bereiche eingegangen. Anschließend wird der IPEK-XiL-Ansatz als ein ganzheitlich systemischer Validierungsansatz ausführlich erläutert. Abschließend werden die Validierungsaktivitäten in der verteilten Fahrzeugentwicklung im Rahmen dieser Arbeit besonders betrachtet.

2.4.1 Historische Fahrzeugvalidierung

Zur Absicherung der Fahrleistung und Haltbarkeit kamen sehr früh entsprechende Validierungsmethoden und Werkzeuge zum Einsatz. Bereits im Jahr 1821 erfand Gaspard de Prony zur Leistungsmessung von rotierenden Maschinen eine mechanische Friktionsbremse, die auch als Prony'scher Zaum benannt wird (Bild 2-23 links)²⁴⁰. 1877 folgte die hydraulische Leistungsbremse zur Leistungsmessung der Dampfmaschinen durch William Froude (Bild 2-23 rechts)²⁴¹.

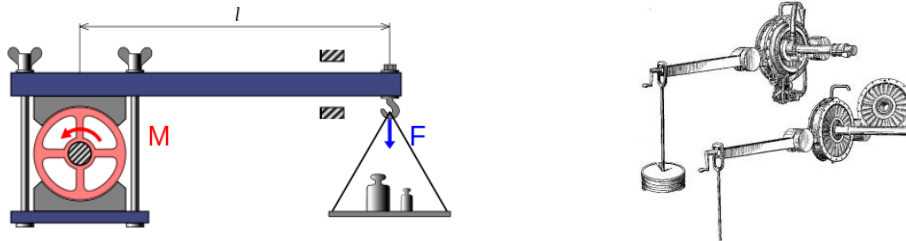


Bild 2-22: Prony'scher Zaum (links)²⁴²; Hydraulische Leistungsbremse nach William Froude (rechts)²⁴³

Der klassische Gesamtfahrzeugversuch fängt mit der Geburt des Fahrzeugs im Jahr 1886 an. Carl Benz erlebte seine erste öffentliche Probefahrt am 3. Juli 1886 in Mannheim. Davor wurden die ersten Probefahrten aus Geheimhaltungsgründen auf dem Firmengelände durchgeführt²⁴⁴. Dies kann als die erste Validierungsaktivität des Fahrzeugs verstanden werden. Zum Nachweis der Zuverlässigkeit der Fahrzeuge verschiedenster Hersteller und zum Vergleich mit der Konkurrenz wurde im Jahr 1923 erstmals das 24-Stunden-Rennen von Le Mans veranstaltet²⁴⁵. Auch die Gesamtfahrzeugprüfstände kamen sehr früh zum Einsatz, um die reproduzierbaren Versuchsbedingungen und die Erfassung der Daten auf Gesamtfahrzeugebene zu ermöglichen²⁴⁶.

Bis in die 1960er Jahre lag der Schwerpunkt der Fahrzeugvalidierung auf der Lebensdauererprobung. Seit Anfang der 1960er Jahre sind Crashtests einer der wichtigsten Bestandteile der Fahrzeugvalidierung geworden, um das Verhalten des Fahrzeugs bei Unfällen zu untersuchen und zu optimieren. Entsprechende Berechnungen kamen erstmals in den 1960er Jahren zum Einsatz, um einige Eigenschaften der Fahrzeugkomponenten (z.B. Biegebeanspruchung der Vorderachsel) zu bestimmen²⁴⁷.

²⁴⁰ Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Pronyscher_Zaum

²⁴¹ Schyr 2006

²⁴² Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Pronyscher_Zaum

²⁴³ Schyr 2006

²⁴⁴ Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Benz_Patent-Motorwagen_Nummer_1

²⁴⁵ Vogelpohl 2013

²⁴⁶ Vogelpohl 2013

²⁴⁷ Vogelpohl 2013

Durch die marktbedingte Erdölverknappung in den 1970er Jahren und den weitersteigenden Verbrauch der nicht erneuerbaren Erdölressource spielt der Kraftstoffverbrauch seit den 1970er Jahren eine sehr wichtige Rolle. Der Einzug der Finite-Elemente-Methode in die rechnerische Simulation ermöglicht die Validierung der konstruktiven Neuerungen für mehr Sicherheit. Die Erfindung des Mikroprozessors ermöglicht neuartige Funktionen mittels Mikroelektronik zu realisieren, welches gleichzeitig neue Validierungsaufgaben mitgebracht hat²⁴⁸.

Seit den 1980er Jahren existiert die Verknüpfung zwischen Konstruktion, Berechnung und Versuch, die eine Steigerung der Effektivität und Effizienz der Produktentwicklung ermöglicht²⁴⁹. In der Mitte der 1990er Jahre wurde die Hardware-in-the-Loop Technologie als Maßnahme zur Verbesserung der Validierung im Automobilbereich insbesondere in der Antriebselektronik eingeführt. Hierbei steht der zu validierende Teil (meistens das eingebettete System) auf dem Prüfstand, die übrigen zum Betrieb benötigten Komponenten werden mittels Software simuliert²⁵⁰. Dank der schnellen Entwicklung der Informationstechnik und Messtechnik werden seit den 1990er Jahren immer mehr Simulationswerkzeuge für die Fahrzeugvalidierung entwickelt und eingesetzt.

Virtuelle Simulation und physischer Versuch haben individuelle Stärken und Schwächen. Mit Hilfe der frühzeitig verfügbaren Simulation kann rechtzeitig auf kritische Stellen hingewiesen werden, damit sich der erste Prototyp mit einem hohen Reifegrad erstellen lässt. Die Effekte, die sich nur mit sehr hohem Aufwand oder gar nicht detailliert genug simulieren lassen, müssen dann durch physische Versuche untersucht werden.

2.4.2 Klassische Validierungsmethode

In diesem Unterkapitel werden der oben erwähnte physische Versuch und die virtuelle Simulation als klassische Validierungsmethode erklärt.

2.4.2.1 Physischer Versuch

Physischer Versuch beinhaltet sowohl die Gesamtfahrzeugversuche auf den Straßen als auch die Untersuchungen, die im Labor auf den Prüfständen ausgeführt werden. Beispielsweise zeigt Bild 2-26 links eine Streckenerprobung im Testgelände. Zur Validierung des ABS-Systems wurden Hindernisse auf der Straße durch Schaumstoffwürfel nachgebildet. Dem gegenüber wird ein moderner Fahrzeug-Fahrdynamiksimulator von Toyota dargestellt, der zur Validierung des Bedienkomforts und der Handhabbarkeit eingesetzt wird²⁵¹.

²⁴⁸ Vogelpohl 2013

²⁴⁹ Albers 1994

²⁵⁰ Vogelpohl 2013

²⁵¹ Düser 2010



Bild 2-23: Streckenerprobung auf dem Testgelände (links)²⁵², Fahrzeug-Fahrdynamiksimulator von Toyota (rechts)²⁵³

Trotz des Einsatzes von leistungsfähigen Berechnungsverfahren sind immer noch abschließende Validierungsversuche notwendig, da viele Eigenschaften nur sehr schwierig oder mit großem Aufwand virtuell simuliert werden können. Zum Beispiel müssen die Fahrzeuge bei extremen Klimabedingungen, weltweit unterschiedlichen Kraftstoffqualitäten und verschiedenen marktspezifischen Fahrerverhalten über einen langen Zeitraum zuverlässig funktionieren. Mit rein virtuellen Simulationsmethoden ist dies nicht hinreichend zu validieren. Mittlerweile werden die Versuchsfahrzeuge viele Millionen Testkilometer in extrem warmen, kalten, staubigen, trockenen und nassen Gebieten gefahren, um die Qualität für globale Märkte abzusichern.

2.4.2.2 Virtuelle Simulation

Bis in die 1930er Jahre dominierten die physischen Versuche bei der Fahrzeugvalidierung²⁵⁴. Bei der virtuellen Simulation werden die Versuche an physischen Systemen durch Simulation an virtuellen Modellen ersetzt. Durch die Leistungssteigerung des Computers erfolgt der Einsatz von virtuellen Modellen in der Fahrzeugentwicklung seit Anfang der 1960er Jahre²⁵⁵. Ein großer Vorteil der virtuellen Simulation besteht in der Freiheit der Modelle. Je nach Aufwand und Zeit können viele Systeme, die sich mit physischen Modellen nur mit hohem Aufwand beschreiben lassen, sehr gut virtuell nachgebildet werden und durch Simulation analysiert werden. Außerdem können die Modelle in ganz unterschiedlichen Umgebungen analysiert werden, um das System in extremen Fällen zu untersuchen. Weiterhin erlaubt die Simulation, die Systeme in beliebigen Zeitintervallen, Räumen und Orten zu beobachten, da die Änderungen der Bedingungen oder der Modelle selbst unkompliziert erfolgen kann.

²⁵² Düser 2010

²⁵³ Düser 2010

²⁵⁴ Vogelpohl 2013

²⁵⁵ Vogelpohl 2013

Da die Ergebnisse der Simulationsmodelle nur einen Teil der Realität abbilden können, ist die Möglichkeit von Modellierungsfehlern gegeben; exakte Vorhersagen des Verhaltens in der Realität sind nicht zu erreichen. Daher sollte man sich außer den Vorteilen auch den Grenzen der Simulation bewusst sein. Vor allem basieren viele Modelle und Simulationen auf plausiblen, aber nicht beweisbaren Annahmen, somit ergeben sie nur Annäherungswerte oder sogar falsche Resultate. Selbst wenn die Modelle detailliert erstellt werden, sind einige benötigte Parameter nur schwer zu ermitteln. Deshalb müssen in manchen Fällen noch nicht geprüfte Annahmen gemacht werden, welche zu falschen Resultaten führen können.

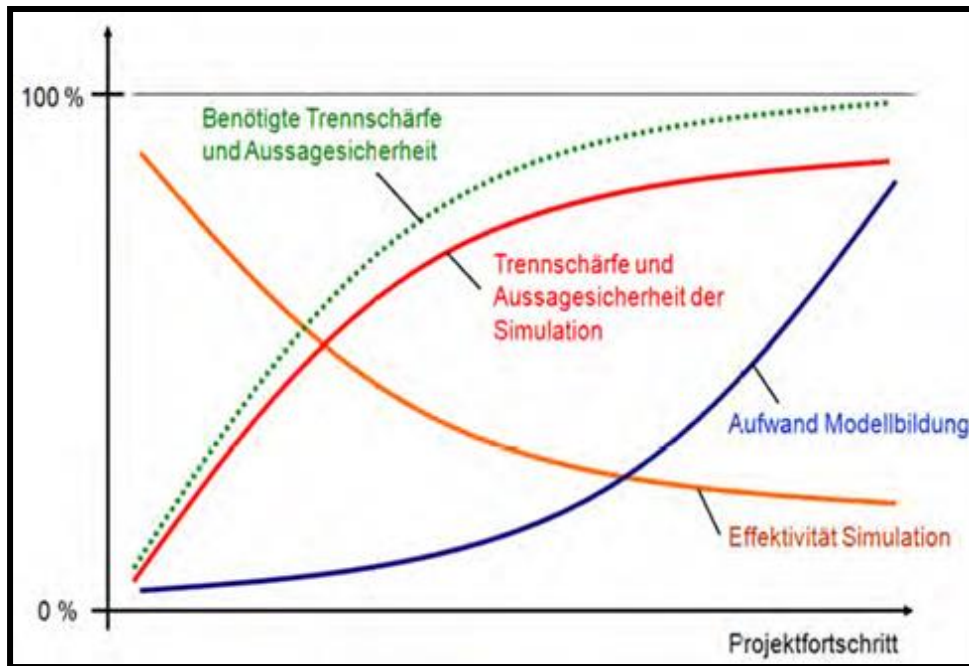
Auch die Interpretation der Daten ist ein wichtiger Bestandteil der virtuellen Validierung. Durch die Simulation wird eine große Datenmenge erzeugt, die oft nicht detailliert genug interpretiert werden kann. Daher sind Fehlerinterpretationen der Simulationsresultate nicht auszuschließen.

Zusammenfassend kann man davon ausgehen, dass die virtuelle Simulation immer ein wesentlicher Bestandteil der F&E der Automobilindustrie sein wird. Allerdings ist sie nicht das Allheilmittel für alle Probleme. Nur bei richtigem Einsatz sind wichtige Ergebnisse erzielbar. Durch gezielten Einsatz der Simulation bei der Produktvalidierung sind Eigenschaftsabsicherungen als sogenanntes Frontloading bereits in frühen Phasen der Produktentstehung möglich²⁵⁶. Somit werden Kosten und Zeit gespart und die Produktsicherheit für die Beteiligten erhöht. Mit zunehmendem Projektfortschritt bzw. zunehmender Konkretisierung des Produktes kann der Aufwand der Modellbildung stark zunehmen, um die dann erforderliche Aussagesicherheit zu erreichen. Daher können Simulationen nur dann sinnvoll sein, wenn sie zum richtigen Zeitpunkt eingesetzt werden (Bild 2-24)²⁵⁷.

Mit der sogenannten Software-in-the-Loop (SiL) Methode können die erstellten Steuerungscode und Modelle zuerst im Entwicklungsrechner zusammen mit anderen simulierten Modellen getestet werden, auch wenn es noch keine Hardware gibt.

²⁵⁶ Albers et al. 2011b

²⁵⁷ Albers et al. 2011b

Bild 2-24: Aufwand und Nutzen der Simulation im Entwicklungsprozess²⁵⁸

2.4.3 Physisch und virtuell gemischte Validierung

Durch die steigende Anzahl und Komplexität der Steuergeräte im Fahrzeug gewinnt die Vernetzung der einzelnen Steuergeräte zunehmend an Bedeutung. Auf Grund der Vielzahl an Konfigurationsmöglichkeiten ist es nicht mehr möglich das Zusammenspiel aller Steuergerätesysteme mit rein physischen Prototypen oder durch rein virtuelle Simulationen zu validieren. Die Einführung der Hardware-in-the-Loop (Abkürzung: HiL) im Automobilbereich wird die Validierung von Steuergerätesystemen und Funktionen in virtuellen Fahrsituationen ermöglicht, wenn die dazu notwendige Hardware der Nachbarsysteme (z.B. Motor oder Gesamtfahrzeug) noch nicht physisch verfügbar ist. Somit können die Steuergeräte mit unterschiedlichen Parametern unter reproduzierbaren Fahrsituationen ohne aufwendige Hardware getestet werden. Auch bei den kritischen Fahrsituationen können die Erprobungen für die Steuergeräte hinreichend realistisch durchgeführt werden, ohne dabei Fahrzeug oder Fahrer zu gefährden²⁵⁹.

HiL spielt heutzutage bei der Entwicklung von Antriebselektronik eine wichtige Rolle. Allerdings kann diese Methode nicht für allgemeine Validierungsziele angewendet werden, da nicht alle System-in-Development als physische Prototypen erstellt werden können und nicht alle Restsysteme virtuell simuliert werden können.

²⁵⁸ Albers et al. 2011b

²⁵⁹ Vogelpohl 2013

2.4.4 Validierung anhand des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes

Aus der Forschergruppe um ALBERS entstand durch langjährige Forschung und Erfahrung im Bereich der Validierung in der Fahrzeugentwicklung das Konzept, dass bei der Fahrzeugvalidierung das SiD, das Restsystem und die Einflüsse von außen des Fahrzeugs gemeinsam betrachtet werden sollten²⁶⁰. Nur dadurch kann eine globale Optimierung des Gesamtsystems erzielt werden. Allerdings fehlt noch die Handlungshandhabung, wie man diese Einflüsse systematisch und vollständig betrachten kann. Insbesondere bei der Validierung von hochkomplexen modernen Fahrzeugsystemen ist eine methodische Unterstützung erforderlich, um den Ingenieuren bei der Planung und Durchführung der Validierung zu helfen. Dazu wurde der in 2.1.5 vorgestellte IPEK-XiL-Ansatz von ALBERS et al.²⁶¹ entwickelt und als Leitfaden der Validierungsaktivitäten in der Praxis eingesetzt. Der Kern des IPEK-XiL-Ansatzes besteht in einem ganzheitlichen Verständnis aller mit dem SiD in Wechselwirkung stehenden Systeme. Beispielsweise zeigt das Bild 2-25 die Wechselwirkungen, die bei der Validierung der Antriebssysteme ganzheitlich betrachtet werden sollen.

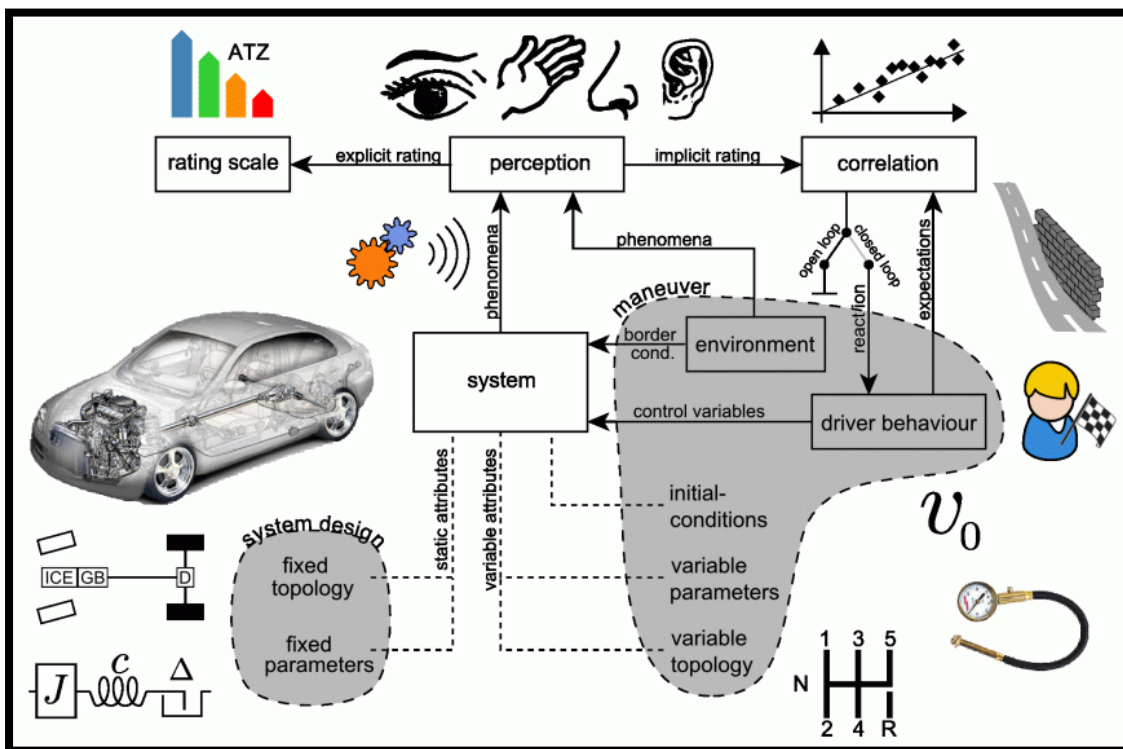


Bild 2-25: Wechselwirkungen und Eigenschaften von System, Fahrer, Umgebung im Bereich Antriebssystem²⁶²

²⁶⁰ Albers et al. 2016c

²⁶¹ Albers et al. 2016c

²⁶² Geier et al. 2012

Im Gegensatz zur HiL können alle Bestandteile des IPEK-XiL-Frameworks sowohl physisch als auch virtuell ausgeführt sein. Darüber hinaus wird beim IPEK-XiL-Ansatz das Gesamtsystem bzw. die Wechselwirkung zwischen SiD und anderen Bestandteilen (z.B. der Fahrer und die Umwelt) intensiv beachtet. Weiterhin muss das SiD nicht unbedingt das Fahrzeug oder ein Teil des Fahrzeuges sein. Der Fahrer, die Umwelt oder die Manöver und Testfälle können je nach Entwicklungszielen als SiD untersucht werden. Als Beispiel hierfür ist die Untersuchung des Einflusses von Reifen- und Seitenwellenparametern auf die Schwingungsanregung im Antriebsstrang zu nennen. Der Untersuchungsgegenstand ist als virtuelle Abbildung von Reifen und Seitenwellen ausgeführt. Das Restsystem besteht aus echtzeitfähigen virtuellen Komponenten und dem physischen Kupplungssystem, da die nicht-linearen oder spielbehafteten Eigenschaften des Kupplungssystems durch das Simulationsmodell nicht genau abgebildet werden können²⁶³.

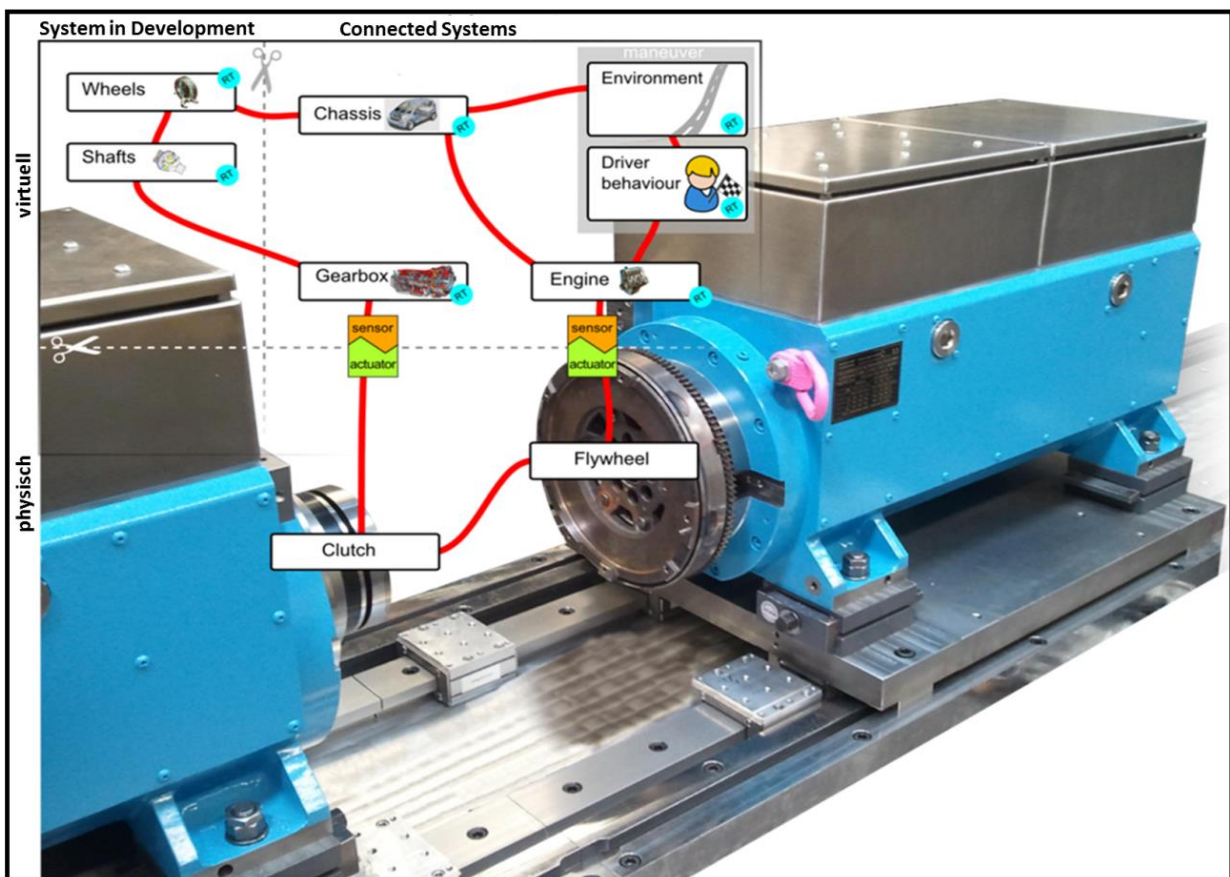


Bild 2-26: Schematische Darstellung der Konfiguration für die Validierung eines Dämpfersystemmodells²⁶⁴

Die Validierung eines Fahrerassistenzsystems (Abkürzung: FAS) anhand des IPEK-XiL-Ansatzes stellt ein weiteres Beispiel dar. Eingriffe des Fahrerassistenzsystems in

²⁶³ Albers et al. 2013b

²⁶⁴ Albers et al. 2013b

die Fahrzeugführung müssen für den Fahrer vorhersehbar, nachvollziehbar und beherrschbar sein. Deswegen müssen alle Entwicklungen sowie insbesondere die Validierung im Bereich der Fahrerassistenzsysteme den Fahrer in den Mittelpunkt stellen, denn nur so kann die Akzeptanz und Funktionalität sichergestellt werden²⁶⁵. Beispielsweise wurden ein Fahrersimulator und ein Mittelklassefahrzeug mit ACC, ein Rollenprüfstand sowie eine Umweltsimulation zur Validierung eines universellen Plug-In Kraftstoffspar-FAS eingesetzt. In diesem Fall wurde das FAS in den Fahrsimulator als ein aktives Gaspedal integriert, mit dem Gesamtfahrzeug und der simulierten Umwelt verknüpft und validiert. Dabei ist das Vorgehen nicht spezifisch für ein bestimmtes Fahrzeug oder einen bestimmten Fahrer. Die geschilderten IPEK-XiL-Umgebungen können in gleicher Konfiguration zur Adaption auf andere Fahrzeuge oder Fahrer wiederverwendet werden (Bild 2-27)²⁶⁶.

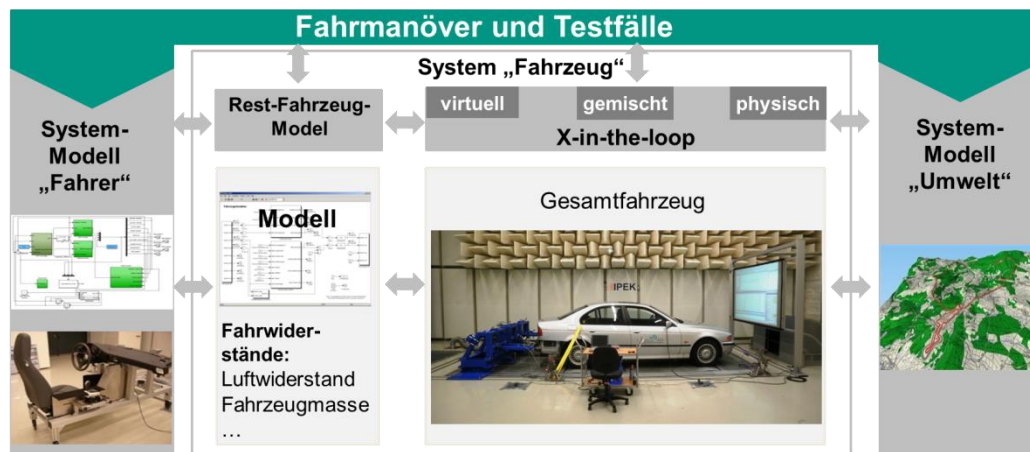


Bild 2-27: Validierungsumgebung für Fahrerassistenzsystem anhand IPEK-XiL-Ansatz²⁶⁷

2.4.5 Validierung in der verteilten Fahrzeugentwicklung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Validierung in der verteilten Fahrzeugentwicklung besonders betrachtet. Wie in Kapitel 2.3.5.3 erläutert, wird es zukünftig mehr verteilte Entwicklungen in der Fahrzeugentwicklung geben. Methoden zur Unterstützung der Validierung in der verteilten Fahrzeugentwicklung werden daher benötigt. Bisher werden die Validierungsaktivitäten in verteilten Entwicklungsumgebungen sowohl parallel als auch sequentiell durchgeführt. Die verteilte Co-Simulation stellt ein bekanntes Beispiel für parallel ausgeführte Validierungsaktivitäten dar. Als sequentiell ausgeführte Validierungsaktivität ist beispielsweise zu nennen, dass Teilsysteme zunächst von dem zuständigen Partner erstellt und dann bei einem anderen Partner mit dem Restsystem zusammen untersucht werden. Im Folgenden

²⁶⁵ Wallentowitz et al. 2009

²⁶⁶ Albers et al. 2016c

²⁶⁷ Albers et al. 2016c

wird auf diese zwei wesentlichen Formen der Validierung in der verteilten Fahrzeugentwicklung eingegangen.

Co-Simulation

Der Begriff Co-Simulation wurde ursprünglich als die Kopplung unterschiedlicher Simulationsprogramme verstanden²⁶⁸. Ein komplexes Gesamtsystem besteht meistens aus verschiedenen Teilsystemen, die nur mit domainspezifischen Simulationsprogrammen sinnvoll modellierbar sind. Um die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Teilsystemen sowie das Verhalten des Gesamtsystems zu untersuchen, ist es erforderlich, die verschiedenen spezialisierten Simulationsprogramme zu koppeln. Somit können zur Modellierung jedes Teilsystems immer die am besten geeigneten Programme zum Einsatz kommen. Außerdem wird eine Wiederverwendung der Teilsystemmodelle dadurch ermöglicht. Des Weiteren können die virtuellen Simulationen mit physischen Prototypen am Prüfstand vernetzt werden, um den Entwicklungsprozess zu beschleunigen. Zur Untersuchung eines Quetschöldämpfers wurden am IPEK eine Kombination aus diversen FE-Methoden und der Co-Simulation mit MKS (Mehrkörpersimulation) entwickelt, um das Prüfstandsverhalten zu simulieren²⁶⁹. Ein anderes Beispiel hierfür stellt die von Virtual Vehicle entwickelte Co-Simulationsplattform ICOS²⁷⁰ dar, welches ein exaktes Zusammenspiel diverser Simulationswerkzeuge sowie HiL-Systeme ermöglicht²⁷¹. Mit Hilfe des Internets ist eine Kopplung über räumliche bzw. geografische Grenzen möglich. Dadurch können die verteilten Entwicklungspartner jederzeit online interagieren.

Die Realisierung der Kopplung erfolgt auf zwei unterschiedlichen Ebenen (Modell- und Programmebene). Für die Kopplung auf Modellebene müssen die in den einzelnen spezifischen Simulationsprogrammen erstellten Modelle zu einem gemeinsamen Gesamtmodell vereint werden. Die Kopplung der Modelle geschieht innerhalb eines der beteiligten Programme. Die Integratoren des importierenden Simulationsprogramms sind dafür verantwortlich, die einzelnen Modelle zu verknüpfen und dadurch das Gesamtmodell auszuführen. Im Gegensatz dazu ist ein Modellexport zur Kopplung auf Programmebene nicht notwendig. Die auf der Programmebene stattfindende Kopplung benötigt hingegen die beteiligten Modellierungsprogramme für eine gemeinsame Simulation. Jedes Simulationsprogramm greift auf ein eignes mathematisches Modell und eine eigene Integrationsschnittstelle zurück. Die Kommunikation sowie der Austausch der berechneten Größen zwischen allen beteiligten Programmen finden über eine

²⁶⁸ Geimer et al. 2006

²⁶⁹ Albers et al. 2011c

²⁷⁰ Quelle: Virtual Vehicle, <http://www.v2c2.at/icos/>

²⁷¹ Quelle: Virtual Vehicle, <http://www.v2c2.at/research/ee-software/co-simulation/>

gemeinsame Schnittstelle statt. Die Steuerungsfunktion wird von dem Programm mit der höchsten Berechnungsrate übernommen²⁷².

Das Functional Mock-up Interface (Abkürzung: FMI) wurde beispielsweise zur Verbesserung der gemeinsamen Simulation von automobilen Hersteller und Zulieferern entwickelt²⁷³. Das FMI definiert eine standardisierte Schnittstelle, die die Kopplung verschiedener Simulationssoftware entweder auf Modellebene oder auf Programmebene unterstützt (Bild 2-28)²⁷⁴.

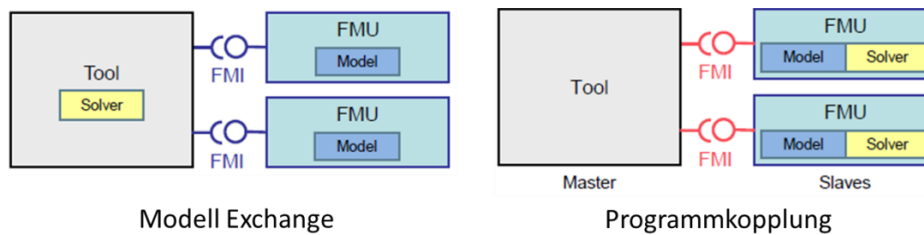


Bild 2-28: Kopplung auf Modell- (links) und Programmebene (rechts) durch FMI²⁷⁵

Außer der Kopplung verschiedener virtueller Modelle und Software lassen sich die Prüfstände und Steuergeräte mittels schneller Datenverbindung miteinander koppeln. Die Beispiele stellen die „Prüfstandsvernetzung“ nach ALBERS und YOU^{276,277,278}, die „virtuelle Welle“ nach ANDERT²⁷⁹ und der Systemintegrationsprüfstand für vernetzte mechatronische Gesamtsysteme (ein Patent von Daimler²⁸⁰) dar. Die „virtuelle Welle“ ermöglicht unterschiedliche Prüfstände und Simulationen mittels Echtzeitnetzwerk zu koppeln, dadurch können die Komponenten- und Antriebsstrangtests präzise und flexibel ausgeführt werden²⁸¹. Das Daimlerpatent beschreibt einen Systemintegrationsprüfstand für vernetzte mechatronische Gesamtsysteme mit mechatronischen und/oder elektronischen Komponenten, welche zwar räumlich verteilt sind, aber über eine echtzeitfähige Ethernet-Verbindung miteinander kommunizieren können²⁸². Sowohl die „virtuelle Welle“ als auch „Systemintegrationsprüfstand“ erfordern eine echtzeitfähige Kommunikationsumgebung. Daher ist es auf diese Weise sehr schwierig, eine Kopplung über große Distanz (bzw. unter hoher Latenzzeit) zu realisieren. Im Gegensatz dazu stellt die „Prüfstandsvernetzung“ ein Konzept zur Vernetzung der

²⁷² Geimer et al. 2006

²⁷³ Quelle: FMI Standard, <https://www.fmi-standard.org/>

²⁷⁴ Blochwitz 2014

²⁷⁵ Blochwitz 2014

²⁷⁶ Albers et al. 2013c

²⁷⁷ Albers et al. 2014a

²⁷⁸ Albers et al. 2014b

²⁷⁹ Andert et al. 2015

²⁸⁰ Deutsches Patent- und Markenamt, Aktenzeichen: 10 2004 041 428.9

²⁸¹ Andert et al. 2015

²⁸² Deutsches Patent- und Markenamt, Aktenzeichen: 10 2004 041 428.9

räumlich verteilten Prüfstände und Simulationen dar, welches mittels verschiedener Datenübertragungsmöglichkeiten ausführbar ist. Dadurch lässt sich eine Vernetzung über große Distanz mittels Internet ermöglichen.

Austausch von Prototypen

Trotz zahlreicher Vorteile der Co-Simulation lassen sich manche Effekte nicht genau genug simulieren. Daher ist es in diesen Fällen notwendig, einen Prototyp zuerst aufzubauen und sequentiell mit dem Restsystem zusammen zu untersuchen.

Zum Beispiel ist der Entwickler bei der Feinabstimmung von Kupplungs- und Schaltbetätigung auf das Fahrzeug angewiesen, da sich einige Effekte nur mit unverhältnismäßigem Aufwand simulieren oder auf dem Prüfstand reproduzieren lassen. Darüber hinaus lassen sich die Ergebnisse nur begrenzt auf andere Fahrzeuge übertragen²⁸³. Deswegen werden dem Kupplungslieferanten meistens Versuchsfahrzeuge von den Herstellern zur Verfügung gestellt. Mit dem Fahrzeug kann das Kupplungssystem effektiv für das vorliegende Fahrzeugmodell validiert werden.

2.4.6 Zwischenfazit

In diesem Unterkapitel wurden die Validierungsaktivitäten in der Fahrzeugentwicklung, von historischen Untersuchungen des Fahrzeugsystems bis hin zu modernen hoch automatisierten Validierungsaktivitäten, vorgestellt. Der physische Versuch und die virtuelle Simulation sowie die Integration der beiden wurden bezüglich jeweiliger Stärken und Eingrenzungen erläutert. Insbesondere wurde der IPEK-XiL-Ansatz als ein Leitfaden der Validierung in der Fahrzeugentwicklung durch Anwendungsbeispiele ausführlich erklärt. Darüber hinaus wurde die Validierung in der verteilten Fahrzeugentwicklung dargestellt. Zurzeit existieren relativ wenige Methoden, die spezifisch für die räumlich verteilte Fahrzeugentwicklung geeignet sind. Des Weiteren fehlt noch die Unterstützung zur Anwendung der oben genannten spezifischen Methoden und Konzepte sowie zur Ausführung einer vollständigen Validierung mit verteilten Teilsystemen. Daher ist es erforderlich, den IPEK-XiL-Ansatz in der verteilten Fahrzeugentwicklung zu implementieren und einen Handlungsleitfaden dazu zu erstellen.

2.5 Prüfstandssysteme für Antriebsstrangentwicklung

Im Rahmen dieses Kapitels wird auf die Prüfstandssysteme eingegangen, die für die Antriebsstrangentwicklung eingesetzt werden. Da SCHYR und PAULWEBER in ihren Arbeiten^{284, 285} die Prüfstandssysteme ausführlich beschrieben haben, basiert die folgende Erläuterung der Prüfstandssysteme auf den Arbeiten der zwei Autoren.

²⁸³ Kirchner 2007

²⁸⁴ Schyr 2006

Für eine effiziente und effektive Validierung des Antriebsstrangsystems kommen heutzutage unterschiedliche Prüfstände zum Einsatz. Zur Bewältigung der vielfältigen Validierungsaufgaben muss die Validierungskonfiguration an bestimmte Prüfanforderungen angepasst werden. Das Bild 2-29 zeigt eine Übersicht der Validierungskonfigurationen in der Antriebsstrangentwicklung²⁸⁶.

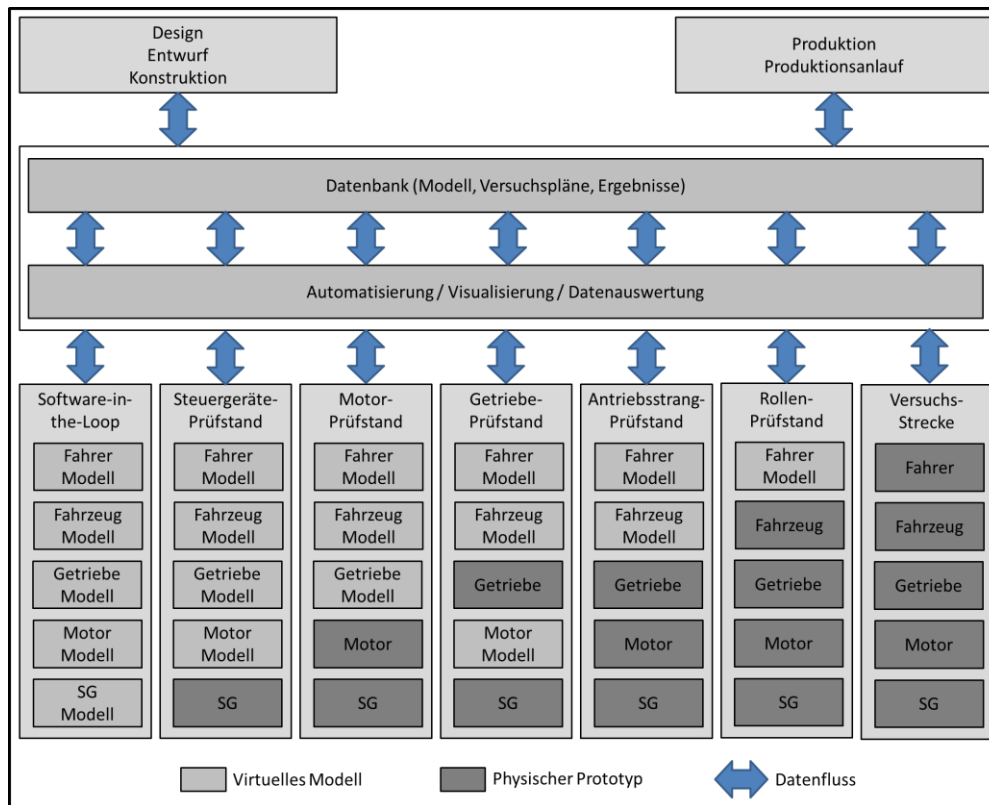


Bild 2-29: Validierungskonfigurationen in der Antriebsstrangentwicklung²⁸⁷

Um das Prüfstandssystem an einen bestimmten Prüfling bzw. an bestimmte Prüfanforderungen schnell und zuverlässig anpassen zu können, gilt der IPEK-XiL-Ansatz als ein Leitfaden. Zur Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes bei einzelnen Validierungsaufgaben ist es notwendig, die Struktur des komplexen Prüfstandssystems auf Funktionsebene zu verstehen. Paulweber gliedert den Prüfstand in drei Ebenen:

Hardware-Ebene beinhaltet den Prüfling, die Sensoren, die Aktuatoren sowie die Prüfstandsmechanik.

Die Automatisierungsebene dient der Erfassung, Verarbeitung und Abspeicherung der Daten. Die Prüfläufe werden hier im Rahmen automatisierter Versuchsreihen abgearbeitet.

²⁸⁵ Paulerweber / Lebert 2014

²⁸⁶ Schyr 2006

²⁸⁷ Schyr 2006

In der dritten Ebene erfolgt die prüffeldweite Datenspeicherung, Datenintegration sowie Datenverarbeitung, somit können die Daten aus mehreren Prüfständen zusammengefasst und vernetzt betrachtet werden²⁸⁸.

Das Bild 2-30 stellt den prinzipiellen Aufbau eines Prüfstands dar.

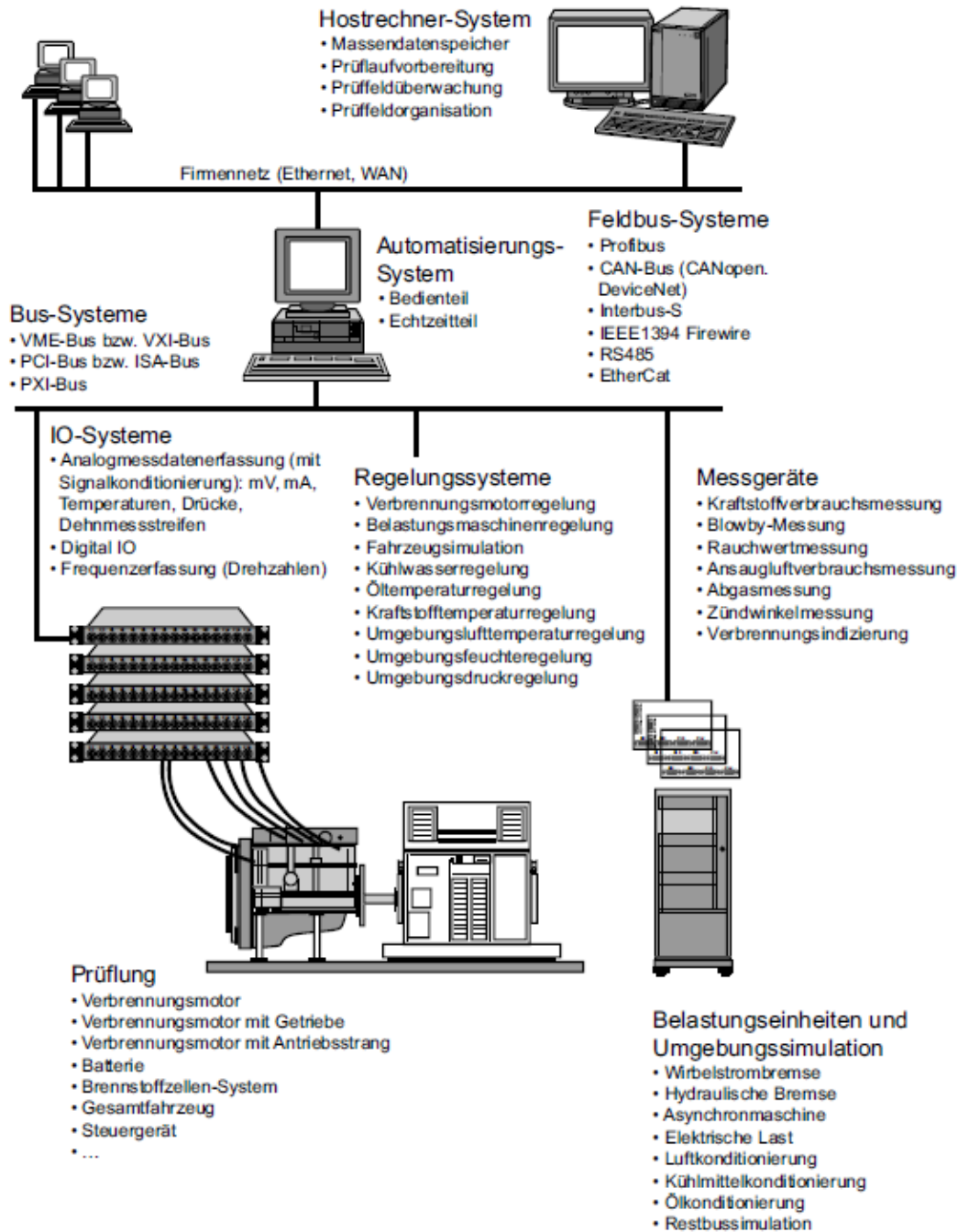


Bild 2-30: Aufbau eines Prüfstands nach Paulerweber und Lebert²⁸⁹

SCHYR unterteilt das Prüfstandssystem in fünf Ebenen die als Prozess-Ebene, Interface-Ebene, Operativ-Ebene, Bedien-Ebene und Leit-Ebene bezeichnet werden

²⁸⁸ Paulerweber / Lebert 2014

²⁸⁹ Paulerweber / Lebert 2014

(Bild 2-31). In Anlehnung an die Dissertation von SCHYR am IPEK werden im Folgenden alle fünf Ebenen vorgestellt. Zusätzlich werden die neuen Entwicklungen in diesem Bereich betrachtet.

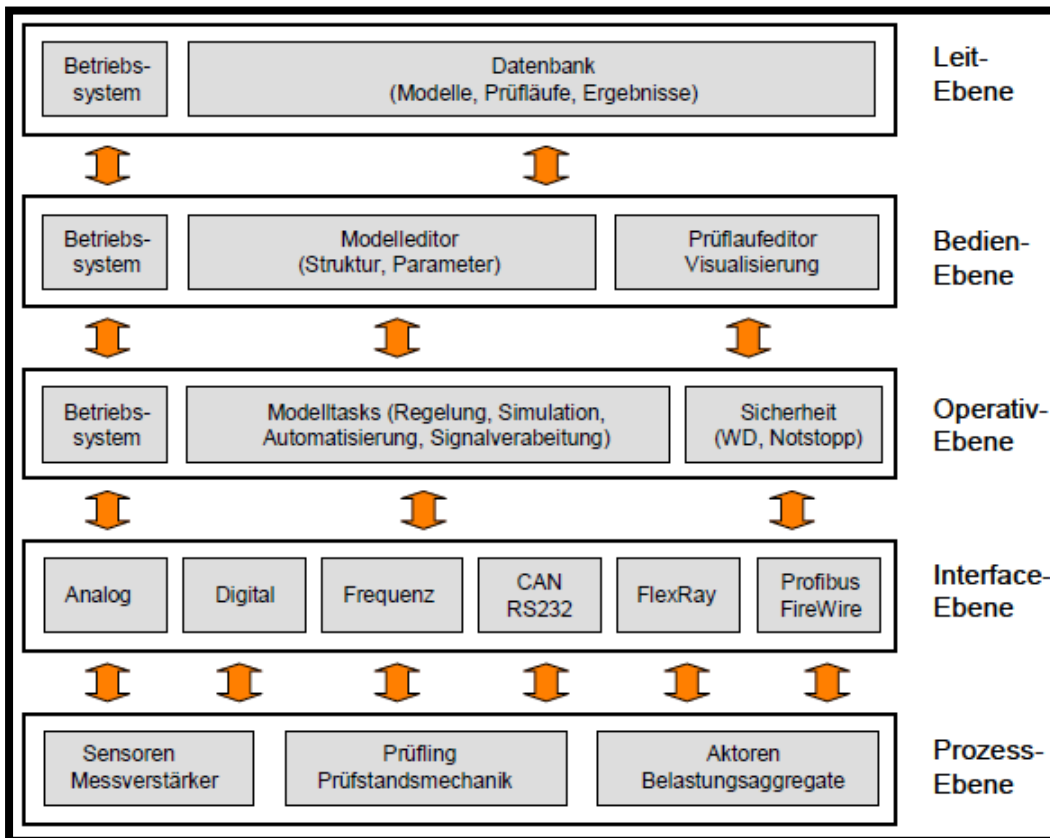


Bild 2-31: Systemarchitektur von Leistungsprüfständen²⁹⁰

2.5.1 Prozess-Ebene

Die Prozess-Ebene beinhaltet den Prüfling, die Prüfstandsmechanik, die Belastungsaggregate / Aktuatoren und die Messtechnik.

Der Prüfling ist der Gegenstand, der auf dem Prüfstand aufgebaut wird. Je nach Validierungsziel kann der Prüfling ein Element, eine Komponente, ein Subsystem oder ein gesamter Antriebsstrang sein. Die Auslegung bzw. Konfiguration des Prüfstands wird hauptsächlich von dem Prüfling bestimmt. Dies sind z.B. die Art und die Leistung der Belastungsaggregate sowie die verwendete Messtechnik. Was hier noch intensiver beachtet werden sollte, ist, dass der Prüfling nicht unbedingt der zu validierende Gegenstand sein muss. Beispielsweise (siehe Bild 2-26) werden ein Kupplungssystem und ein Schwungrad auf dem Prüfstand aufgebaut, die aber nicht der zu untersuchende Gegenstand sind²⁹¹.

²⁹⁰ Schyr 2006

²⁹¹ Albers et al. 2013b

Die Prüfstandsmechanik, die meistens aus Lager, Wellen, Flansch und gegebenenfalls noch einem Anpassgetriebe besteht, dient als mechanischer Aufbau sowie zur Anbindung und zur Belastung des Prüflings auf dem Prüfstand. Bei der Auswahl der Prüfstandmechanik müssen dessen statischen und dynamischen Eigenschaften unbedingt berücksichtigt werden, damit der Prüfling so realitätsnah wie möglich belastet werden kann. Außerdem wird die Eigenfrequenz des Prüfstands wesentlich von der Steifigkeit, Dämpfung sowie Gewicht der Prüfstandmechanik bestimmt.

Die Belastungsaggregate / Aktuatoren ermöglichen die Sollbelastung des Prüflings in physikalischen Größen. Die Belastung des Prüflings wird wesentlich von der Leistungsfähigkeit der Aktuatoren bestimmt. SCHYR beschreibt die Leistungsfähigkeit mit der Leistungscharakteristik, der Drehzahldynamik und dem Energieumsatz²⁹². Die Leistungscharakteristik bezeichnet die Momenten- und Wirkungsgradkennlinien. Die Drehzahldynamik hängt von der Ansprechzeit des Momentaufbaus im Belastungsaggregat ab. Diese Ansprechzeit wird durch die Messung der Totzeit zwischen Sollwertausgang des Reglers und dem Aufbau des Moments im Luftspalt des Belastungsaggregats ermittelt²⁹³. Diese Ansprechzeit lässt sich auf Werte von weniger als einer Millisekunde reduzieren. Außerdem wird die Wirtschaftlichkeit des Prüfstands hauptsächlich von den Energiekosten der Belastungsaggregate bestimmt²⁹⁴.

Zur Realisierung vielfältiger Belastungszustände des Prüflings kommt eine Vielzahl von Aktuatoren zum Einsatz. SCHYR hat in seiner Dissertation am IPEK insgesamt 6 Typen von Belastungsaggregaten nach Betriebsarten, Eigenschaften und Anwendungen verglichen²⁹⁵. Paulweber teilt die Aktuatoren in mechanische, elektrische und klimatische Belastungseinrichtungen ein²⁹⁶.

Die mechanischen Belastungseinrichtungen umfassen zum einen die Geräte, die ein bestimmtes Drehmoment oder eine bestimmte Drehzahl herstellen (Asynchron Dynos, PMM Dynos, Wirbelstrombremsen, Hydrostatischer Motor, etc.). Zum anderen gehören die mechanischen Steuerungssysteme wie z.B. Fahrpedalsteller und Schaltroboter zu den mechanischen Belastungseinrichtungen.

Die elektrischen Belastungseinrichtungen stellen die elektrischen Belastungen für Batterien, Leistungselektronikkomponenten oder Brennstoffzellensysteme ein. Hierzu zählen Batterie-Emulatoren, Elektrische Lasten- und E-Motor-Simulatoren.

²⁹² Schyr 2006

²⁹³ Schyr 2006

²⁹⁴ Paulerweber / Lebert 2014

²⁹⁵ Schyr 2006

²⁹⁶ Paulerweber / Lebert 2014

Die klimatischen Belastungseinrichtungen ermöglichen das Aufbringen von klimatischen Bedingungen auf den Prüflingen (z.B. Temperatur, Druck, Feuchte). Darunter versteht man die Konditioniersysteme für Ansaugluft, Kühlwasser, Öl, Kraftstoff, Ladeluft sowie für Wasserstoff oder andere Reformgase.

Weiterhin sollen die Steuersysteme bei der Validierung auch entsprechend belastet werden. Beispielsweise müssen bei der Validierung der Fahrerassistenzsysteme entsprechende Satelliten-Signale für den GPS-Empfänger bereitgestellt werden.

Ein anderer wichtiger Bestandteil der Prozess-Ebene ist die Messtechnik, die zum Messen der im Entwicklungsprozess erforderlichen Größen eingesetzt wird. Nach PAULWEBER kommt in der Regel folgende Messtechnik bei der Antriebsstrangentwicklung zum Einsatz ²⁹⁷ : Temperaturmessung, Messung elektrischer Größen, Dehnungsmessung, Kraftmessung, Druckmessung, Beschleunigungsmessung, Drehmomentmessung, Drehzahlmessung, Kraftstoffverbrauchsmessung, Luftmengenmessung, Ölverbrauchsmessung, Zündwinkelmessung, Lambdasonden, Abgasmessung, Partikelmessung, Drall und Tumble, Indiziermesstechnik, Brennstoffzellenmesstechnik. Darüber hinaus wird zur Analyse des NVH-Verhaltens die akustische Messtechnik wie z.B. Mikrofone eingesetzt.

Die Leistungsfähigkeit der Messtechnik wird stark von Messfehlern beeinflusst. In jedem Messschritt werden Messfehler verursacht. Beispielsweise weisen die Sensoren einen Nullpunktfehler, einen Verstärkungsfehler, einen Linearitätsfehler sowie einen Hysteresefehler auf. Auch bei der elektronischen Datenverarbeitung werden Messfehler durch einen Rekonstruktionsfehler bei der Berechnung der Werte zwischen den Absatzpunkten erzeugt. Paulweber hat die Messunsicherheiten, Interpolationsfehler, Kalibrierung, sowie elektromagnetische Störung als mögliche Fehlerquelle identifiziert²⁹⁸.

2.5.2 Interface-Ebene

Die von der Prozess-Ebene erfassten Signale werden auf der Interface-Ebene für die oberen Ebenen zur Verfügung gestellt. In die Gegenrichtung werden die Signale von den oberen Ebenen durch die Interface-Ebene für die Prozess-Ebene in den richtigen Formen vorbereitet. Um eine zuverlässige und zeitlich präzise Datenübertragung unter elektromagnetischen Störungen mit möglichst geringen Kosten zu realisieren, wird eine spezielle Art der Kommunikationsnetze, die Bussysteme, entwickelt. Zurzeit sind sowohl Standard-Bussysteme, die mit unterschiedlicher Hard- und Software kompatibel sind, als auch die nur in wenigen herstellereigenen Prüfständen eingesetzten Bussysteme vorhanden. Das Bild

²⁹⁷ Paulerweber / Lebert 2014

²⁹⁸ Paulerweber / Lebert 2014

2-32 stellt die Bussysteme in der Mess- und Antriebstechnik (oben) und im Fahrzeug (unten) gegenüber²⁹⁹. Im Folgenden werden die heutzutage im Automobil sehr verbreiteten Arten CAN-Bus und FlexRay vorgestellt.

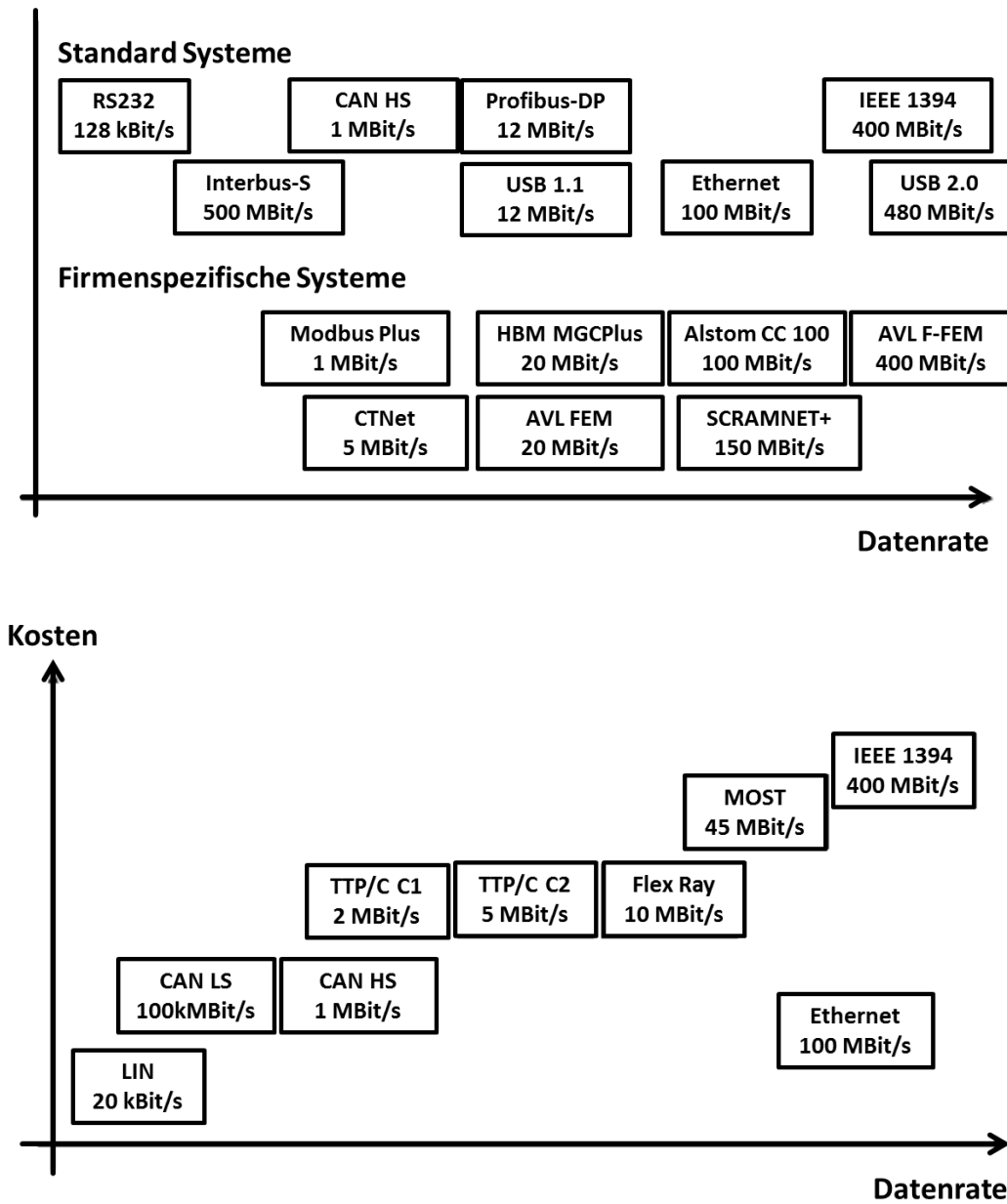


Bild 2-32: Bussysteme in der Mess- und Antriebstechnik (oben)³⁰⁰ und im Fahrzeug (unten)³⁰¹

Das Controller Area Network (Abkürzung: CAN) wurde in 1983 von Bosch für die Vernetzung der Steuergeräte im Automobil entwickelt und als ISO 11898 international standardisiert, welche die untersten beiden Layer des OSI-Modells

²⁹⁹ Albers et al. 2004

³⁰⁰ Albers et al. 2004

³⁰¹ Albers et al. 2004

(siehe 2.2.4.1) bzw. die Layer 1 (Bitübertragung) und Layer 2 (Sicherung) definiert.³⁰² Da die Komponenten für CAN sehr preisgünstig geworden sind, ist CAN seit Anfang der 90er sehr verbreitet. Die Kommunikation erfolgt mit Telegrammen, dessen genormter Aufbau als Frame bezeichnet wird. Es werden insgesamt vier Frame-Formate definiert. Dies sind: Data-Frame, Remote-Frame, Error-Frame und Overload-Frame. Das Bild 2-33 zeigt den Aufbau eines CAN Data-Frame, der zum Transport von bis zu 8 Byte Daten dient. Die Error- und Overload-Frame kennzeichnet die Fehlersituationen. Der Remote-Frame dient zum Anfordern von Daten von einem anderen Teilnehmer.

Startfeld 1 Bit	Arbitrierungsfeld 11 + 1 Bit	Kontrollfeld 6 Bit	Datenfeld 0...64 Bit	CRC-Feld 15 + 1 Bit	ACK-Feld 1 + 1 Bit	Endefeld 7 Bit
--------------------	---------------------------------	-----------------------	-------------------------	------------------------	-----------------------	-------------------

CRC: Cyclic Redundancy Check

ACK: Acknowledge-Slot

Bild 2-33: Aufbau eines CAN Frames³⁰³

Im Vergleich zu CAN ist FlexRay ein relativ junges Bussystem, dessen Entwicklung seit 1999 von BMW und DaimlerChrysler vorangetrieben wurde. Wegen seiner hohen Datenübertragungsrate, Echtzeitfähigkeit und Ausfallsicherheit erfüllt FlexRay die erhöhten Anforderungen zukünftiger Vernetzung im Fahrzeug. Der FlexRay Standard wurde in einen ISO-Standard überführt (ISO 17458-1 bis 17458-5) und definiert ebenfalls die Layer 1 und Layer 2 im OSI-Modell³⁰⁴.

Da die Erhöhung der Genauigkeit und der Flexibilität der Datenübertragung oft nur durch spezielle Bussysteme bzw. Hardware zu verwirklichen ist, kommen unterschiedliche Bussysteme bei der Kommunikation zwischen Prüfstandkomponenten, Steuerungssystemen und Prüfling gleichzeitig zum Einsatz. Das Bild 2-34 stellt beispielhaft die Kommunikationsarchitektur eines Antriebsstrangprüfstands dar. Als Kommunikationssystem zwischen einem zentralen Antriebssteuergerät DCU-1 (Drive Control Unit) und den beiden untergeordneten DCU-2 und DCU-3 wurde FlexRay ausgewählt, da dieses System alle im vorigen Absatz beschriebenen prüfstandsspezifischen Anforderungen erfüllt³⁰⁵. Außerdem wird das DCU-1 zusätzlich über CAN zu den Prüflingssteuergeräten sowie den Antriebssteuergeräten angebunden. Falls notwendig, erfolgt weiterhin die Anbindung

³⁰² Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Controller_Area_Network

³⁰³ Quelle: Fakultät Elektrotechnik und Informatik Fachgebiet Softwaretechnik, TU Berlin

³⁰⁴ Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/FlexRay>

³⁰⁵ Quelle: Fakultät Elektrotechnik und Informatik Fachgebiet Softwaretechnik, TU Berlin

der speziellen Prüfstands-Messtechnik bzw. der Haustechnik über eigene Bussysteme an den Prüfstandsrechner³⁰⁶.

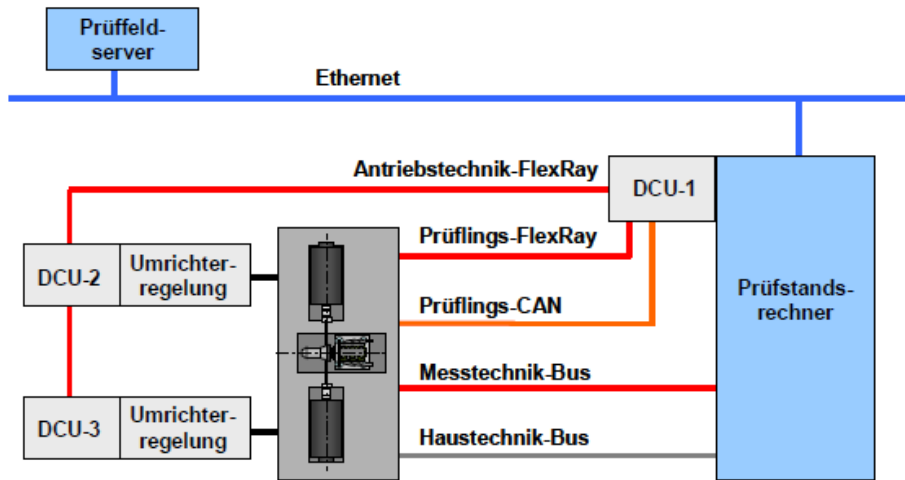


Bild 2-34: Zeitgesteuertes Kommunikationssystem eines Antriebsstrangprüfstands³⁰⁷

2.5.3 Operativ-Ebene

Die Operativ-Ebene beinhaltet eine echtzeitfähige Software- und Hardwareplattform zur Integration der Interface-Ebene und Bedien-Ebene mit den Modellen zur Automatisierung, Regelung, Simulation, Optimierung sowie Sicherheitsfunktionen. Das Bild 2-35 zeigt die zentralen Funktionen der Operativ-Ebene.

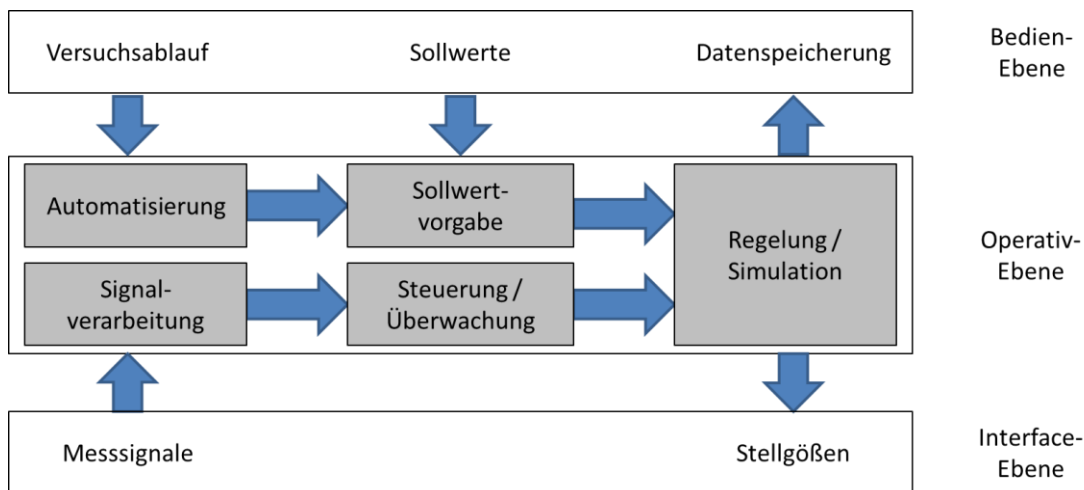


Bild 2-35: Funktionen der Operativ-Ebene³⁰⁸

Die Signalverarbeitung bereitet die von der Interface-Ebene erfassten Messgrößen durch entsprechende Algorithmen für die Steuerung, Überwachung, die Regelung und Simulation sowie die Datenspeicherung auf. Weiterhin sollen geeignete

³⁰⁶ Albers et al. 2004

³⁰⁷ Albers et al. 2004

³⁰⁸ Schyr 2006

Filterungen zur Begrenzung der Signalbandbreite und zur Bewertung stark verrauschter Signale eingesetzt werden.

Bei der Steuerung / Überwachung werden neben der Ansteuerung des Prüflings und der Belastungsaggregate auch Überwachungsaufgaben erfüllt, damit der Prüfling in sicheren Zuständen belastet wird. Die Überwachungsfunktionen erkennen die unsicheren Zustände und müssen entsprechend darauf reagieren, um den Prüfling bzw. Prüfstand wieder in sichere Zustände zu überführen³⁰⁹. Beispiele sind: Not-Aus, Not-Halt, und Betriebshalt³¹⁰.

Die Testautomatisierung ermöglicht das Einsparen von Zeit und Kosten bei dem Prüfstandsbetrieb. Dazu muss zuerst der Prüfablauf definiert werden. Dieser festgelegte Prüfablauf wird in der Operativ-Ebene in Echtzeit ausgeführt. Auch die Steuerung- und Überwachungsaufgaben sollen bei automatisiertem Betrieb integriert und ausgeführt werden. Um eine maximale Dynamik zu erzielen, ist die Abarbeitung des Prüfablaufs zeitsynchron zur Signalerfassung durchzuführen^{311,312}.

Für viele Versuche sind vordefinierte Signalverläufe erforderlich. Diese werden entweder vom Versuchsablauf automatisch generiert oder im Handbetrieb vom Versuchsingenieur vorgegeben. Die Sollwerte werden auf ihren zulässigen Wertebereich überprüft und über einen Rampengenerator für die Regelung und Simulation aufbereitet³¹³.

Regelung- und Simulationsaufgaben sind zurzeit unverzichtbar am Prüfstandssystem. In den Funktionsblöcken der Regelung und Simulation erfolgt je nach Prüfstandsaufbau, Prüfling und Versuchsführung die Berechnung der notwendigen Einwirkungen, um die Zustandsgrößen des Prüfstands in gewünschter Weise zu beeinflussen³¹⁴. Die Berechnungen müssen hochgenau und in Echtzeit ausgeführt werden. Dieses gewährleistet, dass auch dynamische Vorgänge, die auf Simulationen basieren, am Prüfstand genau nachgestellt werden können. Die dafür verwendeten Modelle können von sehr einfachen Fahrzeugmodellen bis zu detaillierten Gesamtfahrzeugmodellen bzw. komplexen Fahrmanövern oder Fahrer- und Umgebungsmodellen variieren³¹⁵.

2.5.3.1 Echtzeitsystem in der Operativ-Ebene

Um die Berechnung genau und rechtzeitig auszuführen, kommen meistens echtzeitfähige Betriebssysteme in der Operativ-Ebene zum Einsatz. Gemäß DIN

³⁰⁹ Schyr 2006

³¹⁰ Schyr 2006

³¹¹ Schyr 2006

³¹² Paulweber / Lebert 2014

³¹³ Schyr 2006

³¹⁴ Schyr 2006

³¹⁵ Paulweber / Lebert 2014

44300 - Begriffe der Informationsverarbeitung (Oktober 1985) ist ein Echtzeitbetrieb wie folgt definiert:

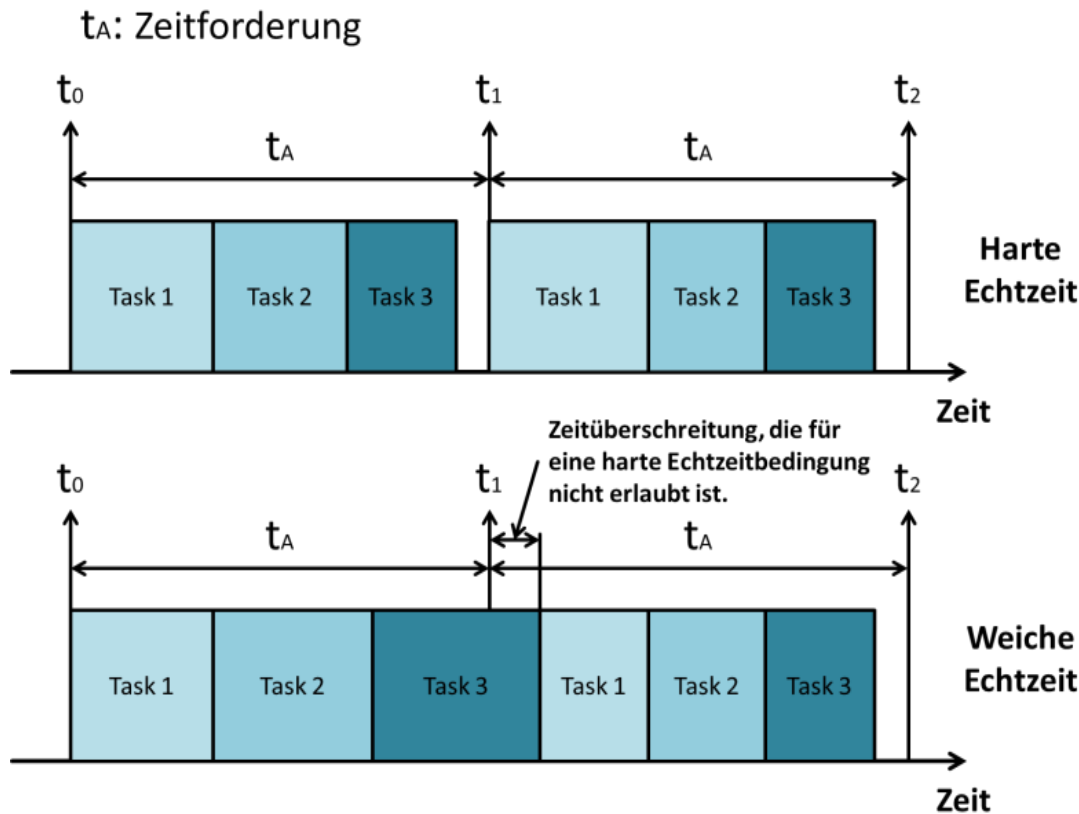
„Ein Betrieb eines Rechensystems, bei dem Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig betriebsbereit sind, derart, dass die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind. Die Daten können je nach Anwendungsfall nach einer zeitlich zufälligen Verteilung oder zu vorherbestimmten Zeitpunkten anfallen.“

Nach dieser Definition muss das Ergebnis für den zu steuernden Prozess immer innerhalb einer bestimmten Abtastzeit vorgelegt werden. Diese Echtzeitumgebung stellt auch die Voraussetzung der in 2.4.5 vorgestellten „Systemintegrationsprüfstand“ und „virtuellen Welle“ dar. Je nach Strenge und Qualität der einzuhaltenden Zeitbedingungen unterscheidet man in harte, feste und weiche Echtzeitbedingungen³¹⁶. WÖRN und BRINKSCHULTE beschreiben die drei Echtzeitbedingungen folgenderweise³¹⁷: Bei harten Echtzeitbedingungen muss die Zeitforderung auf jedem Fall eingehalten werden, anderenfalls ist das Ergebnis unbrauchbar und es kann Hardwareschaden drohen. Bei festen Echtzeitbedingungen droht bei Überschreitung der Zeitanforderungen kein unmittelbarer Schaden. Allerdings ist das Ergebnis der Berechnung nach der Verletzung der Zeitforderung nutzlos. Bei weichen Echtzeitbedingungen ist eine Überschreitung der Zeitforderung tolerierbar. Hier unterscheidet man zwei Formen der Überschreitung: Zum einen kann eine Zeitforderung durchaus oft überschritten werden, wenn diese Überschreitung sich innerhalb eines gewissen Toleranzrahmens bewegt. Zum anderen kann eine Zeitforderung sogar drastisch überschritten werden, wenn dies selten geschieht³¹⁸. Das Bild 2-36 stellt die harten und weichen Echtzeitbedingungen gegenüber. Beispielsweise ist die untere Situation für eine weiche Echtzeitbedingung akzeptierbar, aber für eine harte Echtzeitbedingung nicht erlaubt.

³¹⁶ Wörn 2005

³¹⁷ Wörn / Brinkschulte 2005

³¹⁸ Wörn 2005

Bild 2-36: Harte und weiche Echtzeitbedingungen³¹⁹

In der Operativ-Ebene werden wegen der Mess- und Regelungsqualität sowie der Sicherheitsanforderungen oft harte Echtzeitsysteme genutzt. In der Bedien-Ebene und Leit-Ebene reichen hingegen meistens weiche Echtzeitsysteme aus. Zur Überwachung des Einhaltens der Zeitforderung kommt in der Regel ein in die Regelung- / Simulationsmodelle integriertes Watchdog-Modul zum Einsatz, welches ein Rechtecksignal mit einer bestimmten Frequenz als Spannungssignal generiert. Sobald das Rechtecksignal nicht innerhalb der definierten Zykluszeit erzeugt wird, erfolgen entsprechende Maßnahmen (z.B. Runterfahren / Abschaltung der Belastungsaggregate, Abschaltung Stromversorgung, etc.) zur Gewährleistung der Sicherheit³²⁰.

Da viele Regelungs- bzw. Simulationsmodelle im Nicht-Echtzeitsystem aufgebaut werden, müssen die Modelle zur Implementierung auf den Echtzeitsystemen zuerst in echtzeitfähigen Code übersetzt werden. Dies erfolgt entweder durch händisches Umprogrammieren der Modelle in einer für das relevante Echtzeitsystem geeigneten Sprache oder durch Code-Generierung mittels eines spezifischen Compilers. Das händische Umprogrammieren ist oft aus Zeit- und Qualitätsgründen zu vermeiden.

³¹⁹ DIN 44300 1972³²⁰ Schyr 2006

Ein Compiler dient der Überführung der Programme einer Quellsprache in zugehörige Programme einer Zielsprache³²¹. Viele Softwares wie z.B. MATLAB³²² weisen eigene spezifische Codegeneratoren und Compiler für unterschiedliche Echtzeitsysteme auf. Der Codegenerator erzeugt aus den werkzeugspezifischen Modellen einen echtzeitfähigen und portablen Code. Mit diesem Code erzeugt der Compiler unter Einbindung von betriebssystemspezifischen Bibliotheken und Code das ausführbare Echtzeit-Programm³²³. Das Bild 2-37 zeigt als Ablaufdarstellung wie ein Echtzeit-Programm aus einem MATLAB/Simulink-Modell generiert wird.

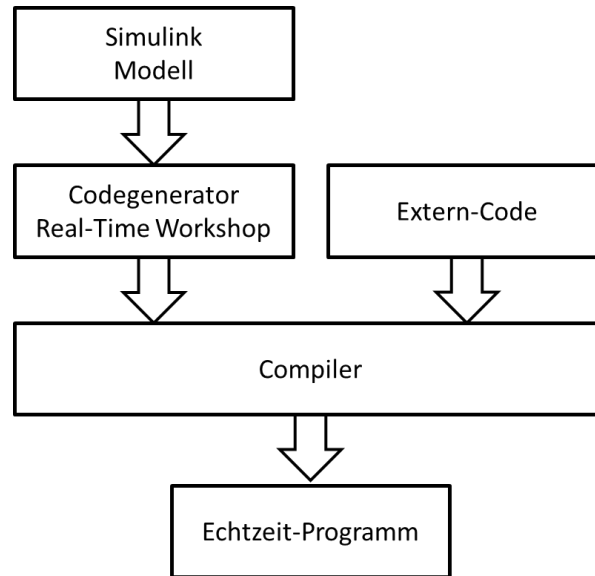


Bild 2-37: Generierung eines Echtzeit-Programms mittels MATLAB³²⁴

2.5.4 Bedien-Ebene

In der Bedien-Ebene findet die Interaktion zwischen dem Bediener und dem Prüfstand statt. Mit spezifischen Benutzerschnittstellen kann der Bediener die Modelle oder Versuchsabläufe definieren. Aus Sicherheitsgründen sind verschiedene Zugangsberechtigungen festgelegt, die den Zugriff zu den Modellen einschränkt. Zum Beispiel haben Modelladministratoren uneingeschränkter Zugriff zum Erstellen, Ändern und Verwalten der Modelle, während die Modellanwender ledig den Zugriff zur Auswahl von vordefinierten und freigegebenen Modellen für die Versuchsdurchführung haben³²⁵.

Während der Versuchsdurchführung und -auswertung sollen die in der Operativ-Ebene erfassten bzw. simulierten Signale und Zustände dem Bediener in geeigneter Form dargestellt werden. Dies erfolgt oft durch Visualisierung der

³²¹ Wagenknecht / Hielscher 2014

³²² MathWorks® www.mathworks.com

³²³ Schyr 2006

³²⁴ Schyr 2006

³²⁵ Schyr 2006

Bewegungszustände des Prüflings oder der simulierten Modelle. Mit Hilfe der Visualisierung kann der Bediener in die Versuchsdurchführung integriert werden. Beispielsweise kommt der Fahrsimulator oft für eine aktive Simulatorfahrt zum Einsatz³²⁶.

Eine andere wesentliche Funktion der Bedien-Ebene ist das Versuchsmanagement, das die Zusammenführung spezifischer Werkzeuge, aller relevanten Daten und Benutzerschnittstellen zur Versuchsvorbereitung, Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung ermöglicht³²⁷. Hier sollen je nach Versuchsanforderung unterschiedliche Schnittstellen für spezielle Mess- und Analysewerkzeuge zur Verfügung gestellt werden.

2.5.5 Leit-Ebene

In dieser Ebene liegt der Fokus auf der Effizienzsteigerung in großen Entwicklungszentren, da darin zum einen Logistikprozesse sowie die regelmäßige Qualitätssicherung der Messeinrichtungen und zum anderen die Auslastungssteuerung der Prüfeinrichtungen betrachtet und optimiert werden. Dies lässt sich durch die Integration der Modelle, Prüfläufe und Versuchsergebnisse der einzelnen Prüfstände in einem Prüffeld und dem übergeordneten PDM-System ermöglichen³²⁸.

2.5.6 Zwischenfazit

In Unterkapitel 2.5 wurde das in moderner Antriebsstrangentwicklung verwendete Prüfstandssystem ausführlich erklärt. Das Prüfstandssystem wurde in fünf Ebenen untergeteilt. Der Fokus lag auf der Operativ-Ebene bzw. auf den Echtzeitsystemen, die für die weitere Arbeit sehr relevant sind.

2.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen und der Stand der Forschung der verteilten Produktentwicklung mit Fokus auf die in der Fahrzeugvalidierung eingesetzten Prüfstandssysteme analysiert. In Bezug auf den Forschungsschwerpunkt dieser Arbeit wurden zunächst die relevanten Grundhypothesen und –begriffe als Basis vorgestellt. Anschließend wurde die verteilte Produktentwicklung mit Fokus auf zurzeit verfügbare Unterstützungskonzepte und Vorgehensweisen ausführlich untersucht. Daraus wurde eine Forschungslücke erkannt, dass mehr Unterstützung in der Validierung bei VPE erforderlich ist. Durch Analyse der Zusammenarbeit in der Fahrzeugentwicklung wurden die Tendenzen in der zukünftigen Fahrzeugentwicklung identifiziert. Eine wesentliche Änderung stellt die immer mehr

³²⁶ Albers et al. 2009

³²⁷ Schyr 2006

³²⁸ Schyr 2006

geforderte kooperative Entwicklung dar. Demzufolge ist zu erwarten, dass die verteilte Entwicklung eine wichtige Rolle in der zukünftigen Fahrzeugentwicklung spielen wird. Da die Validierung die zentrale Aktivität der Produktentwicklung darstellt, wurde anschließend die Validierung in der Fahrzeugentwicklung anhand des IPEK-XiL-Ansatzes vorgestellt. Durch Recherche und Analyse der Validierung in der Fahrzeugentwicklung kann festgestellt werden, dass für die Validierung in der verteilten Fahrzeugentwicklung zurzeit nur begrenzte Methoden und Werkzeuge zur Verfügung stehen. Um die Validierungsaktivitäten in der Fahrzeugentwicklung konkret unterstützen zu können, wurde im letzten Teil dieses Kapitels das Prüfstandssystem in der Fahrzeugentwicklung detailliert beschrieben. Die in dieser Arbeit zum Einsatz kommenden Prüfstände werden auch anhand der in diesem Kapitel erklärten fünf Ebenen vorgestellt.

3 Motivation und Zielsetzung

3.1 Motivation

Wie in Kapitel 2.3.5 veranschaulicht, sind einige Entwicklungstendenzen in der Automobilindustrie zu erwarten, die gleichzeitig auch neue Herausforderungen bringen. Zunächst ist durch die steigende Globalisierung ein Trend zu einer immer stärkeren räumlichen und zeitlichen Verteilung der Zusammenarbeit zu erkennen³²⁹. Global verteilte Entwicklungsnetzwerke statt zentraler Entwicklungszentren sind bereits Realität und werden weiter zunehmen. Sowohl unternehmensinterne, als auch unternehmensübergreifende Kooperationen, Joint Ventures und Beteiligungen führen zu immer komplexeren Prozessen. Damit steigen auch die Anforderungen an die Kooperationsfähigkeit der Beteiligten und deren Flexibilität bezüglich sich verändernder Geschäftsbedingungen³³⁰.

Der zunehmend höhere Anteil von Software und Elektrik/Elektronik (z.B. zunehmend komplexere Assistenzsysteme) im Fahrzeug erfordert eine Integration der Entwicklungsmethoden und eine bessere Synchronisation der Entwicklungsdisziplinen³³¹. Im Vergleich zu der Entwicklung konventioneller Fahrzeuge fehlen der Entwicklung von Elektrofahrzeug entsprechende Erfahrungen und angemessene Referenzprozesse. Auf Grund der wesentlichen Unterschiede zwischen Elektrofahrzeugen und konventionellen Fahrzeugen lässt sich feststellen, dass eine Operationalisierung der vorhandenen Methoden und Werkzeuge für die Entwicklung und Validierung der Elektrofahrzeuge nicht ausreichend ist.

Darüber hinaus ist es erforderlich, dass die Hersteller die Entwicklungszeiten neuer Modelle verkürzen, um schneller neue Modelle auf den Markt bringen zu können. Ein verkürztes Time to Market, die steigende Variantenvielfalt und die Forderung nach innovativen Produkten setzen die Hersteller und Zulieferer unter Druck, ihre Prozesse und Kooperation zu optimieren und Entwicklungszeiten zu verkürzen³³².

Zur Unterstützung der verteilten Produktentwicklung sind heutzutage unterschiedliche Methoden und Werkzeuge vorhanden. Dies sind z.B. die Co-Simulation, die Wissensmanagementsysteme/Produktdatenmanagementsysteme, das Collaborative Engineering, das Concurrent Engineering, etc. Die meisten davon sind allerdings zur Projektierung, Profilsynthese, Ideenfindung und Modellierung von Prinzip und Gestalt. Jedoch sind für die zentrale Aktivität der Produktentwicklung –

³²⁹ Kern 2005

³³⁰ Schmidt / Fickler 2013

³³¹ Schmidt / Fickler 2013

³³² Albers 1994

Validierung nur wenige spezifische Methoden und Werkzeuge vorhanden. Des Weiteren fehlt noch die Unterstützung zur konkreten Anwendung solcher spezifischen Methoden und Werkzeuge.

Um den oben genannten Herausforderungen gerecht werden zu können und die Zusammenarbeit zwischen weltweit verteilten Partner effizienter und effektiver zu gestalten, müssen vorhandene Entwicklungsmethoden insbesondere Validierungsmethoden entsprechend modifiziert werden. Jedoch darf eine Erhöhung der Effektivität und Effizienz nicht zu unflexiblen Prozessabläufen führen. Die Flexibilität des Prozesses muss so gestaltet werden, dass auf Veränderungen der Prozessumgebung schnell reagiert werden kann, ohne dass das Prozessergebnis verschlechtert wird.

Nach Heftrich kann die Effektivität, Effizienz und Flexibilität der Prozesse dabei folgendermaßen gesteigert werden³³³:

„Effektivität:

- *Eliminierung bzw. Minimierung von nicht zur Wertschöpfung beitragenden Aktivitäten innerhalb des Gesamtprozesses.*
- *Optimierung der Schnittstellen zwischen den einzelnen Prozessen. Dabei müssen sowohl unternehmensinterne als auch -externe in die Optimierung mit einbezogen werden.*
- *Innerhalb der Prozesskette ist eine Fehlerabsicherung durchzuführen.*
- *Prozesse sind ohne Gefährdung der Zielerreichung zu vereinfachen.*

Effizienz:

- *Reduzierung der Durchlaufzeiten durch die Eliminierung von unnötiger Bürokratie, die Vermeidung von Doppelarbeit der Automatisierung von Prozessen und die Standardisierung von Abläufen.*

Flexibilität:

- *Planung von Ablaufalternativen: Im Rahmen der Planung sollten die wichtigsten Alternativabläufe schon zu Beginn mitgeplant und Lösungswege nachvollziehbar dokumentiert werden.*
- *Zusammenarbeit mit kleinen Unternehmen: Durch die Integration von Zulieferern kleiner Unternehmensgröße in den Entwicklungsprozess werden Flexibilitätspotentiale erschlossen. Auf diese Weise können die Vorteile eines großen Unternehmens wie Kapital, economies of scale usw. mit den Vorteilen eines kleinen Unternehmens wie z.B. Flexibilität und Anpassungsfähigkeit verbunden werden.“*

³³³ Heftrich 2001

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Erhöhung der Effizienz und Effektivität von Fahrzeugentwicklung durch die Optimierung der Kooperation und Integration aller beteiligten Partner möglich ist. Insbesondere bei der Fahrzeugentwicklung müssen die marktspezifischen Einflussfaktoren möglichst frühzeitig und vollständig berücksichtigt werden. Daher ist ein systematisches Vorgehen zur effizienten und effektiven Kombination von virtueller Simulation und physischem Versuch zwingend erforderlich. Der IPEK-XiL-Ansatz stellt ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung dar. Üblicherweise sind die Bestandteile des IPEK-XiL-Frameworks an einem Standort, um eine einfache Kopplung und effiziente Validierung zu ermöglichen. Daher ist eine Untersuchung der Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der Validierung in der verteilten Produktentwicklung notwendig.

Daraus leitet sich die Forschungshypothese ab:

Der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz kann in der verteilten Fahrzeugentwicklung implementiert werden, sodass eine effiziente und effektive Validierung unter Berücksichtigung von verteilten physischen Teilsystemen möglich ist.

3.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit liegt daher in der Untersuchung und Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung am Beispiel der Antriebsstrangentwicklung. Zur Zielerreichung sollten drei wesentliche Forschungsfragen in folgender Arbeit beantwortet werden.

Forschungsfrage 1: Welche Möglichkeiten zur Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung gibt es und wie lassen sich diese Implementierungsmöglichkeiten konkret beschreiben und umsetzen?

Forschungsfrage 2: Sind diese Implementierungsmöglichkeiten mit unterschiedlichen Hardware-Peripherien umsetzbar und welche Einflussfaktoren ergeben sich bei konkreten Anwendungen?

Forschungsfrage 3: Wie können die Implementierungsmöglichkeiten im Fahrzeugentwicklungsprozess effizient und effektiv ausgeführt werden und welche Anwendungsgrenzen gibt es?

Im Einzelnen ergeben sich folgende Zielsetzungen für die Arbeit:

- Identifizierung der Randbedingungen durch Analyse der bestehenden Validierungsmethoden in der Fahrzeugentwicklung und der verteilten Produktentwicklung
- Vergleich verschiedener Möglichkeiten zur Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung

- Implementierung und Untersuchung des IPEK-XiL-Ansatzes mittels mehrerer Prüfstandssysteme an verschiedenen Standorten
- Identifizierung und Analyse der Einflussfaktoren bei der Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung
- Entwicklung konkreter Konzepte zur Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung
- Exemplarische Anwendungen des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung am Beispiel verschiedener Aufgabenstellungen
- Differenzierung unterschiedlicher Auslegungskonzepte in Bezug auf ihrer eigenen Vorteile und Einschränkungen und Erstellung eines Handlungsleitfadens für die Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Antriebsstrangentwicklung

4 Forschungsdesign

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Erreichung der in Kapitel 3 definierten Zielsetzung erläutert. Ein Entwicklungsprozess wird am IPEK anhand des erweiterten ZHO-Modells (vgl. Kapitel 2.1.3) so verstanden, dass das Zielsystem durch das Handlungssystem in das Objektsystem überführt wird. Daher lässt sich die folgende Arbeit auch anhand des erweiterten ZHO-Modells gliedern. Auf Basis der in Kapitel 2 vorgestellten Wissensbasis wurde das Ziel dieser Arbeit in Kapitel 3 abgeleitet. Um dieses Ziel sinnvoll zu erreichen, sollte nach dem erweiterten ZHO-Modell zunächst der Lösungsraum festgelegt werden. Daher werden zuerst verschiedene Implementierungsmöglichkeiten des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung analysiert, damit der Lösungsraum festgestellt werden kann. Durch die Analyse des heutigen Stands der Validierung in der Fahrzeugentwicklung lässt sich das Objektsystem, bzw. eine Möglichkeit zur Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung und entsprechende Auslegungsmöglichkeiten, ableiten (Kapitel 5). Somit lässt sich die Forschungsfrage 1 beantworten. Durch eine Vorstudie der ausgearbeiteten Implementierungsmöglichkeit werden die Anwendungsgrenzen und Einflussfaktoren identifiziert, die als neues Wissen in die Wissensbasis zurückfließen kann (Kapitel 6). Somit lässt sich eine weitere Schleife anfangen (Bild 4-1).

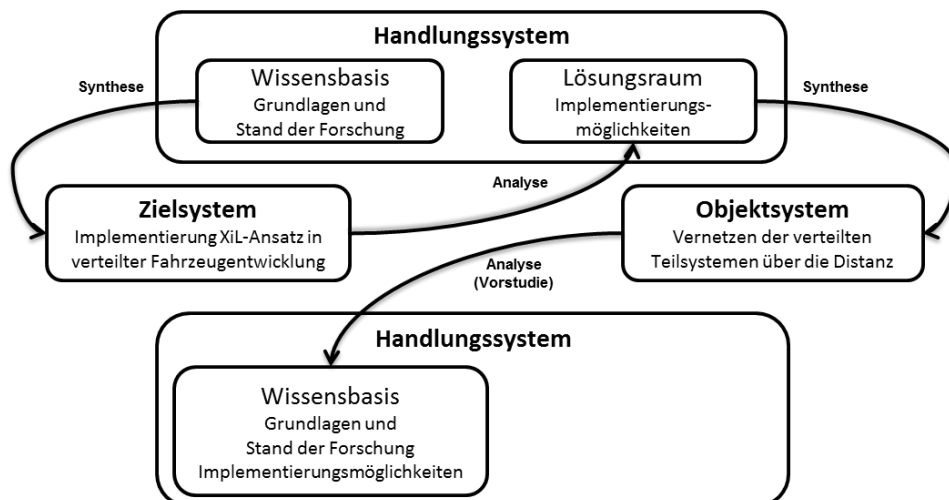


Bild 4-1 Erste Schleife dieser Arbeit anhand des erweiterten ZHO-Modells

Demzufolge kann ein verfeinertes Zielsystem daraus abgeleitet werden, konkrete Konzepte für die Implementierung anhand verschiedener Prüfstandssysteme zu entwickeln. Dafür stellen die verschiedenen Prüfstandssysteme und entsprechende Kompetenzen einen neuen Lösungsraum dar. Durch Synthese können konkrete Konzepte ausgearbeitet werden, die dann in verschiedenen Anwendungsbeispielen

eingesetzt und validiert werden müssen (Kapitel 6). Durch die Analyse des Einsatzes der Implementierungskonzepte in Forschungsprojekten bzw. konkreten Umsetzungen lässt sich wieder neues Wissen generieren (Kapitel 7). Um die Implementierungskonzepte effizient und effektiv in den Antriebsstrangentwicklungsprozess zu integrieren, wird ein Handlungsleitfaden zur Unterstützung der Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung anhand der Validierungsziele und Randbedingungen erstellt (Kapitel 8). Mit Kapitel 6 und Kapitel 7 kann die Forschungsfrage 2 entsprechend beantwortet werden. Die Forschungsfrage 3 lässt sich dann mit Kapitel 8 beantworten. Durch das in diesen 3 Kapiteln generierte Wissen kann die Wissensbasis nochmal erweitert werden (Bild 4-2).

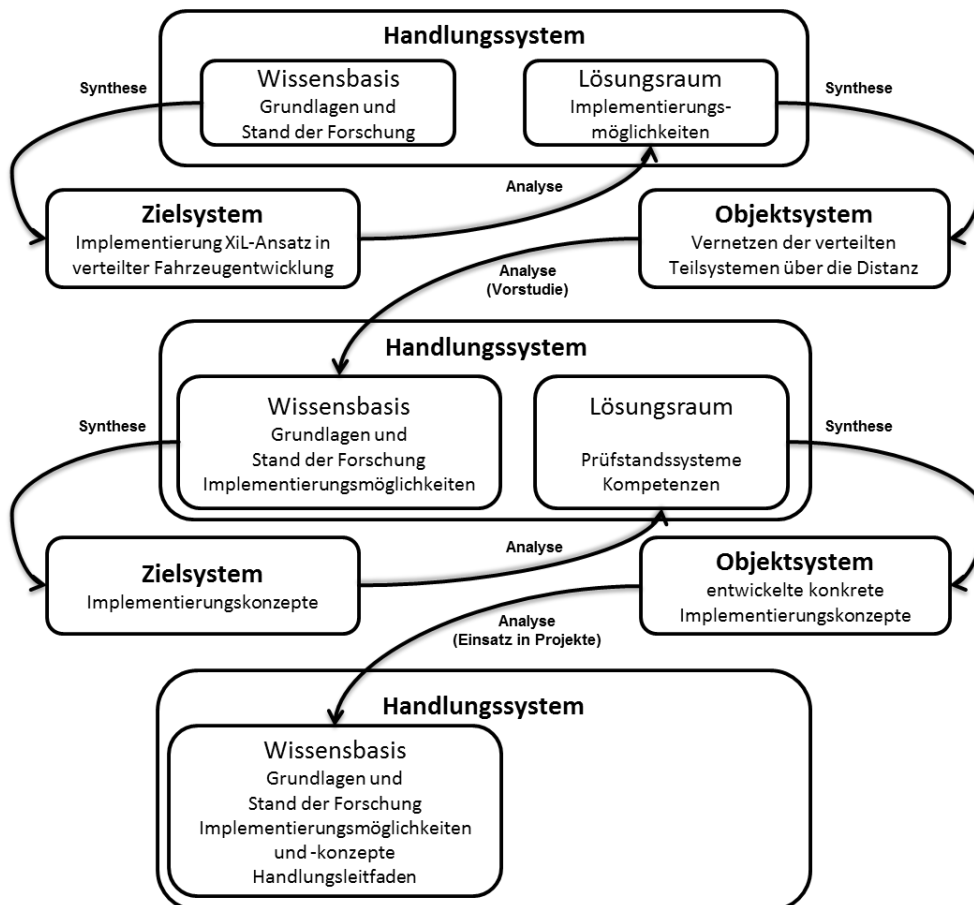


Bild 4-2 Zweite Schleife dieser Arbeit anhand des erweiterten ZHO-Modells

Zum Schluss dieser Arbeit folgen eine Zusammenfassung und ein Ausblick. Basierend auf der erweiterten Wissensbasis lassen sich in Zukunft weitere Zielsetzungen ableiten, die in weiteren Schleifen in ein erweitertes Objektsystem überführt werden sollen.

Zusammenfassend stellt das untere Bild das komplette Forschungsdesign dieser Arbeit dar (Bild 4-3).

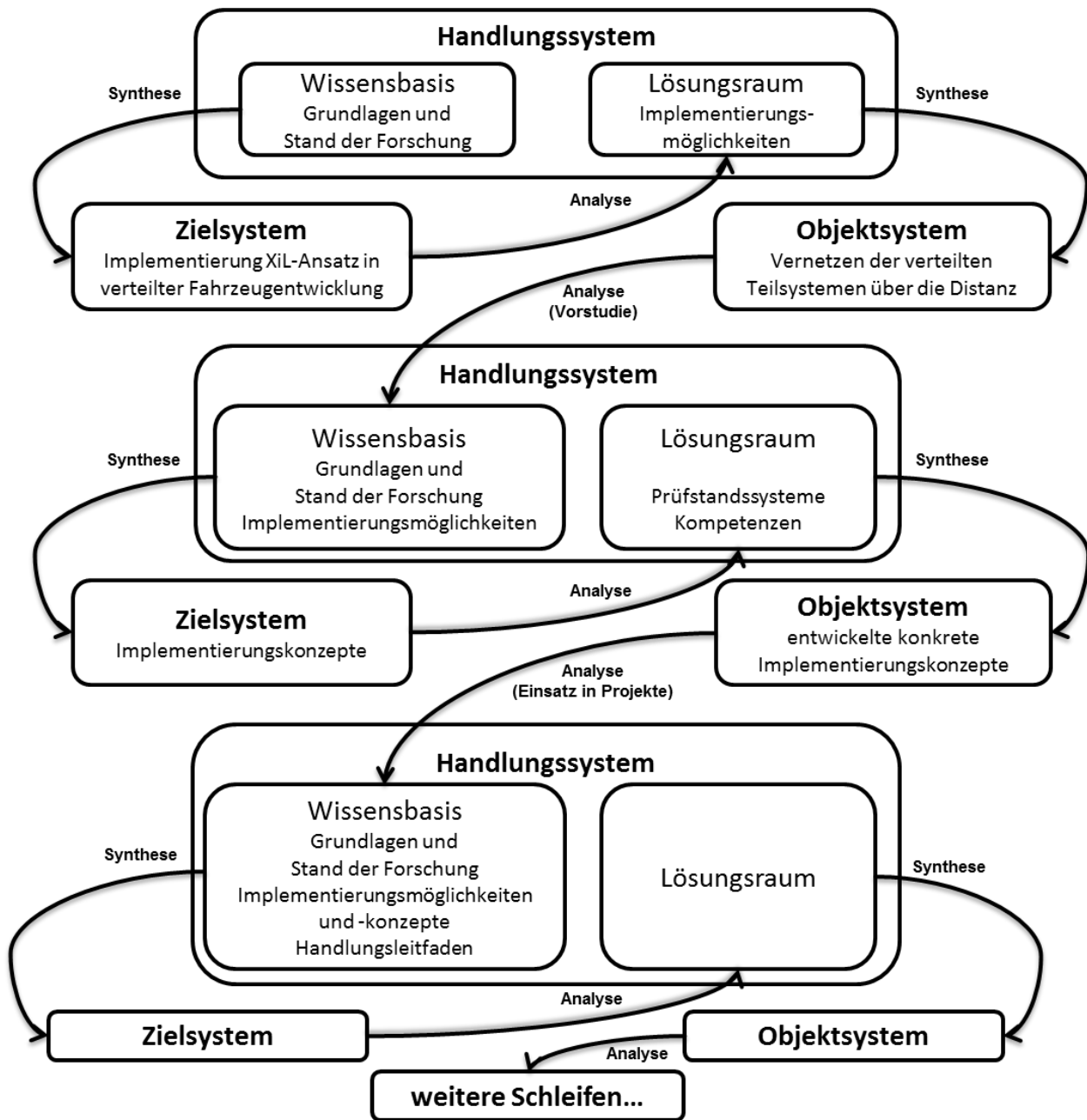


Bild 4-3 Weitere Schleife in zukünftiger Arbeit anhand des erweiterten ZHO-Modells

5 Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung

Im folgenden Kapitel erfolgen die Festlegung des Lösungsraums und die Erstellung des ersten Objektsystems. Zunächst sollen verschiedene Implementierungsmöglichkeiten des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung analysiert werden. Demzufolge wird der Fokus auf das Vernetzen der verteilten Teilsysteme gelegt. Anschließend werden unterschiedliche Auslegungsmöglichkeiten der Vernetzung über die Distanz analysiert. Zum Schluss dieses Kapitels wird eine neue Dimension beim IPEK-XiL-Ansatz für die Validierung in der verteilten Fahrzeugentwicklung hinzugefügt.

5.1 Implementierungsmöglichkeiten vom IPEK-XiL-Ansatz in der verteilten Fahrzeugentwicklung

In diesem Unterkapitel wird diskutiert, wie der IPEK-XiL-Ansatz in der verteilten Fahrzeugentwicklung implementiert werden kann. Wie in Kapitel 2.1.5 beschrieben werden alle Bestandteile des IPEK-XiL-Frameworks eng miteinander gekoppelt, damit die Wechselwirkungen dazwischen möglichst wie im Fahrzeug dargestellt werden können. In der verteilten Fahrzeugentwicklung werden viele Systeme jedoch verteilt entwickelt, welches neue Herausforderungen zur Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes verursacht. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, können drei wesentliche Konzepte verfolgt werden:

1. Die verteilt entwickelten Systeme sollten an einem Standort zusammengeführt und miteinander gekoppelt validiert werden.
2. Ein unternehmensübergreifendes Entwicklungsteam / -zentrum sollte erstellt werden, um das Gesamtsystem gemeinsam an einem Standort zu entwickeln und zu validieren.
3. Die verteilt entwickelten Systeme lassen sich über die Distanz vernetzen, damit die Systeme unter Wechselwirkung mit anderen Bestandteilen des IPEK-XiL-Frameworks validiert werden können^{334,335,336}.

Im Folgenden werden diese 3 Konzepte bezüglich ihrer Potenziale und Einsatzgrenzen diskutiert.

³³⁴ Albers et al. 2013c

³³⁵ Albers et al. 2014a

³³⁶ Albers et al. 2014b

5.1.1 Zusammenführung der verteilt entwickelten Systeme an einem Standort

Dies ist eigentlich der häufigste Fall bei der Fahrzeugentwicklung. Oft werden die Teilsysteme von Zulieferern nach den Anforderungen (z.B. Lastenheften) des Herstellers entwickelt und getestet. Die Anforderungen vom Hersteller können in bestimmter Weise als eine Abstraktion der Einflüsse von den anderen Bestandteilen des IPEK-XiL-Frameworks verstanden werden. Ein Beispiel hierfür stellt die Anforderung an das maximal übertragbare Drehmoment von einem Wandler dar, welches anhand Ausgangsdrehmoments vom Antriebsmotor festgelegt wird. Weiterhin können auch virtuelle und physische Modelle zwischen Unternehmen ausgetauscht werden, um bestimmte Validierungsziele zu erreichen. Vor der Massenproduktion müssen alle Prototypen ins Gesamtfahrzeug eingebaut und vollständig validiert werden.

Durch den Austausch von virtuellen oder physischen Modellen bzw. Prototypen können alle Bestandteile des IPEK-XiL-Frameworks an einem Standort realisiert werden. Allerdings sind die neu entwickelten Modelle und Prototypen meistens vertraulich und beinhalten die Kernkompetenz des Unternehmens. Nur mit vollständiger Geheimhaltungsvereinbarung kann der Austausch solcher vertraulichen Modelle und Prototypen sicher ausgeführt werden. Während die virtuellen Modelle sich relativ einfach online austauschen lassen, müssen die physischen Prototypen hingegen transportiert werden. Außer den Kosten und der Zeit für den Transport sind gegebenenfalls noch unternehmens- und gesellschaftspolitischen Einschränkungen zu begegnen. Darüber hinaus ist eine Veränderung oder Optimierung der ausgetauschten Modelle oder Prototypen während der Validierung kaum möglich, da die dafür benötigte spezifische Kompetenz und die Entwicklungsressourcen bei anderen Unternehmen meistens nicht ausreichend vorhanden sind.

5.1.2 Erstellung eines unternehmensübergreifenden Entwicklungsteams

Um bestimmte Entwicklungsaufgaben zu erledigen, wird in einigen Fällen ein unternehmensübergreifendes Entwicklungsteam erstellt. Beispielsweise werden Ingenieure von Entwicklungsdienstleister ins Entwicklungsteam beim OEM integriert, um die Kompetenz des Entwicklungsteams zu ergänzen. In ähnlicher Weise aber größerem Umfang können gemeinsam Entwicklungszentren von mehreren Unternehmen zusammen eingerichtet werden, um eine langfristige Zusammenarbeit an bestimmten Themen zu unterstützen. Auf Grund der erweiterten Kompetenz des Entwicklungsteams können die Validierung sowie die rechtzeitige Änderung und Optimierung der Modelle oder Prototypen flexibel ausgeführt werden. Da die Modelle und Prototypen in diesem Fall meistens vor Ort entwickelt werden, können die Probleme in Bezug auf Transport vermieden werden.

Solche unternehmensübergreifenden Entwicklungsteams sind für bestimmte Themen und Zeitdauer erstellt. Beim Anlauf eines neuen Entwicklungsteams müssen die Kulturdifferenzen (z.B. Arbeitsweise, etc.) zwischen unterschiedlichen Unternehmen überwunden werden, sodass die Zusammenarbeit im Team effizient ausgeführt werden kann. Wenn der Fokus der Entwicklung sich ändert, muss das Entwicklungsteam eventuell auch neu organisiert werden. Demzufolge wiederholt sich die Anlaufphase wegen neu ins Team integrierter Mitarbeiter. Deswegen ist die Erstellung eines unternehmensübergreifenden Entwicklungsteams eher für die Unternehmen geeignet, die schon Erfahrungen in der Zusammenarbeit miteinander haben. Erst für eine langzeitige Zusammenarbeit in großem Umfang lohnt es sich dann ein gemeinsames Entwicklungszentrum einzurichten.

5.1.3 Vernetzte Validierung über die Distanz

Zusammen mit der Entwicklung der IT-Technik kommen viele netzwerkbasierte Entwicklungsmethoden und -werkzeuge in der Fahrzeugentwicklung zum Einsatz. Die in Kapitel 2.4.5 beschriebene Co-Simulation ermöglicht, die verteilten virtuellen Modelle online zu koppeln und gemeinsam die virtuelle Validierung durchzuführen. Jedoch wird die online-Kopplung der verteilten physischen Modelle bisher nur selten durchgeführt. Zur Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes werden meistens auch physische Modelle / Prototypen benötigt, da viele Effekte nur sehr schwierig virtuell zu simulieren sind. Daher muss die online-Kopplung auch mit physischen Modellen bzw. Prüfständen realisiert werden.

Da diese Art der vernetzten Validierung auf Signalen basiert, ist kein Austausch von Modellen oder Prototypen erforderlich³³⁷. Die Transport- und Geheimhaltungsprobleme können somit vermieden werden. Weiterhin lassen sich die Funktionen eines Prüfstands mit anderen Prüfständen komplementieren, damit der Prüfstand in mehreren Anwendungsfällen zum Einsatz kommen kann. Um die Vernetzung zu realisieren, muss vor allem die Verbindung mit den verteilten Bestandteilen des IPEK-XiL-Frameworks hergestellt werden. Je nach Validierungszielen und Randbedingungen können verschiedene Kopplungsarten, die unterschiedliche Implementierungsaufwände erfordern, zum Einsatz kommen. Sobald die Verbindung einmal hergestellt wird, kann sie später auch für andere Modelle und Prototypen weiterverwendet werden. Wie bei allen anderen Online-Diensten spielt die Verbindungsqualität bei der vernetzten Validierung eine entscheidende Rolle. Für manche Anwendungsfälle sind die Latenzzeit (das Zeitintervall vom Senden einer Nachricht bis zum Eingang beim Empfänger) und eventuelle Unterbrechung der Verbindung nicht tolerierbar, weil die Messergebnisse

³³⁷ Albers et al. 2013c

dadurch stark beeinträchtigt und eventuell kritische Situationen verursacht werden können.

5.1.4 Zwischenfazit

In diesem Unterkapitel wurde diskutiert, wie der IPEK-XiL-Ansatz in der verteilten Fahrzeugentwicklung implementiert werden kann. Durch den Vergleich der oben genannten drei Implementierungsmöglichkeiten wird deutlich, dass die vernetzte Validierung in vielen Fällen bei der verteilten Produktentwicklung vorteilhaft einzusetzen ist. Daher liegt der Fokus der folgenden Arbeit auf der vernetzten Validierung.

5.2 Auslegungsmöglichkeiten der vernetzten Validierung über die Distanz

In diesem Unterkapitel werden verschiedene Auslegungsmöglichkeiten der vernetzten Validierung mit dem Fokus auf den Signalaustausch diskutiert.

Austausch Messdaten nach der Untersuchung

Die Ergebnisse von einer Seite werden an den anderen Partner weitergegeben und für deren Untersuchungen verwendet. Dieses Auslegungskonzept wird oft in der Fahrzeugentwicklung eingesetzt. Zum Beispiel können die gemessenen Motorausgangsgrößen für eine Kupplungsuntersuchung als Eingangsgrößen verwendet werden. Da die Validierungen von allen beteiligten Partnern asynchron ausgeführt werden, ist in diesem Fall keine hohe Anforderung an Verbindungsqualität bzw. kein hoher Aufwand zur Auslegung notwendig. Allerdings können die Interaktionen zwischen den verteilten Systemen nicht mehr betrachtet werden, die aber sehr wichtig sein können.

Satellit

Die Datenübertragung über Satellit zeichnet sich durch ihre große Bandbreite und breite Verfügbarkeit aus. Außerdem erfordert die Satellitenverbindung weder Daten- oder Telefonleitung noch einen festen Standort. Der wesentliche Nachteil der Satellitenverbindung besteht in der hohen Latenzzeit, die durch die große Distanz zwischen Erdstation und Satelliten verursacht wird. Die Signallaufzeit beträgt mindestens 239 ms. Bei konkreten Anwendungen steigt diese Latenzzeit wegen anderen Verzögerungsfaktoren auf 500-700 ms, die für bestimmte Validierungsaufgaben im Bereich der Fahrzeugentwicklung nicht mehr tragbar ist.

Mobilfunk

Die Datenübertragung über Mobilfunk hat sich in den letzten 15 Jahren sehr schnell entwickelt. Heutzutage stehen 4G- und LTE-Technologie bereits zur Verfügung, mit der eine Datenübertragung mit hoher Übertragungsgeschwindigkeit unter 60 ms (bei

LTE sogar 20 ms) Latenzzeit hergestellt werden kann. Ein großer Vorteil von Mobilfunk stellt die mobile Datenerfassung dar, welche die Kommunikation mit beweglichen Geräten (z.B. Fahrzeug) ermöglicht. Mithilfe der LTE-Advanced Technologie kann in Zukunft theoretisch eine Funkdatenverbindung mit bis 1 Gbit/s Geschwindigkeit und 5 ms Latenzzeit erreicht werden³³⁸. Allerdings kann die Latenzzeit je nach Mobilfunknetz, Übertragungsverfahren, Endgerät und Standort variieren. Außerdem sinkt die Übertragungsgeschwindigkeit in der Praxis mit der Entfernung zur Basisstation und der Anzahl der Teilnehmer. Auch die Bandbreite hängt von der Reichweite ab. Wenn viel Bandbreite erreichen werden soll, muss dementsprechend die Reichweite reduziert werden.

Beispielsweise wurde die Mobilfunkverbindung für das teleoperierte Fahren an der Technischen Universität München verwendet. Während der Versuche wurde eine 3G-Mobilfunkverbindung mit durchschnittlich 121 ms Latenzzeit hergestellt, um ein fahrerloses Fahren zu ermöglichen. Hierbei wurde die Umgebung des Fahrzeugs mittels Kameras erfasst und an einen entfernt sitzenden Fahrer übermittelt, um das Fahrzeug fernzusteuern³³⁹.

DSL (Digital Subscriber Line)

Die Datenverbindung über DSL erfolgt meistens durch Kabelleitungen (z.B. Kupferleitungen, Glasfaser, etc.). Heutzutage ist die DSL-Verbindung wegen ihrer hohen Übertragungsraten und einfacher Leitung sowohl in Deutschland als auch weltweit sehr verbreitet. Während in Deutschland 21,4 Millionen (Stand Mitte 2012)³⁴⁰ Haushalte einen DSL-Anschluss hatten, existieren weltweit mehr als 264 Millionen DSL-Anschlüsse (Stand 2011)³⁴¹. In der Industrie wird DSL auch auf eigenen Kabeln benutzt, um eine schnelle und stabile Verbindung zu realisieren. Wegen der Verbreitung, Stabilität und weltweiten Standardisierung werden die Datenübertragungen in der folgenden Arbeit meistens mit DSL-Verbindung hergestellt.

5.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine vernetzte Validierung über die Distanz technisch möglich ist. Daher kann eine neue Dimension (Distanz) beim IPEK-XiL-Ansatz hinzugefügt werden, sodass die verteilten Bestandteile des IPEK-XiL-Frameworks über die Distanz vernetzt validiert werden können (Bild 5-1). Im Prinzip kann jeder Bestandteil des IPEK-XiL-Frameworks verteilt und über die Distanz mit den anderen Bestandteilen vernetzt werden. Je nach Validierungszielen

³³⁸ Sauter 2013

³³⁹ Chucholowski et al. 2014

³⁴⁰ Quelle: DSL WEB <https://www.dslweb.de/breitband-report-deutschland-q2-2012.php>

³⁴¹ Quelle: <https://www.internetanbieter.info/news/7695-dsl-verbreitung-weltweit-2011/>

und Randbedingungen sollte jedoch ein optimales Verteilungs- und Vernetzungskonzept implementiert werden. Im Folgenden wird die Machbarkeit der vernetzten Validierung über die Distanz untersucht. Dadurch soll festgestellt werden, für welche Anwendungsfälle der Einsatz einer vernetzten Validierung über die Distanz sinnvoll ist und welche Einflussfaktoren entstehen.

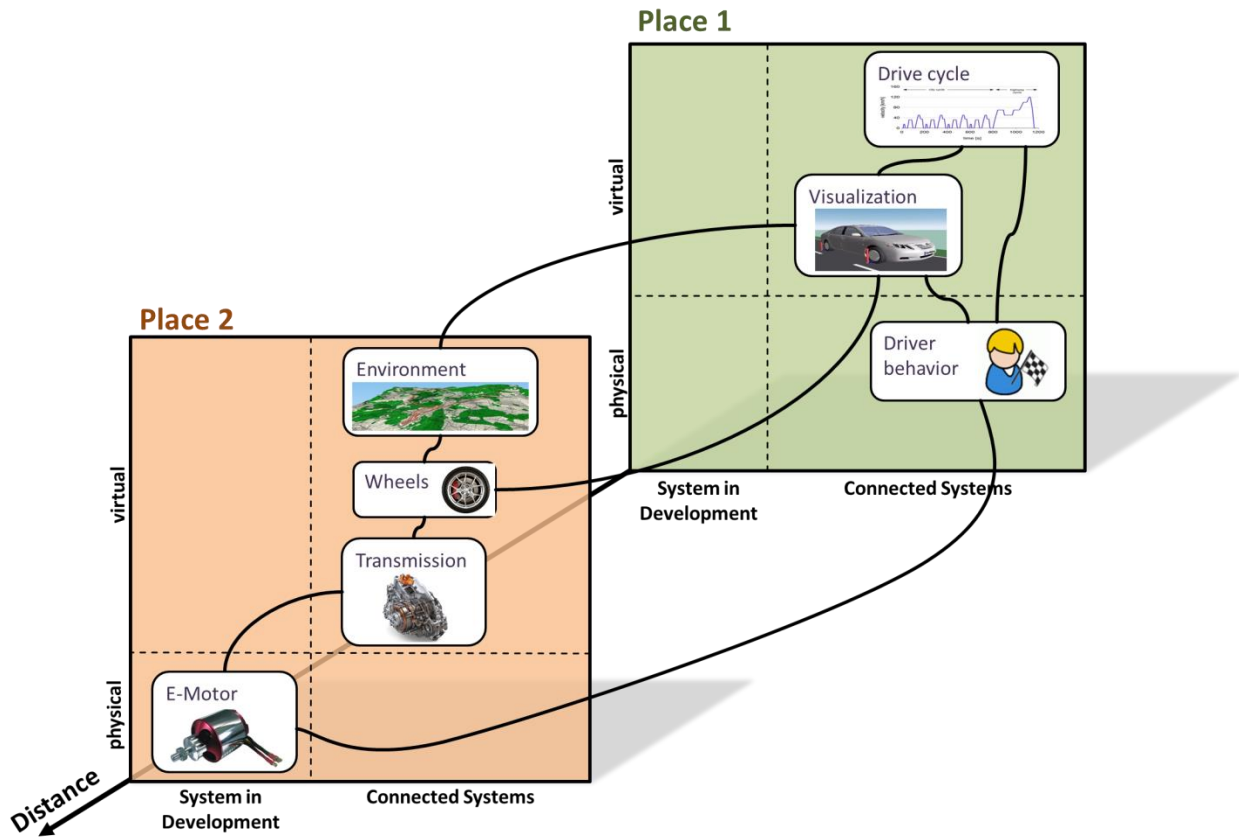


Bild 5-1 IPEK-XiL-Ansatz mit einer neuen Dimension

6 Vorstudie des IPEK-XiL-Ansatzes mit verteilten Teilsystemen

In diesem Kapitel werden zuerst die zur Verfügung stehende Hardware vorgestellt. Mithilfe dieser Hardware soll eine Vorstudie zur Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes mit verteilten Teilsystemen ausgeführt werden. Nach dieser Vorstudie lässt sich die Anwendbarkeit des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung beweisen. Auf Basis der ausgeführten Untersuchungen werden demzufolge drei Implementierungskonzepte entwickelt. Anschließend werden die Latenzzeiten anhand von drei Implementierungskonzepten untersucht, um die Auswahl dieser drei Konzepte bei weiteren Anwendungen zu unterstützen. In den weiteren Kapiteln sollen diese Implementierungskonzepte in konkreten Anwendungen eingesetzt werden, um die Stärken und Beschränkungen zu identifizieren.

6.1 Verwendete Prüfstände

Zur Ausführung der Vorstudie und der weiteren Erforschung der Implementierungskonzepte kommen mehrere Prüfstände an verschiedenen Standorten zum Einsatz. Diese Prüfstände weisen unterschiedliche Hard- und Softwares auf, sodass die Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes unter verschiedenen Randbedingungen untersucht werden kann. In diesem Unterkapitel werden die eingesetzten Prüfstände, insbesondere ihre für die Vernetzung relevante Hard- und Software vorgestellt.

6.1.1 Mini Hardware-in-the-Loop Prüfstand

Bevor die neuen Prüfstandskonfigurationen auf den Prüfständen mit hoher Leistung implementiert werden, können sie zuerst auf Prüfständen mit relativ niedrigerer Leistung untersucht werden. Daher besteht der Wunsch nach einer Entwicklungs- und Testumgebung für neue Prüfstandskonfigurationen, ohne den Betrieb an den im Einsatz befindlichen Prüfständen zu beeinträchtigen. Zu diesem Ziel wurde ein Mini Hardware-in-the-Loop Prüfstand³⁴² (Abkürzung: Mini-HiL) als Entwicklungsumgebung für neue Prüfstandskonfigurationen entwickelt (Bild 6-1). Deswegen ist der Mini-HiL ein in besonderem Maße geeigneter Prüfstand für diese Vorstudie.

³⁴² Sommer 2016

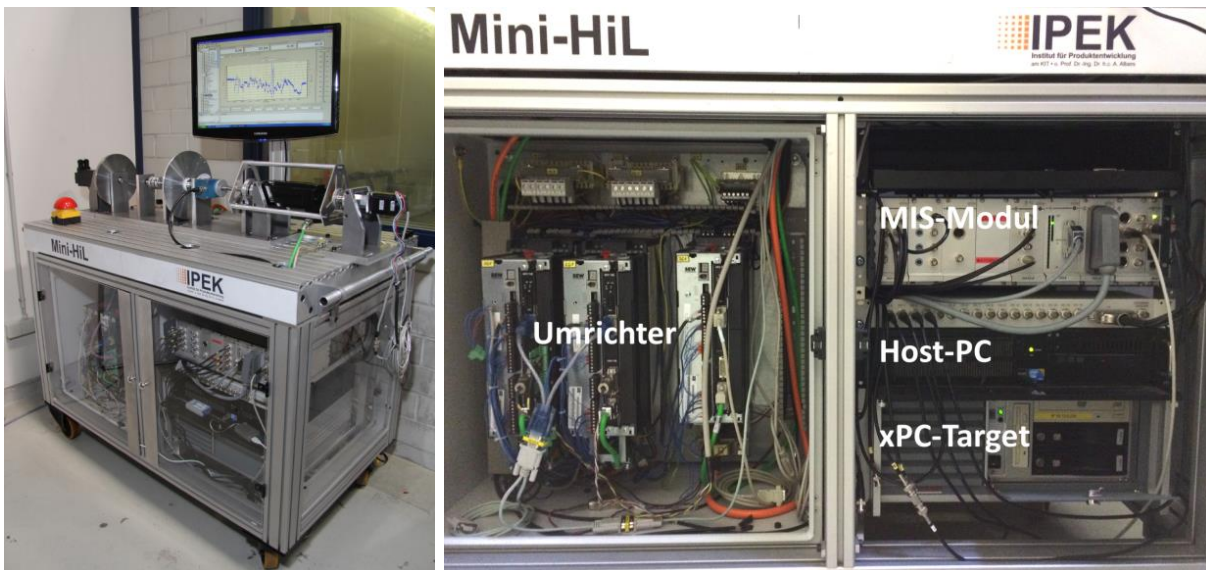


Bild 6-1 IPEK Mini-HiL Prüfstand

Prozess-Ebene

Die Prozess-Ebene am Mini-HiL besteht aus Belastungsaggregaten bzw. ihren Steuerungseinheiten und diversen Messtechniken. Die Belastungsaggregate des Mini-HiLs werden durch zwei permanenterregte Synchronmotoren und ein Schrittmotor mit Kugelumlaufspindel dargestellt. Während die zwei permanenterregten Synchronmotoren die rotierende Bewegung ermöglichen, dient der Schrittmotor als Linear-Aktuator für die axiale Bewegung, damit verschiedene Verhalten z.B. die Ein- und Entkopplung der Kupplungsscheiben dargestellt werden können. Da ein Drehstrommotor genau mit der auf seine Polpaarzahl bezogenen Netzfrequenz dreht, erfolgt die Steuerung der zwei permanenterregten Synchronmotoren durch zwei Frequenzumrichter. Hier handelt es sich um zwei Spannungszwischenkreisumrichter mit Pulsweitenmodulation und Vektorregelung. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Ansteuerung des Motors mittels Optionskarten über CAN-Bus erfolgen zu lassen. Die Steuerung des Linear-Aktuators kann auch mittels Encoder über CAN-Bus erfolgen.

Um die Zustandsgrößen des Gesamtprüfstands sowie des Prüflings korrekt zu erfassen, können je nach Validierungsziel unterschiedliche Messtechniken zum Einsatz kommen. Die wichtigsten Zustandsgrößen des Mini-HiLs sind die aktuelle Drehzahl und das aktuelle Drehmoment sowie die aktuelle Position bzw. Wege von Linearstellern. Der Sensor zur Ermittlung der Rotorlageposition und der Drehzahl ist bereits in den Motor integriert. Zur Erfassung des Drehmoments können je nach Anforderungen an Messqualität und Einbauart unterschiedliche Drehmomentsensoren (z.B. Drehmomentmessnabe, magnetostriktiver Drehmomentsensor) eingesetzt werden. Außer Drehzahl und Drehmoment können

die Kraft an Linearstellern, die Winkellage von rotierenden Teilen, der Druck in Hydraulikleitungen sowie die Temperatur in Bauteilen und flüssigen Medien durch Einsatz von entsprechenden Sensoren erfasst werden. Darüber hinaus kann ein Laser-Vibrometer zur Messung der Schwingungen vom Prüfling zum Einsatz kommen.

Interface-Ebene

Die Interface-Ebene ermöglicht die Verknüpfung der Prozess-Ebene und Operativ-Ebene. Da die in der Prozess-Ebene erfassten Messdaten und entsprechenden Stellgrößen oft analoge Signale sind, stellt die Hauptaufgabe dieser Ebene daher die Analog/Digital-Wandlung dar. Vergleichbar zu anderen Prüfständen am IPEK wird ein Management-Information-System-Modul (Abkürzung: MIS-Modul), welches 24 Kanäle Digital Input, 12 bit Digital/Analog-Wandler und Relais beinhaltet, am Mini-HiL eingesetzt. Da der Mini-HiL zur Untersuchung neuer Prüfstandskonfigurationen entwickelt wird, sollten die Interfaces am Mini-HiL zur Erfüllung unterschiedlicher Verbindungsaufgaben möglichst vielfältig sein. Daher wird der Mini-HiL mit einer Multi-I/O-Karte (PCI-DAS 1602/16 von der Firma Measurement Computing), die mehrere Funktionen wie A/D- und D/A-Wandlung, Digital- und Analog-Input/Output auf mehreren Kanälen integriert, ausgestattet. Darüber hinaus ist der Datenaustausch zwischen der Prozess-Ebene und Operativ-Ebene am Mini-HiL mittels CAN-Bus möglich.

Operativ-Ebene

In der Operativ-Ebene kommt ein Industrie PC mit Betriebssystem, Echtzeit-OS xPC-Target und Linux zum Einsatz. xPC-Target ist eine Erweiterung zu MATLAB, mit der ein echtzeitfähiges System auf PC-kompatibler Hardware eingerichtet werden kann³⁴³. Zu erwähnen ist die gute Kooperation von xPC-Target und MATLAB, da es die Ausführung eines Regelungsmodells auf dem Target-Rechner mit dieser Softwarekombination vereinfacht. In wenigen Bearbeitungsschritten kann das in Simulink³⁴⁴ oder Stateflow³⁴⁵ erstellte Modell mittels eigenen Compilers³⁴⁶ kompiliert und an das Echtzeitsystem gesendet werden. Zur Echtzeitregelung des Prüfstands wird eine am IPEK entwickelte Regelungssoftware „Sirius“³⁴⁷ eingesetzt. Das am Mini-HiL eingesetzte Sirius-Regelungsmodell besteht aus einem mit Simulink erstellten Modell und einer durch Real-Time-Workshop³⁴⁸ Compiler erstellten echtzeitfähigen C-Code³⁴⁹ Datei. Außer der Echtzeitregelung der

³⁴³ MathWorks® www.mathworks.com

³⁴⁴ Simulink® <https://de.mathworks.com/products/simulink.html>

³⁴⁵ Stateflow® <https://de.mathworks.com/products/stateflow.html>

³⁴⁶ MathWorks® www.mathworks.com

³⁴⁷ Schyr 2006

³⁴⁸ Simulink® <https://de.mathworks.com/products/simulink.html>

³⁴⁹ Simulink® <https://de.mathworks.com/products/simulink.html>

Belastungsaggregate kann das Sirius Regelungsmodell noch als Anbindung und Parametrierung der I/O-Treiber, Überwachung des Prüfstandszustands sowie Einstellen der Reglerparameter dienen.

Des Weiteren wird der Mini-HiL durch ein ADwin-Echtzeitsystem von der Firma Jäger Messtechnik ³⁵⁰ modernisiert. Das ADwin-System besteht aus einem Echtzeitprozessor, schnellen analogen und digitalen Ein- und Ausgängen sowie einer Kommunikationsschnittstelle zum PC. Da alle Schnittstellen im Echtzeitsystem integriert sind, wird die Prozess-Ebene direkt mit dem ADwin-System verbunden. In folgender Studie kommt das ADwin-System als Echtzeitsystem des Mini-HiLs zum Einsatz.

Bedien-Ebene

Die Bedienung des Prüfstands erfolgt hauptsächlich durch die grafische Benutzerschnittstelle (auf Englisch: Graphical User Interface, Abkürzung: GUI) am Host-PC in der Bedien-Ebene. Da der Mini-HiL mit zwei Echtzeitsystem ausgestattet ist, existiert für jedes Echtzeitsystem eine individuelle GUI.

Für xPC-Target können die individuelle GUI mittels der definierten Programmierschnittstellen (APIs) erstellt werden. Am Mini-HiL wird, wie an den anderen Prüfständen des IPEKs, das „Sirius-Control“ zur Bedienung des Regelungsmodells eingesetzt. Jedoch muss noch die Benutzerschnittstelle an die besonderen Funktionen und die individuelle Hardwarekonfiguration von Mini-HiL angepasst werden. Auch das Regelungsmodell kann je nach spezifischen Anforderungen und Konfigurationen mit der Software MATLAB/Simulink bearbeitet werden.

Für das ADwin-System stehen mehrere eigene Steuerungssoftwares zur Verfügung. Das sogenannte „ADsim“ ermöglicht, die Simulink-Modelle auf ADwin-Hardware abzulaufen. Zuerst sollten die Ein- und Ausgänge des ADwin-Systems als Blöcke ins Simulink-Modell eingefügt und daraus der C-Code generiert werden. Nach der Kompilierung läuft das Modell im ADwin-System zyklisch mit bis zu 100 kHz³⁵¹. Während des Versuchsablaufs lassen sich alle aktuellen Signale in einer mit der Software „ADsimDesk“ definierten GUI anzeigen und einstellen. Neben „ADsim“ können die Mess-, Steuer- und Regelungsabläufe mittels der Software „ADbasic“ programmiert werden³⁵². Mit der Software ADbasic“ können noch die Vorgänge „Messen/Lesen“ und „Setzen“ von analogen oder digitalen Ein-/Ausgänge sowie Datenaustausch mit anderer Software auf dem Host-PC ausgeführt werden.

Leit-Ebene

³⁵⁰ Quelle: Jäger GmbH <http://www.adwin.de/index.html>

³⁵¹ Quelle: Jäger GmbH <http://www.adwin.de/de/produkte/adsim.html>

³⁵² Quelle: Jäger GmbH <http://www.adwin.de/de/produkte/adsim.html>

Die für verschiedene Untersuchungen verwendeten Regelungsmodelle und -parameter werden in einem Bibliothekordner gespeichert und können jederzeit nachbereitet und in den zukünftigen Anwendungen weiterverwendet werden.

Das folgende Diagramm zeigt die Hard- und Software Architektur des Mini-HiLs.

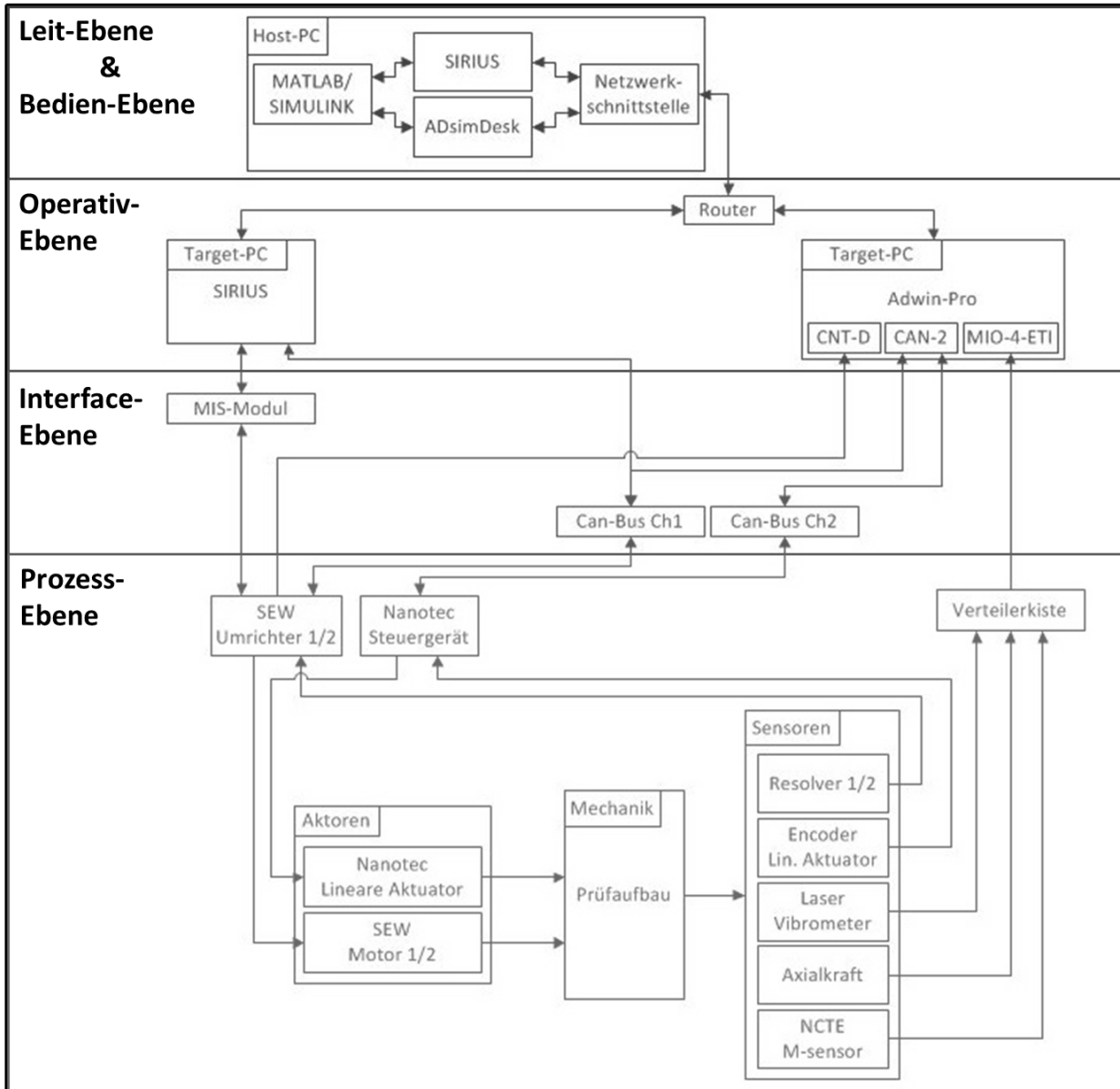


Bild 6-2 Hard- und Software Architektur des Mini-HiLs

6.1.2 Fahrsimulator

Beim IPEK-Fahrsimulator handelt es sich um einen universellen Fahrsimulator, mit welchem die voll funktionsfähige Innenraumfahrerseite eines Fahrzeuges nachgebildet werden kann, um den Mensch als Fahrer in die Validierung

(durchgängig vom virtuellen Fahrzeug bis zum realen Fahrversuch) zu integrieren. Das folgende Bild zeigt die Hard- und Software-Architektur des Fahrstimulators³⁵³.

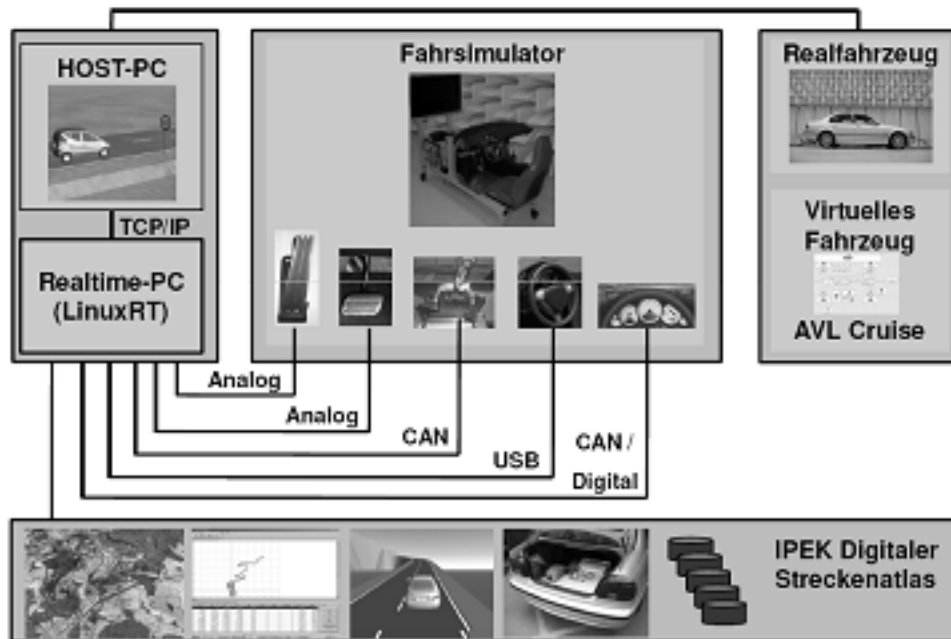


Bild 6-3 Hard- und Software Architektur des Fahrstimulators³⁵⁴

Die Kommunikation zwischen dem Fahrstimulator und dem Echtzeitsystem in der Operativ-Ebene erfolgt über verschiedene Schnittstellen.

- Via CAN
 - Schaltboxsignale, die die Information der Schalthebelstellung und/oder des gewählten Gangs ausgeben.
 - Signale aus dem Kombiinstrument, wie z.B. Motordrehzahl, Motortemperatur, analog und digitale Geschwindigkeit, Tripzähler, Gesamtwegstreckenzähler, etc.
 - Das Signal des Bremspedalwinkels.
- Via Analogsignal
 - Gaspedalsignal, welches die aktuelle Position des Pedals liefert.
 - Bremspedalsignal, welches den Pedalbetätigungsweg ausgibt.
- Via USB
 - Signale der Force-Feedback-Lenkradeinheit, wie z.B. aktueller Lenkwinkel und Gegenkraft.

³⁵³ Albers et al. 2009

³⁵⁴ Albers et al. 2009

- Via Digital
 - Diverse Logiken für Zündung ein/aus, etc.

Die oben genannten Signale werden im Echtzeitsystem zusammengeführt, in dem die Integration dieser Signale mit der Umwelt- und Restfahrzeugsimulation ausgeführt wird. Die Fahrzeugdynamik kann entweder mittels virtueller Fahrzeugmodelle oder eines Gesamtfahrzeugs auf einem Rollenprüfstand abgebildet werden. Die Umweltsimulation erfolgt über den digitalen Streckenatlas des IPEKs, der unterschiedliche repräsentative Fahrstrecke (wie z.B. Bergstrecken in den österreichischen Alpen, Fahrstrecke im Stadtgebiet und Rennstrecken, etc.) beinhaltet³⁵⁵. Auf dem Host-PC können die Fahrzeug- und Umweltmodelle mittels entsprechender Software (z.B. AVL Cruise³⁵⁶, IPG CarMaker³⁵⁷, MATLAB, etc.) modifiziert werden. In Zusammenarbeit mit verschiedenen Prüfständen können die Kommunikationsschnittstellen mit dem Fahrsimulator in verschiedene spezifische Softwares (z.B. AVL PUMA³⁵⁸, IPG CarMaker, etc.) integriert werden. Für diese Studie erfolgt die Kommunikation mit dem Fahrsimulator über die Software IPG CarMaker.

6.1.3 Dauerschlupf-Prüfstand

Der Dauerschlupf-Prüfstand (Abkürzung: DSP) am IPEK ermöglicht es, die Kupplungssysteme im Dauerschlupfbetrieb zu untersuchen³⁵⁹. Die Prozess-Ebene wird mit zwei großen Motoren und entsprechenden Umrichtern sowie diversen für die Dauerschlupfuntersuchung notwendigen Messtechnik ausgestattet. In der Operativ-Ebene wird wie beim Mini-HiL das xPC-Target und Sirius eingesetzt. Jedoch muss das Regelungsmodell an die Hardware in der Prozess-Ebene angepasst werden. In der Bedien-Ebene kommt ebenfalls das „Sirius-Control“ zum Einsatz. Für verschiedene Anwendungen kann das Regelungsmodell mit Hilfe der Software MATLAB in der Bedien-Ebene modifiziert werden. Da der DSP ähnliche Hard- und Softwarearchitektur (Operativ- und Bedien-Ebene) wie der Mini-HiL aufweist, kann der Programmierungs- und Implementierungsaufwand der Kommunikationsschnittstelle für die Vernetzung mit Mini-HiL deutlich reduziert werden.

³⁵⁵ Albers et al. 2009

³⁵⁶ Quelle: <https://www.avl.com/cruise>

³⁵⁷ Quelle: <https://ipg-automotive.com/products-services/simulation-software/carmaker/>

³⁵⁸ Quelle: <https://www.avl.com/-/avl-puma-open-automation-platform>

³⁵⁹ Albers / Koch 2014

6.2 Vorgehensweise der Vorstudie

Die Vorstudie wird im Zusammenhang mit einer betreuten studentischen Arbeit durchgeführt³⁶⁰. Anhand der im Anhang eingefügten Vorgehensweise der statistischen Versuchsplanung (in Englisch: Design of Experiments, Abkürzung: DoE) wird die Vorstudie ausgeführt. Zuerst werden mögliche Einflussfaktoren identifiziert. Mit Hilfe einer spezifischen DoE-Software wird eine Versuchsplanung erstellt, nach der die unterschiedlichen Kombinationen der Einflussfaktoren untersucht werden. Basierend auf deren Ergebnissen können dann die Machbarkeit vom IPEK-XiL-Ansatz in der verteilten Fahrzeugentwicklung sowie die Einflüsse von jedem Faktor ausgewertet werden.

6.2.1 Einflussfaktoren

Als potenzielle Einflussfaktoren werden in dieser Studie der Fahrzyklus, der Verteilungszustand, die Hardware und die Internetlatenzzeit untersucht. Im Folgenden werden diese vier Einflussfaktoren einzeln vorgestellt.

6.2.1.1 Fahrzyklus

In dieser Vorstudie kommen zwei sehr bekannte Fahrzyklen [Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ) und Federal Test Procedure-75 (FTP-75)] zum Einsatz. Der NEFZ besteht eigentlich aus zwei Zyklen, die jeweils den Stadtverkehr (ECE-15) und den Überlandverkehr (EUDC) beschreiben. Der FTP-75 ist ein in den USA vorgeschriebener Fahrzyklus. Im Vergleich zum NEFZ weist der FTP-75 mehr Geschwindigkeitsänderungen auf. Daher muss der Fahrer bei der Durchführung des FTP-75 flexibler und schneller reagieren. Somit kann untersucht werden, ob und inwieweit die Durchführung bestimmter Fahrzyklen von der Verteilung bzw. der Latenzzeit beeinträchtigt wird. Insgesamt dauert der NEFZ 1200 Sekunden und der FTP-75 2400 Sekunden. Da die Fahrzyklen während der Vorstudie mehrmals wiederholt werden müssen, wird statt der ganzen Fahrzyklen nur ein Teil davon verwendet, um den Zeitaufwand zu reduzieren. In Bezug auf die Vorstudie werden die Ergebnisse somit nicht beeinträchtigt. Die folgenden Bilder stellen die in der Vorstudie verwendeten verkürzten Fahrzyklen dar.

³⁶⁰ Ma et al. 2014

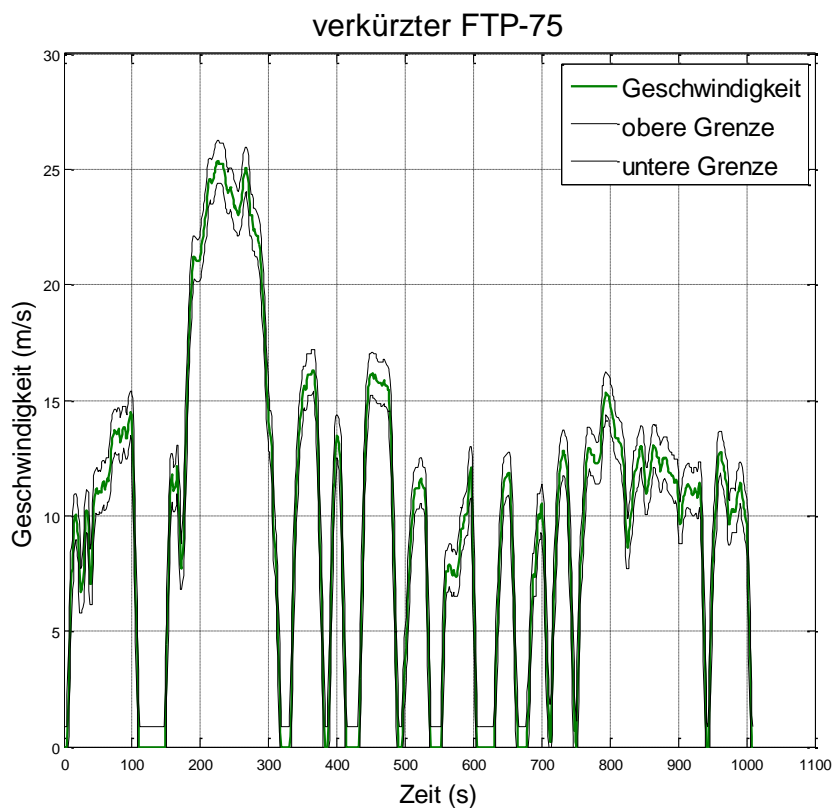
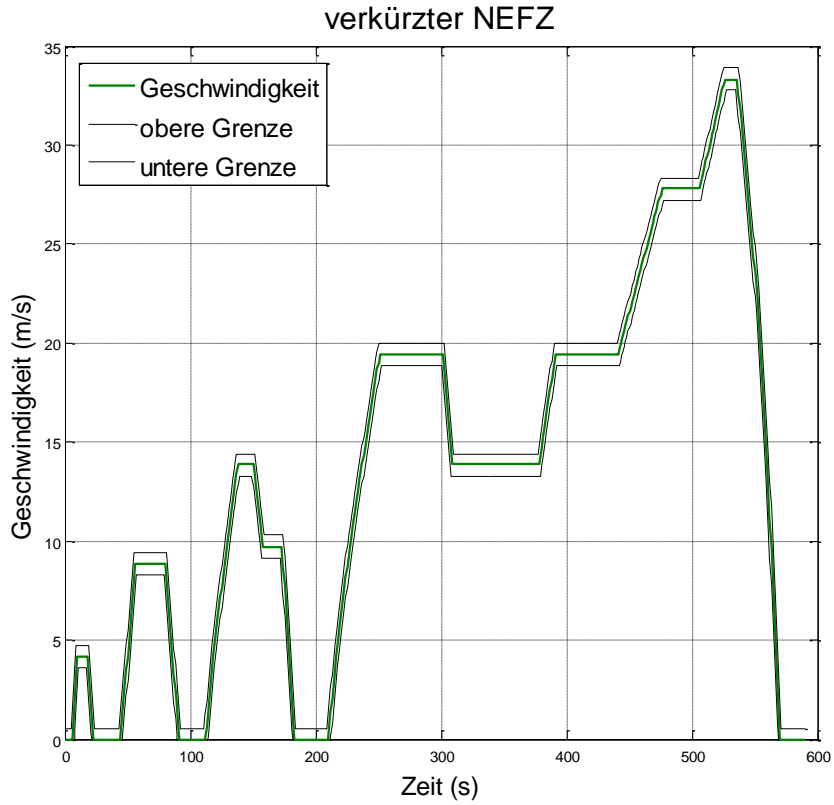


Bild 6-4 verkürzter NEFZ (oben) und FTP-75 (unten)

6.2.1.2 Verteilungszustand

Der Verteilungszustand beschreibt, welche Bestandteile des IPEK-XiL-Frameworks verteilt sind und wie sie miteinander gekoppelt werden. In dieser Studie werden zwei Verteilungszustände untersucht. In beiden Verteilungszuständen wird das gesamte Fahrzeug immer beim Mini-HiL (Standort 1) durch physische Modelle abgebildet. Gleichzeitig bleibt der Fahrer immer am Fahrsimulator, der sich an einem anderen Standort (Standort 2) befindet. Die Kommunikation zwischen zwei Standorten erfolgt am Mini-HiL durch einen zusätzlichen Laptop, auf dem die Software MATLAB als Kommunikationsschnittstelle läuft. Am Standort 2 dient ebenfalls die Software MATLAB als Kommunikationsschnittstelle, die auf dem Host-PC des Fahrsimulators läuft.

Der Unterschied zwischen den beiden Verteilungszuständen ist die Umweltsimulation, die in dieser Untersuchung hauptsächlich die Fahrwiderstände liefert. Zu einem läuft die Umweltsimulation auf dem Echtzeitsystem des Fahrsimulators am Standort 2. In diesem Fall (Verteilungszustand 1) sollten die berechneten Widerstände zusammen mit den Fahrinformationen (Beschleunigungs- und Bremssignale) zum Mini-HiL gesendet werden. Im anderen Fall (Verteilungszustand 2) findet die Umweltsimulation zusammen mit dem physisch simulierten Fahrzeug auf dem Echtzeitsystem vom Mini-HiL statt. In den folgenden zwei Bildern werden die zwei Verteilungszustände dargestellt.

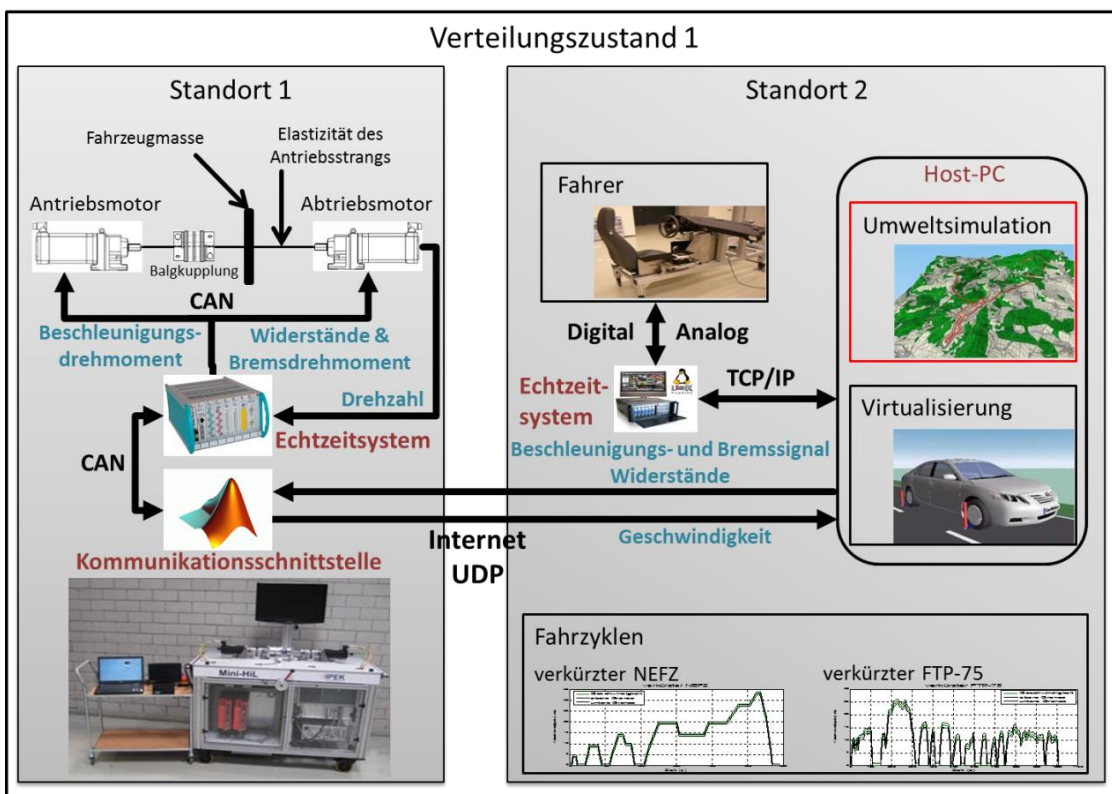


Bild 6-5 Verteilungszustand 1

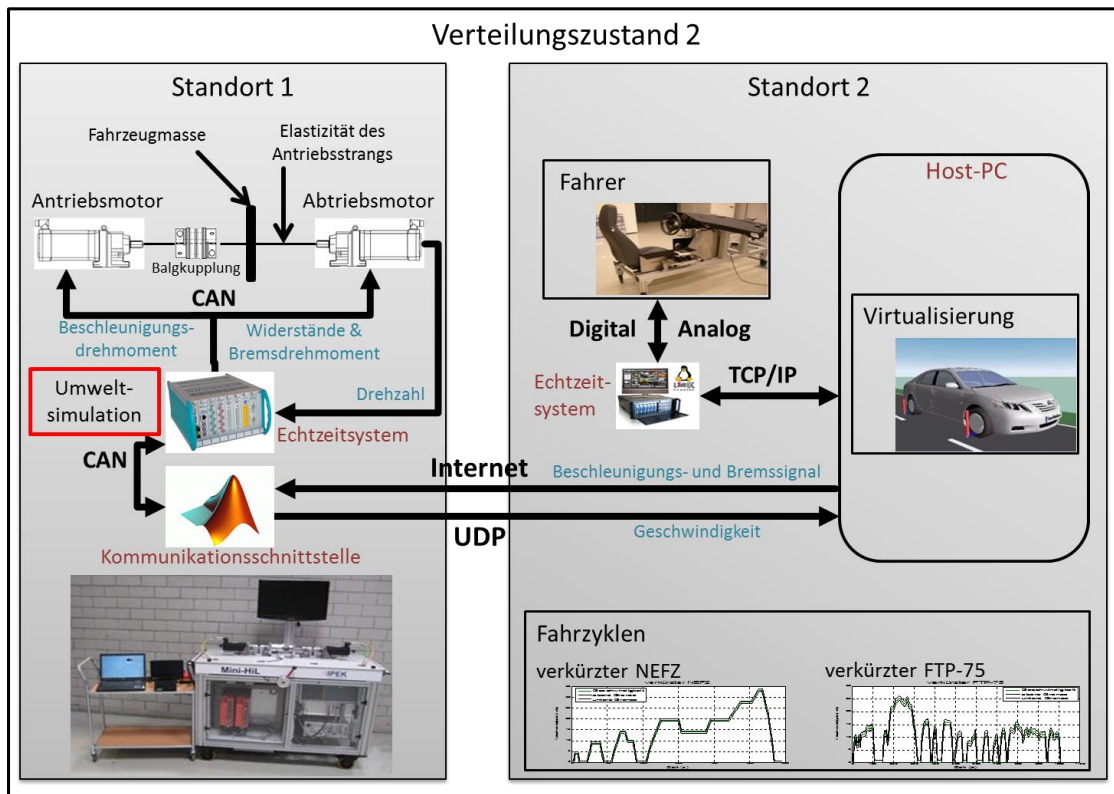


Bild 6-6 Verteilungszustand 2

6.2.1.3 Hardware

Weil die Hardware vom Fahrsimulator und dem Mini-HiL nicht einfach austauschbar ist, werden in dieser Studie zwei Laptops mit verschiedenen Leistungen als Kommunikationsschnittstelle am Mini-HiL eingesetzt. Jedoch wird die gleiche Software bzw. Softwareversion verwendet.

6.2.1.4 Internetlatenzzeit

Die gesamte Latenzzeit beinhaltet nicht nur die Datenübertragungszeit (Internetlatenz) zwischen zwei Standorten sondern auch die Bearbeitungszeit innerhalb des Prüfstandssystems. Die Datenübertragungszeit hängt von der Distanz zwischen den Standorten und den Bearbeitungszeiten in dem Netzwerkrouter an jedem Standort ab. Die Bearbeitungszeit innerhalb des Prüfstandssystems lässt sich von der Hard- und Software-Architektur des Prüfstands und der integrierten Kommunikationsschnittstelle bestimmen. Da in dieser Studie die Vernetzung nur zwischen zwei bestimmten Standorten untersucht wird, kommt ein Netzwerkemulator zur Einstellung der zusätzlichen Internetlatenz zum Einsatz. Im Rahmen dieser Studie variiert die zusätzliche Internetlatenz zwischen 0 Millisekunde bis zu 80 Millisekunden.

6.2.2 Erstellung des Testplans anhand statistischer Versuchsplanung

Nachdem die möglichen Einflussfaktoren festgestellt wurden, werden die Einflüsse jedes Faktors untersucht. Der Umgang mit vielen Variablen erfordert immer eine große Sorgfalt bei der Versuchsplanung und -durchführung. Nach vollfaktorieller Versuchsplanung³⁶¹, bei der in einer Versuchsreihe alle möglichen Kombinationen von allen Varianten untersucht werden, ergeben sich in dieser Studie 72 Kombinationen. Im Gegensatz dazu stellt die teilfaktorieller Versuchsplanung³⁶² eine Methode zur effizienten Planung und Auswertung von Versuchsreihen dar, da die Anzahl an Versuchspunkten sich mit teilfaktoriellen Versuchsplänen deutlich reduzieren lässt. Im Allgemeinen wird der Versuchsplan mithilfe einer statistischen Planungssoftware erstellt, welcher die Faktoren zur Bestimmung aller Effekte orthogonal zueinander positioniert³⁶³. Im Rahmen dieser Studie kommt die SPSS Software³⁶⁴ (Details siehe³⁶⁵) zur Erstellung des Versuchsplans zum Einsatz.

6.2.3 Analyse der Ergebnisse

Nach den durchgeführten Untersuchungen kann festgestellt werden, dass eine Vernetzung zwischen verschiedenen Prüfständen in der Praxis realisierbar ist. Um die Prüfstandsvernetzung beim Einsatz in konkreten Anwendungen zu unterstützen, müssen die Einflüsse jedes Faktors bewertet werden. Zur Bewertung der Einflussfaktoren werden der Anteil der Überschreitung der erlaubten Toleranzen von einem gesamten Fahrzyklus sowie das Fahrgefühl als zwei Hauptkritiken vorgenommen.

Die folgenden Diagramme zeigen beispielsweise die Fahrerergebnisse (Bild 6-7) sowie die Gesamtlatenzzeit der 27. Untersuchung (Bild 6-8): Manöver 1 (NEFZ), Verteilungszustand 2, Laptop 1 und zusätzliche Internetlatenz 6 (50 ms). Die Überschreitung der Toleranz beträgt 7,81% und die Gesamtlatenzzeit beträgt 281,6 ms (Bild 6-8).

³⁶¹ Siebertz et al. 2010

³⁶² Siebertz et al. 2010

³⁶³ Siebertz et al. 2010

³⁶⁴ Quelle: <https://www.ibm.com/analytics/de/de/technology/spss/>

³⁶⁵ Ma et al. 2014

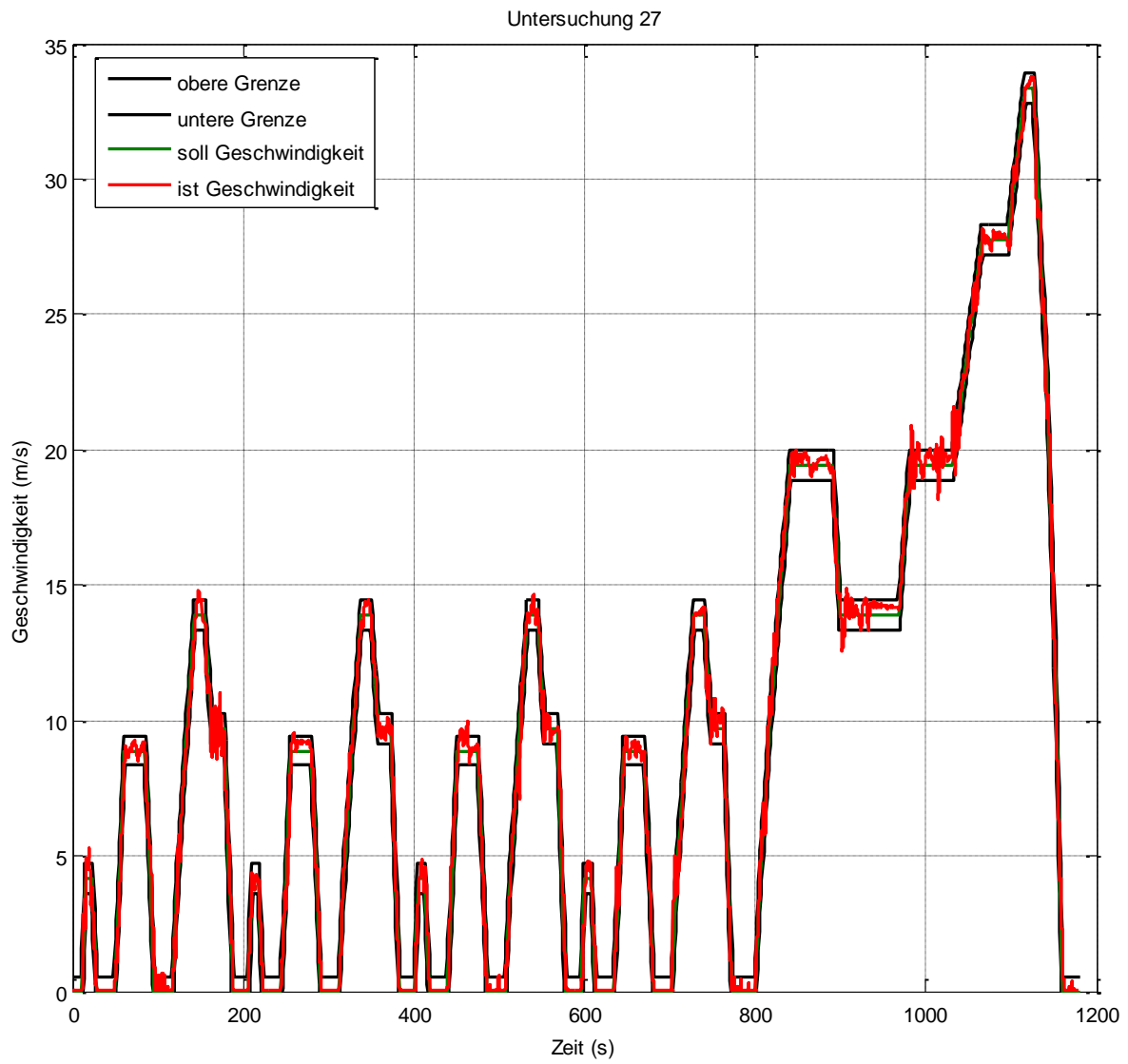


Bild 6-7 Ergebnisse der 27. Untersuchung

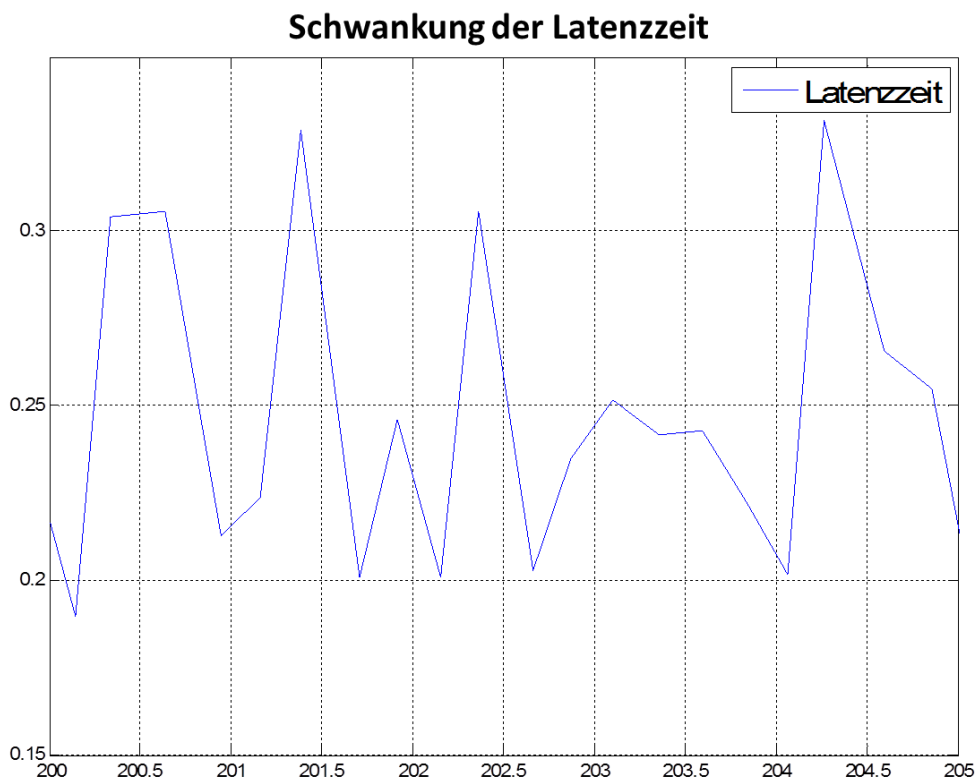
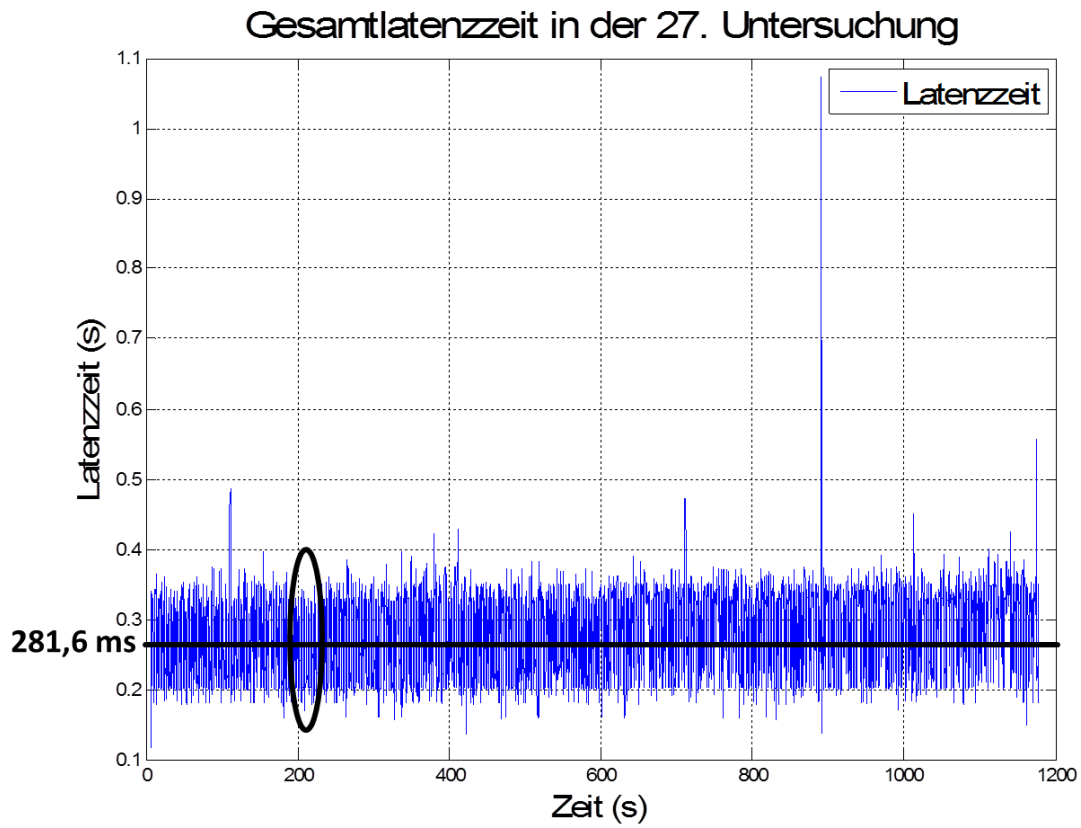


Bild 6-8 Gesamtlatenzzeit der 27. Untersuchung (oben) und im Detail (unten)

Die Analyse wurde ebenfalls mithilfe der SPSS Software ausgeführt (Details siehe³⁶⁶). Nach der Varianzanalyse wurde festgestellt, dass das Manöver den größten Einfluss aufweist. Die Hardware sowie der Verteilungszustand weisen zu diesem Untersuchungszweck einen nur sehr leichten Einfluss auf. Da die Gesamtlatenzzeit durchschnittlich 296 ms (198 - 418 ms) beträgt, hat die zusätzliche Internetlatenzzeit zwischen 0-80 ms im Vergleich dazu auch keine signifikante Wirkung. Die Ergebnisse aller Untersuchungen werden im Anhang dargestellt.

Das Fahrgefühl stellt das zweite Bewertungskriterium dar. Nach allen Untersuchungen lassen sich die folgenden zwei Punkte zusammenfassen³⁶⁷:

1. Bei keiner starken Geschwindigkeitsänderung ist es einfach, innerhalb der Toleranz zu bleiben. Allerdings ist es wegen der Latenzzeit schwierig, die Geschwindigkeit innerhalb der Toleranz eines dynamischen Fahrzykluses zu halten. Dies entspricht auch den Ergebnissen der Varianzanalyse. Daher hat das Manöver bei den Anwendungen mit einer Latenzzeit über 200 ms den größten Einfluss.
2. Da der Datenaustausch zwischen den zwei Prüfständen mit einer Frequenz von 4 Hz stattfand, wurde die Geschwindigkeit ca. alle 247 ms aktualisiert. Dadurch wurde die Reaktionszeit des Fahrers beeinträchtigt.

6.2.4 Zwischenfazit

Zusammenfassend kann man durch die Vorstudie zeigen, dass der IPEK-XiL-Ansatz in der verteilten Fahrzeugentwicklung in Praxis einsetzbar ist. Bei den Anwendungen des IPEK-XiL-Ansatzes mit verteilten Teilsystemen müssen hauptsächlich die zwei Einflussfaktoren Latenzzeit und Manöver gemeinsam betrachtet werden. Vor allem muss die Gesamtlatenzzeit minimiert werden. Danach kann die Prüfstandsvernetzung unter den Manövern, die unter diesen Bedingungen stattfinden, durchgeführt werden. Daher wird in der folgenden Arbeit untersucht, wie die Gesamtlatenzzeit sowie Datenaustauschfrequenz unter bestimmten Randbedingungen optimiert werden kann.

6.3 Implementierungskonzepte

Um die Verbindung bei der Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung weiter zu optimieren, werden in diesem Unterkapitel drei Implementierungskonzepte auf Basis der Vorstudie entwickelt. Im Folgenden wird konkret auf jedes einzelne Konzept eingegangen.

³⁶⁶ Ma et al. 2014

³⁶⁷ Ma et al. 2014

6.3.1 Konzept 1: Host to Host

Beim Konzept 1 wird die Verbindung auf der Bedien-Ebene hergestellt (Bild 6-9). Dies bedeutet, dass der Host-PC nicht nur die Interaktion zwischen Bediener- und Operativ-Ebene sondern auch die Kommunikation zwischen verschiedenen Prüfständen übernimmt. Für die Kommunikation können unterschiedliche Softwares verwendet werden. Zum Beispiel kommt die Software MATLAB wegen ihrer guten Kompatibilität mit verschiedenen spezifischen Prüfstandsteuerungssoftwares oft zum Einsatz.

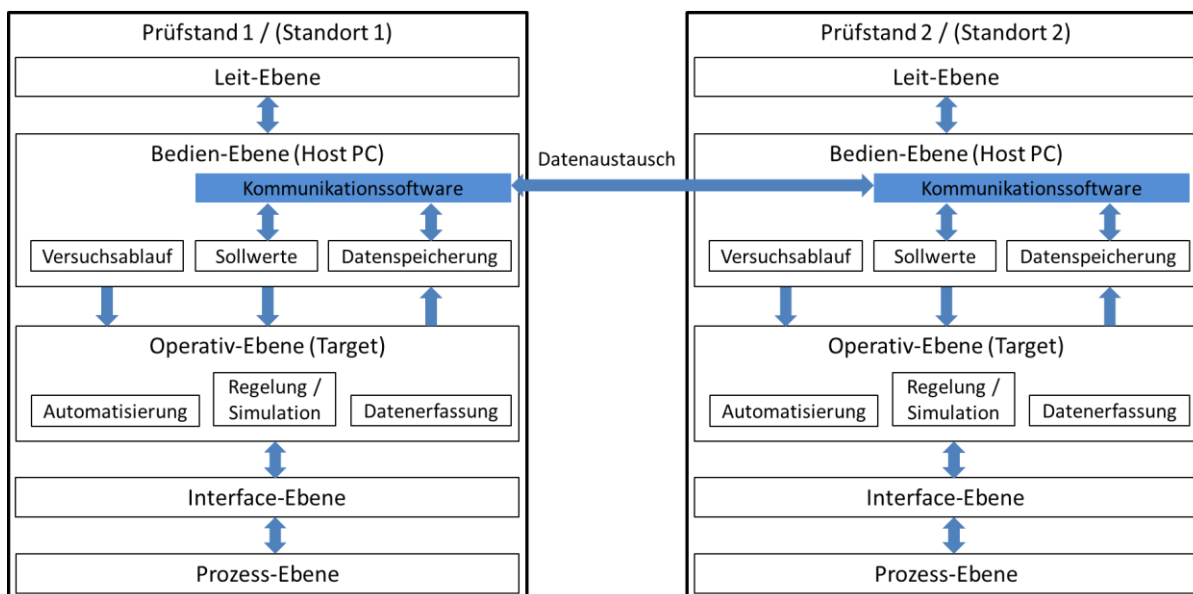


Bild 6-9 Konzept 1 Host to Host

6.3.2 Konzept 2: Target to Target

Die Kommunikation beim Konzept 2 findet auf der Operativ-Ebene statt (Bild 6-10). Die Signale werden direkt zwischen den Targets ausgetauscht. Da die Steuerung des Prüfstands von der Bedien-Ebene gleichzeitig funktionieren sollte, darf die Verbindung zwischen Targets und ihren eigenen Host-PCs nicht unterbrochen werden. Aus Sicherheitsgründen sollen die ausgetauschten Signale auch von der Bedien-Ebene sichtbar sein.

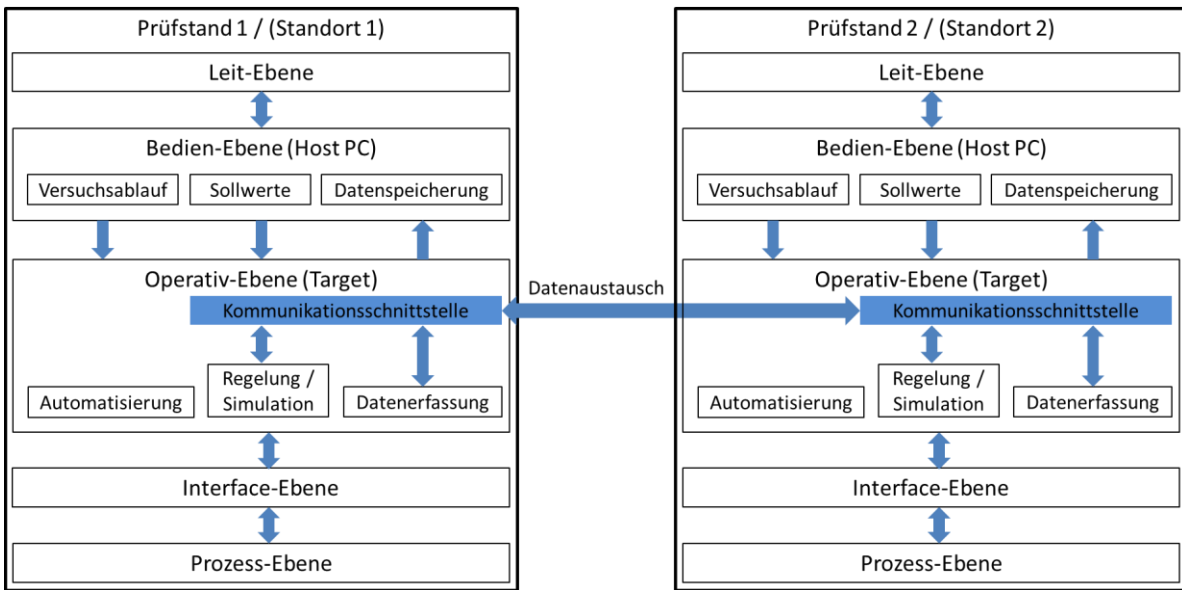


Bild 6-10 Konzept 2 Target to Target

6.3.3 Konzept 3: One Host to multiple Targets

Ähnlich wie Remote-Control ermöglicht das Konzept 3 die Fernsteuerung der verteilten Targets bzw. Prüfstände. Die Steuerung des lokalen Targets findet auf demselben Host-PC statt. Daher sollte die Verknüpfung ebenfalls auf demselben Host-PC erstellt werden (Bild 6-11). Bei diesem Konzept muss man besonders darauf achten, dass die Remote Targets und Prüfstände auch vor Ort überwacht und im Notfall ausgeschaltet werden können.

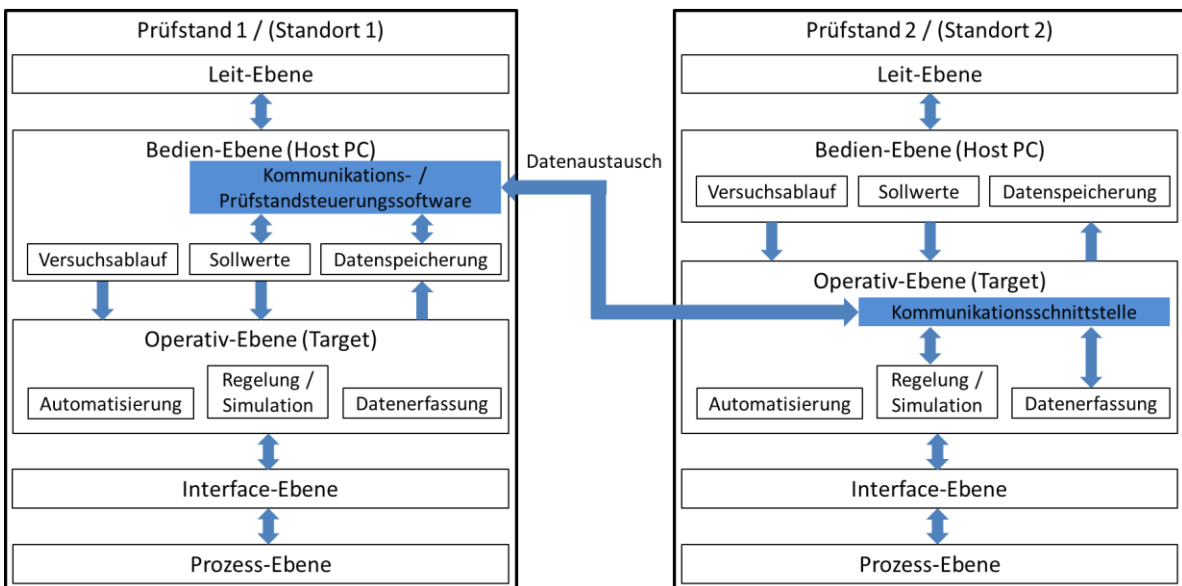


Bild 6-11 Konzept 3 One Host to multiple Targets

6.4 Untersuchung der Gesamtlatenzzeit der drei Konzepte

Um die Verbindung auf Basis der drei Konzepte zu untersuchen, werden die Gesamtlatenzzeiten mit verschiedenen Hardware und Konfigurationen gemessen. Außer dem Fahrsimulator und dem Mini-HiL kommt noch der DSP, der ein gleiches Echtzeitsystem wie Mini-HiL besitzt, bei der Latenzzeitmessung zum Einsatz. Die Zeitsignale werden von einem Host-PC erzeugt und an das verteilte System gesendet. Das verteilte System bekommt diese Zeitsignale und sendet dieses sofort wieder zurück. Mit diesen zurückgekommenen Zeitsignalen und der aktuellen Zeit auf dem Host-PC kann die Gesamtlatenzzeit berechnet werden. Allerdings findet die Berechnung in jeder Millisekunde auf dem Host-PC statt. Wenn kein Signal in dem Berechnungsschritt zurückgekommen ist, wird die Berechnung mit dem letzten zurückgekommenen Signal durchgeführt. Deswegen steigt das Berechnungsergebnis an, bis ein Signal wieder zurückkommt. Daher beschreiben nur die Berechnungsergebnisse mit den zurückgekommenen Signalen die Gesamtlatenzzeit (siehe Bild 6-20).

Konzept 1: Host to Host

Die Vernetzung von Mini-HiL und Fahrsimulator erfolgt über eine Host to Host Verbindung. Das untere Bild stellt den Datenablauf im Gesamtsystem dar (Bild 6-12). Die blauen Linien zeigen den Datenfluss von Mini-HiL zum Fahrsimulator und die roten Linien von Fahrsimulator zum Mini-HiL. Die Kommunikation mit dem Echtzeitsystem bzw. der Software CarMaker for HiL vom Fahrsimulator über die zurzeit verfügbare TCP/IP Schnittstelle mittels der Software MATLAB beträgt ca. 85 ms. Die Kommunikation zwischen zwei Host-PC über Internet mittels der UDP-Schnittstellen der Software MATLAB dauert ca. 70 ms. Der Datenaustausch zwischen Host-PC und ADwin System mit der Software MATLAB braucht ca. 5 ms. Daher beträgt die Gesamtlatenzzeit ca. 160 ms (Bild 6-13).

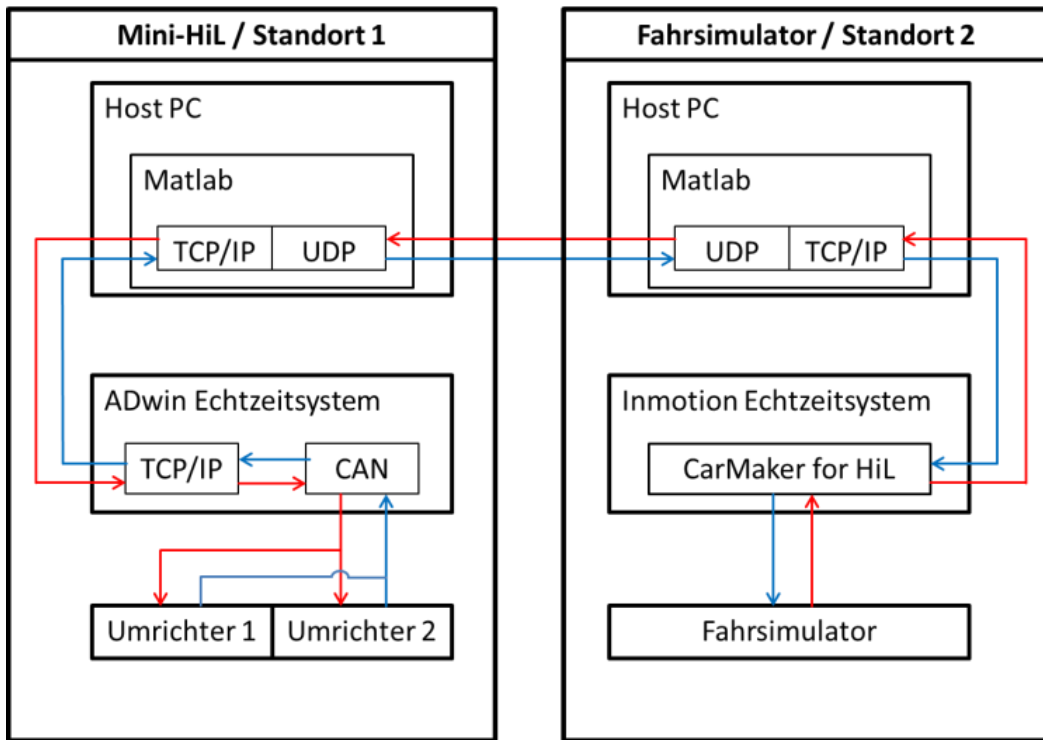


Bild 6-12 Datenablauf und Gesamlatenzzeit des Gesamtsystems

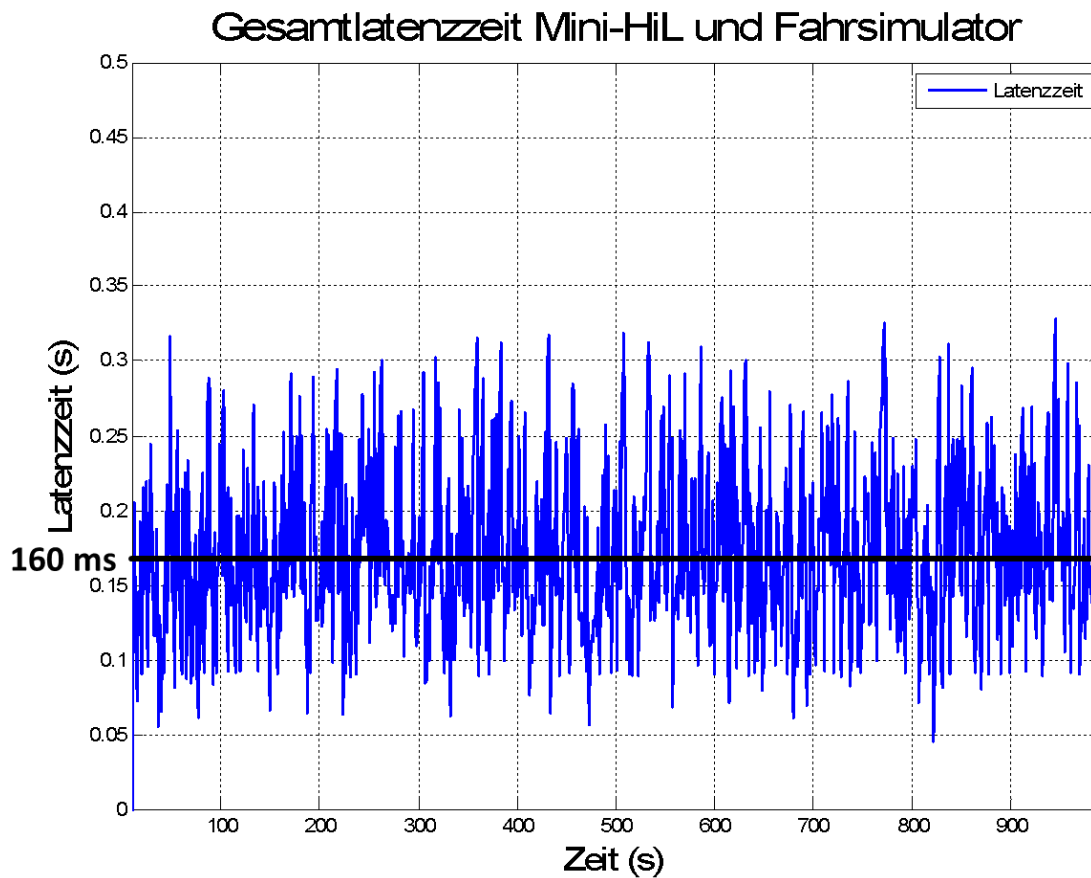


Bild 6-13 Gesamtlatenzzeit Mini-HiL und Fahrsimulator (Host to Host)

Konzept 2: Target to Target

Die Untersuchung der direkten Verbindung zwischen Targets wird mit dem Mini-HiL und DSP durchgeführt. Da die zwei Prüfstände das gleiche Echtzeitsystem (xPC-Target) aufweisen, kann die gleiche Kommunikationsschnittstelle bei den beiden Prüfständen implementiert werden. Die folgenden Diagramme zeigen die Latenzzeit zwischen Mini-HiL und DSP. Während der Messung wurde die Kommunikation zwischen dem Echtzeitsystem und dessen Host-PC ausgeschaltet, damit die Verbindung zwischen zwei Echtzeitsystemen nicht davon beeinflusst wird. Daher erfolgte die Zeitmessung über CAN-Bus mit Vector CANcaseXL³⁶⁸. Allerdings können die CAN-Signale durch MATLAB und CANcaseXL mit einer Frequenz von 50 Hz gelesen werden. Da diese Frequenz niedriger als die Datenaustauschfrequenz zwischen den zwei Echtzeitsystemen liegt, stellen die mit CANcaseXL gelesenen Signale einen Datenaustausch mit 50 Hz dar (Bild 6-14). Die Latenzzeit bleibt meistens stabil zwischen 6 ms und 10 ms. Für eine genaue Messung der Latenzzeit sind Messgeräte mit einer Messfrequenz, die höher als die Datenaustauschfrequenz liegt, erforderlich.

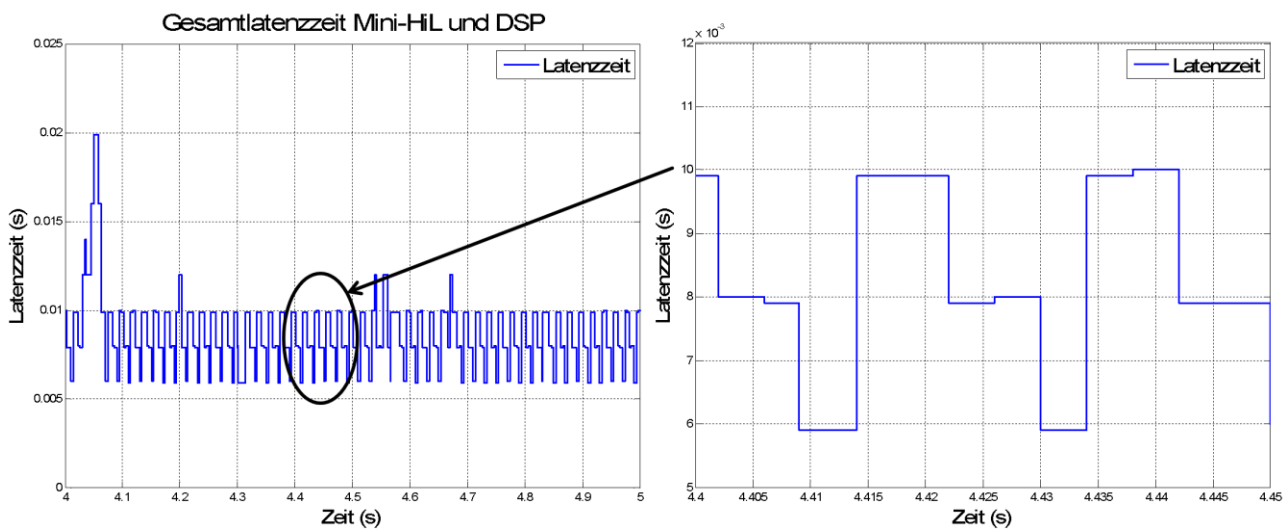


Bild 6-14 Gesamtlatenzzeit zwischen Mini-HiL und DSP (Target to Target)

Konzept 3: One Host to multiple Targets

Bevor zwei Prüfstände über einen Host-PC gekoppelt werden, wird zuerst die Fernsteuerung eines verteilten Prüfstands untersucht. In diesem Fall stellt der Mini-HiL den verteilten Prüfstand dar, dessen Echtzeitsystem (xPC-Target) über Internet mit dem verteilten Host-PCs verbunden wird. Die Internetlatenzzeit war 1 ms. Die Messung der Gesamtlatenzzeit wurde in zwei Moden durchgeführt. Zum einen kommunizierte der lokale Host-PC mit dem xPC-Target während der Messung. Zum

³⁶⁸ Quelle: Vector Informatik GmbH

http://vector.com/vi_cancase_xl_log_de.html?markierung=cancasexl

anderen wurde die Verbindung des lokalen Host-PCs unterbrochen. Die folgenden Diagramme zeigen den Datenablauf in den zwei Moden (Bild 6-15).

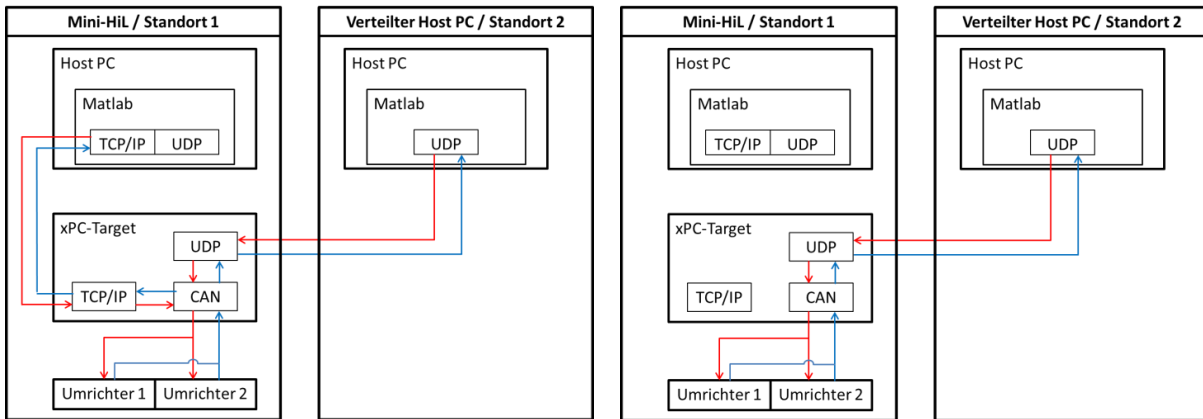


Bild 6-15 Fernsteuerung des Mini-HiLs mit (links) und ohne (rechts) Verbindung mit lokalem Host-PC

Die folgenden zwei Bilder zeigen die Gesamtlatenzzeit der zwei Moden im Vergleich. Aus dem linken Bild erkennt man, dass die Kommunikation zwischen dem Echtzeitsystem und dem verteilten Host-PC regelmäßig unterbrochen wurde. Der Grund dafür ist, dass das Echtzeitsystem nur eine Netzwerkkarte aufweist. Wenn zwei Host-PCs gleichzeitig versuchen, mit dem Echtzeitsystem zu kommunizieren, wird die Verbindung auf den zwei Host-PC geteilt (Bild 6-16 links). Ansonsten bleibt die Verbindung meistens stabil und die Gesamtlatenzzeit unter 4 ms (Bild 6-16 rechts). Die kurzzeitigen Unterbrechungen sind wahrscheinlich von dem Switch und der Internetverbindung verursacht.

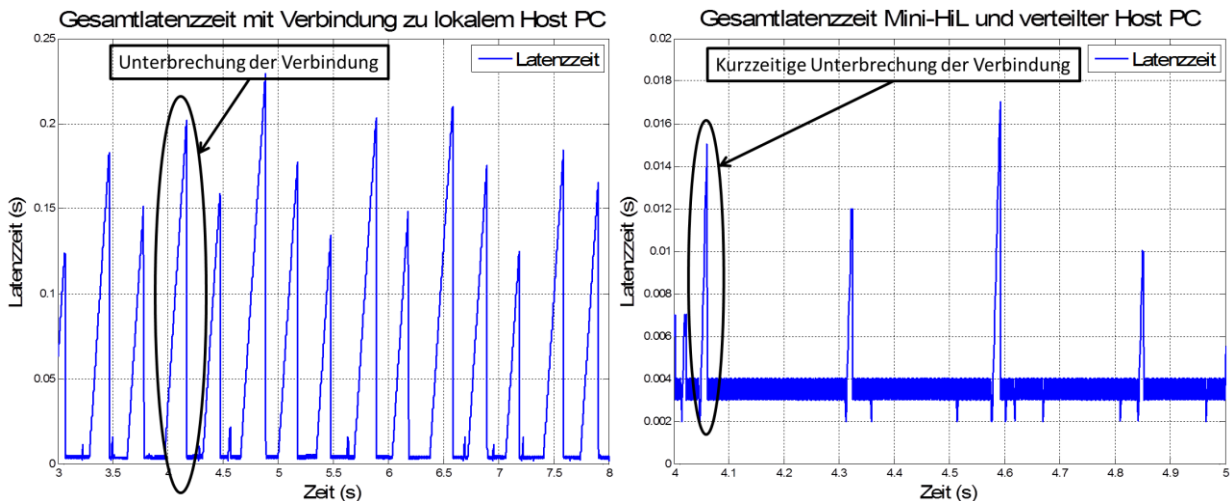


Bild 6-16 Gesamtlatenzzeit mit (links) und ohne (rechts) Verbindung mit lokalem Host-PC

Die folgenden zwei Bilder stellen die Gesamtlatenzzeit im Detail dar (Bild 6-17). Außer der kurzzeitigen Unterbrechung der Kommunikation sind die Gesamtlatenzzeit

und Frequenz des Datenaustausches auch unterschiedlich. Wie im rechten Bild gezeigt, ist die Gesamtlatenzzeit ohne Verbindung mit lokalem Host-PC in der meisten Zeit 3 ms, was bedeutet, dass die vom verteilten Host-PC herausgesendeten Signale in 3 ms zurückkommen können. Alle 2 ms kommt ein Signal zurück. Daher schwanken die Berechnungsergebnisse zwischen 3 und 4 ms. Wenn ein Signal in dem Berechnungsschritt zurückkommt, kann die Gesamtlatenzzeit berechnet werden. Ansonsten steigen die Berechnungsergebnisse in jedem Berechnungsschritt um 1 ms an, welche die Latenzzeit aber nicht beschreibt (siehe Bild 6-17).

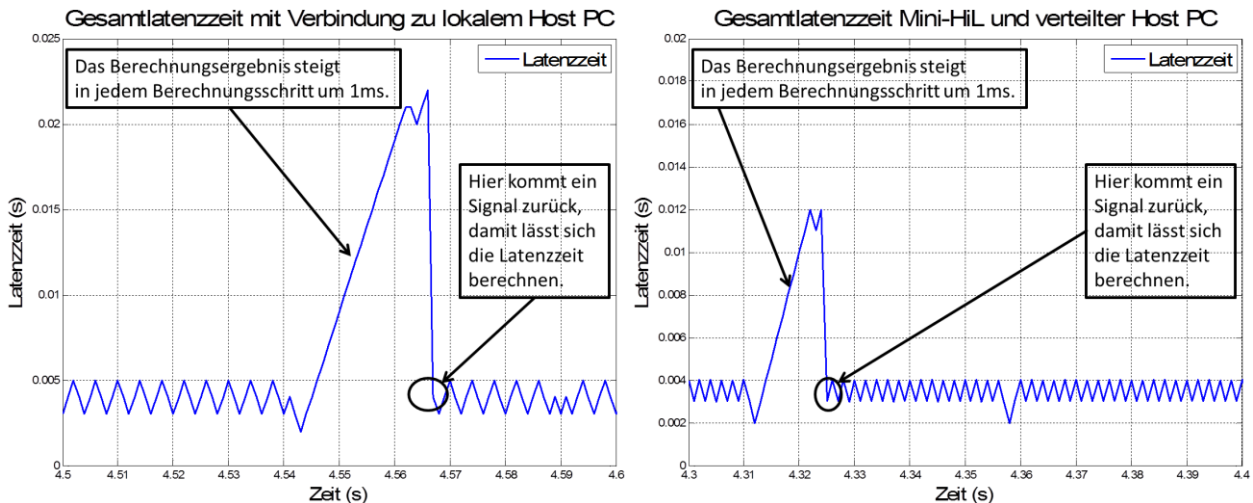


Bild 6-17 Gesamtlatenz detailliert im Vergleich

Nach der Untersuchung der Gesamtlatenzzeit wird dieses Konzept auf zwei Prüfständen bzw. Mini-HiL und Fahrsimulator implementiert. Der Host-PC vom Fahrsimulator stellt den einzigen Host-PC dar, der gleichzeitig mit zwei Echtzeitsystemen kommuniziert. Die Kommunikationen mit beiden Echtzeitsystemen erfolgen über die Software MATLAB. Um eine beste Verbindungsqualität zu ermöglichen, wird der lokale Host-PC von Mini-HiL während der Untersuchung getrennt. Das folgende Bild stellt den Datenablauf dieser Untersuchung dar.

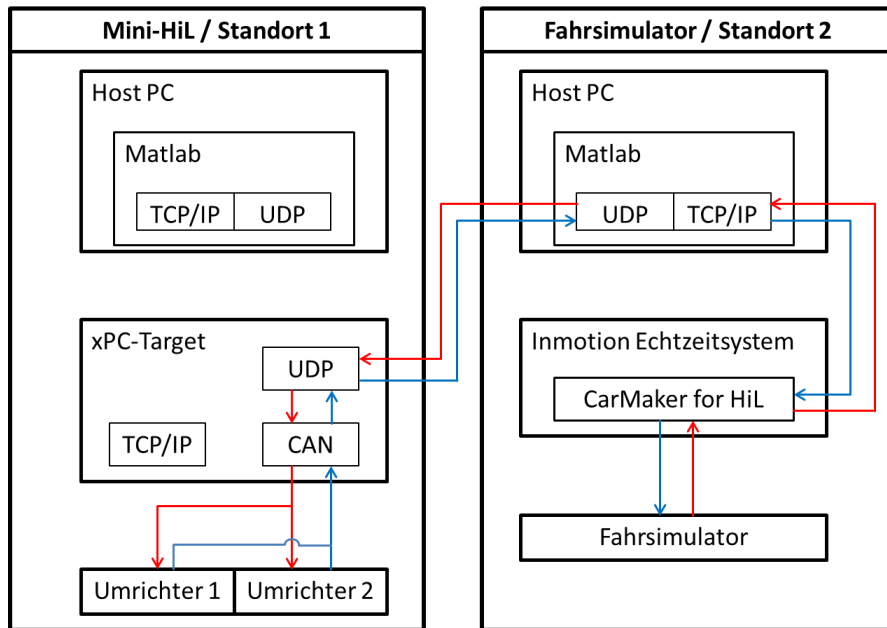


Bild 6-18 Datenablauf Mini-HiL und Fahrsimulator (Konzept 3)

Die gemessene Gesamtlatenzzeit wird in den folgenden Bildern dargestellt (Bild 6-19). Am Anfang hat es ca. 4 Sekunden gedauert, um die Verbindung herzustellen. Danach bleibt die Verbindung bis zum Versuchsschluss stabil. Aus dem rechten Bild kann erkannt werden, dass die Gesamtlatenzzeit durchschnittlich 90 ms beträgt.

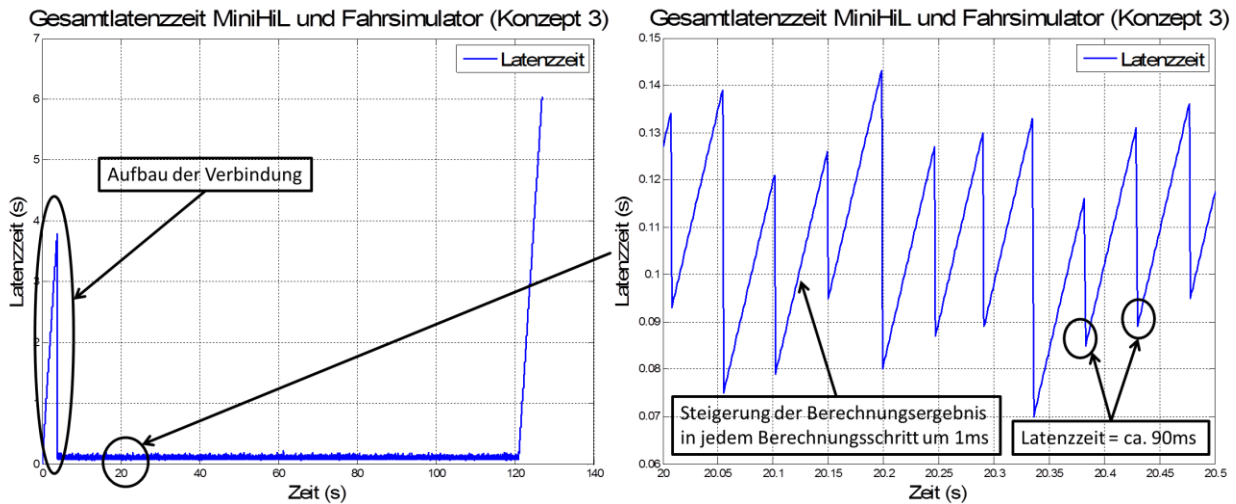


Bild 6-19 Gesamtlatenzzeit Mini-HiL und Fahrsimulator (One Host to multiple Targets)

Die Gesamtlatenzzeit entspricht der Zeit für die Kommunikation zwischen Host-PC und Inmotion Echtzeitsystem, die bei der Untersuchung vom Konzept 1 gemessen wird. Der Datenaustausch findet ca. alle 50 ms statt (Bild 6-20 links). Während dieser 50 ms steigt das Ergebnis der Latenzberechnung ständig (Bild 6-20 links). Bis ein Signal zurückkommt, wird die Latenzzeit aktualisiert (Bild 6-20 rechts). Da die Daten nur einmal pro Programmablauf in MATLAB ausgetauscht werden, wird die

Gesamtlatenzzeit hauptsächlich von der Programmlaufzeit auf dem Host-PC beeinträchtigt.

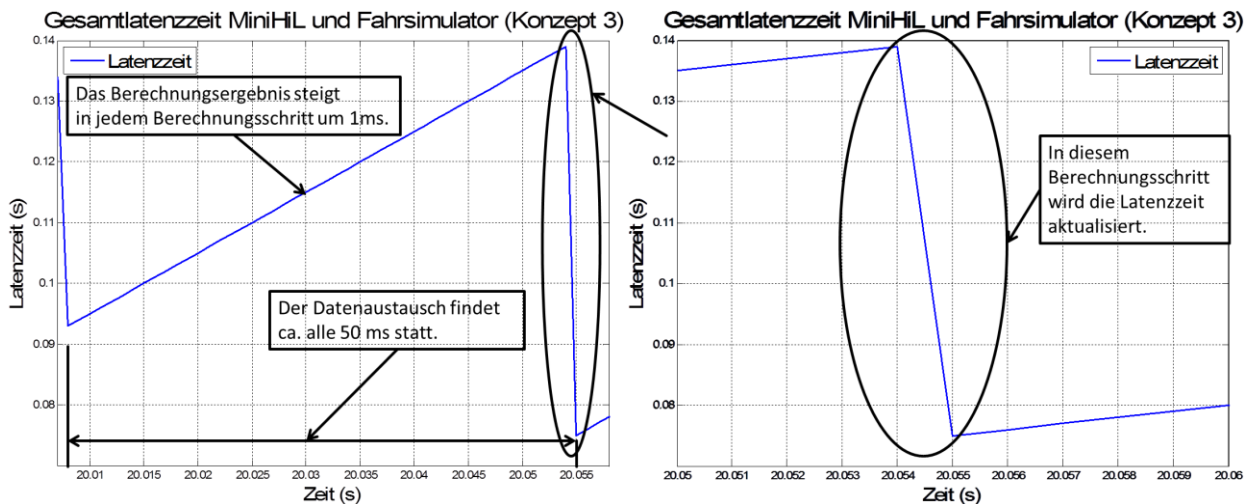


Bild 6-20 Gesamtlatenzzeit Mini-HiL und Fahr Simulator im Detail (One Host to multiple Targets)

6.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde zuerst die Machbarkeit der Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Produktentwicklung mithilfe verteilter Prüfstandssysteme untersucht. Nach dieser Vorstudie lässt sich die Anwendbarkeit des IPEK-XiL-Ansatzes mit verteilten Teilsystemen nachweisen. Auf Basis der ausgeführten Untersuchungen wurden demzufolge drei konkrete Implementierungskonzepte entwickelt. Anschließend wurden die Latenzzeiten anhand der drei Implementierungskonzepte gemessen, um die Auswahl dieser drei Konzepte bei weiteren Anwendungen zu unterstützen. Im Folgenden sollen diese Implementierungskonzepte des IPEK-XiL-Ansatzes in konkreten Anwendungen eingesetzt werden, um die Stärken und Beschränkungen zu identifizieren.

7 Exemplarische Anwendungen

Nach der Untersuchung der Machbarkeit und Implementierungskonzepte vom IPEK-XiL-Ansatz mit verteilten Teilsystemen werden in diesem Kapitel einige exemplarische Anwendungen gezeigt. Der Fokus hierbei liegt auf der optimalen Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung.

7.1 Anwendung innerhalb eines Unternehmensumfeldes

Basierend auf den in Kapitel 5 vorgestellten Untersuchungen wird der IPEK-XiL-Ansatz zunächst eingesetzt, um die Prüfstände an verschiedenen Standorten innerhalb eines Unternehmensumfeldes zu vernetzen und damit deren Funktionalität zu erweitern.

7.1.1 Fahrsimulator und Mini-HiL

Zunächst wird die Vernetzung zwischen dem Mini-HiL und Fahrsimulator auf Basis der im Kapitel 5 beschriebenen Untersuchungen optimiert, damit sich die Funktionen von beiden Prüfständen erweitern lassen. Da das Echtzeitsystem des Fahrsimulators aus Sicherheitsgründen (ohne Berechtigung vom Hersteller) nur durch seinen Host-PC ansprechbar ist, stellt das Konzept 3 bzw. One Host to multiple Targets (im Vergleich zum Konzept 1 ohne Einfluss vom Host-PC des Mini-HiLs) für diesen Anwendungsfall das geeignetste Konzept dar. In diesem Fall wird der Host-PC vom Fahrsimulator als das „One Host“ gleichzeitig mit zwei Echtzeitsystemen verbunden. Die angewendete Architektur der Verbindung zeigt das Bild 6-18. Die folgenden Bilder stellen die zwei Prüfstände während des Testablaufs dar.



Bild 7-1 Prüfstandsvernetzung Mini-HiL (links) und Fahrsimulator (rechts)

Zuerst wird der verkürzte NEFZ ausgeführt. Der Anteil der Toleranzüberschreitung beträgt in diesem Fall 2,29 % des gesamten Fahrzykluses. Im Vergleich zu den vorherigen Untersuchungen ist der Anteil der Überschreitung deutlich niedriger. Der Grund hierfür ist die Verbesserung der Verbindung durch Änderung des

Verbindungskonzepts. Die folgenden vier Diagramme zeigen die Ergebnisse des gesamten Fahrzykluses (Bild 7-2 oben links), Detailabbildungen (Bild 7-2 oben rechts) und den Vergleich der Ergebnisse ohne Vernetzung über die Distanz (Bild 7-2 untere zwei Diagramme). Durch den Vergleich erkennt man, dass es keinen großen Unterschied zwischen den Überschreitungsanteilen bei den zwei Anwendungsfällen gibt. Auch hinsichtlich des Fahrerfühls sind diese zwei Anwendungsfälle nicht auseinanderzuhalten. Dies bedeutet, dass die Vernetzung über die Distanz in diesem Anwendungsfall die Untersuchungsergebnisse kaum beeinträchtigt.

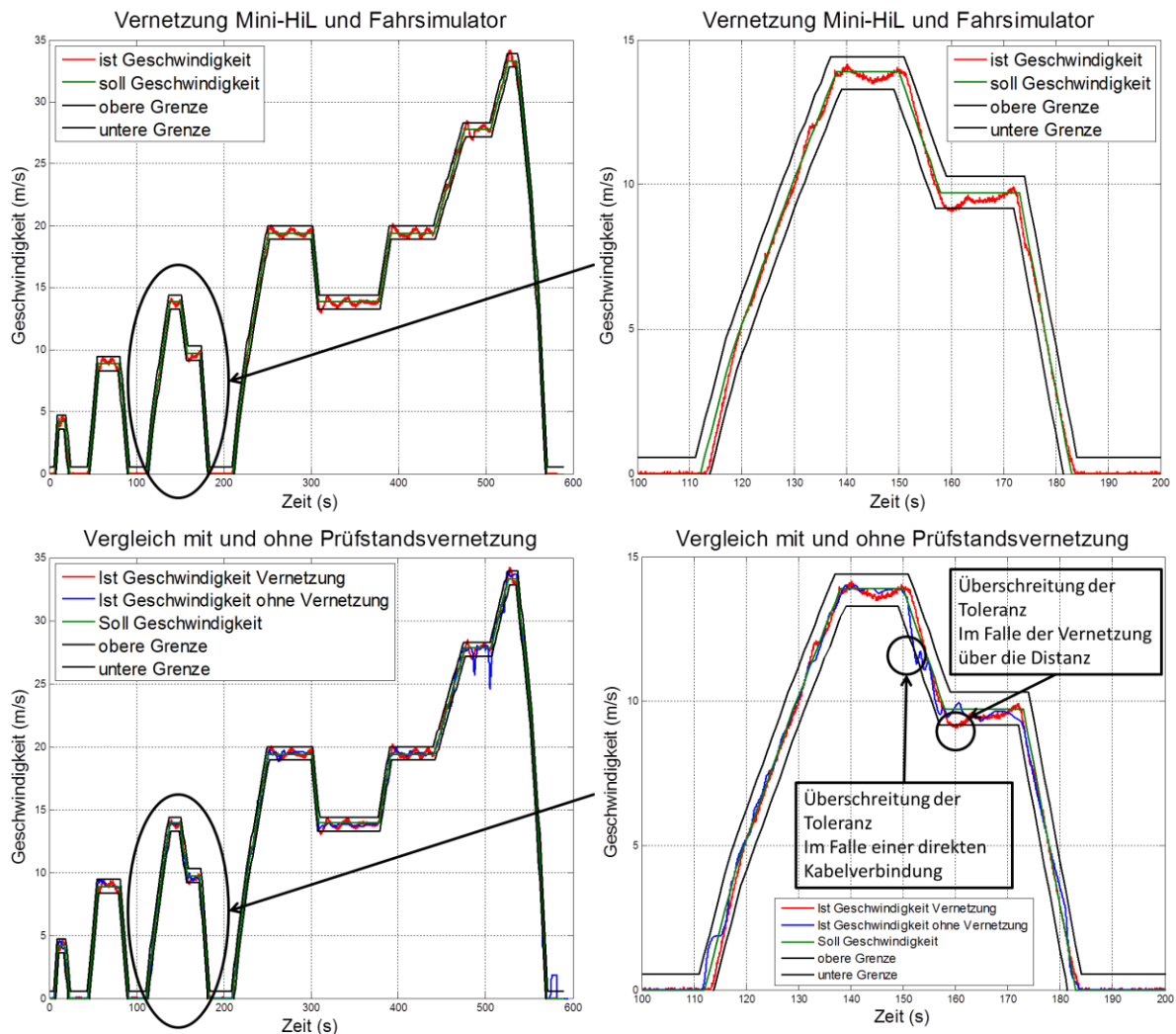


Bild 7-2 Ergebnisse vom gesamten Zyklus (oben links) sowie im Detail (oben rechts) und der Vergleich mit den Ergebnissen ohne Prüfstandsvernetzung (untere zwei Diagramme)

Nachdem der bestimmte Fahrzyklus durchgeführt wird, kommen noch einige virtuelle Verkehrssituationen zum Einsatz, die mittels der AVL Inmotion³⁶⁹ powerd by IPG CarMaker programmiert und für den Fahrer auf dem Monitor bereitgestellt werden. Die erste Verkehrssituation stellt ein Überholvorgang auf der Landstraße dar. Die

³⁶⁹ Quelle: <https://www.avl.com/-/avl-inmotion-real-life-simulation>

zweite Verkehrssituation ist eine Innerortsfahrt mit z.B. Ampel und Fußgängern. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass der Fahrer die beiden Manöver auch erfolgreich durchführen kann (siehe Videos in der beigefügten CD).

7.2 Globale Anwendungen

Außer der Anwendungen innerhalb eines Unternehmensumfeldes kann der IPEK-XiL-Ansatz auch zu den Anwendungen mit größeren Distanzen beitragen. Ein Beispiel dazu stellt der Einsatz vom IPEK-XiL-Ansatz in einem international kooperativen Forschungsprojekt zwischen dem KIT und der Tongji Universität in Shanghai (China) im Rahmen des im Kapitel 2.3.5.2 vorgestellten Projekts „Sino-German Network on Electromobility“ dar. In Bezug auf das Forschungsprojekt sollten zum einen spezifische Entwicklungs- sowie Validierungsmethoden für die Entwicklung von elektrischen Antriebssträngen erarbeitet werden und zum anderen ein Elektromotor anhand der erarbeiteten Entwicklungs- und Validierungsmethode entwickelt, optimiert und validiert werden. Der Elektromotor sollte in China entwickelt und an der Tongji Universität mit einem chinesischen Fahrer und Fahrmanöver sowie am KIT mit deutschem Fahrer und Fahrmanöver hinsichtlich des Energieverbrauches und der Leistung untersucht werden. Allerdings konnte der Motor bzw. dessen physischer Prototyp erst später im Projektablauf hergestellt werden. Der Transport des Motors von China nach Deutschland ist auch sehr zeit- und kostenaufwendig. Außerdem stand an der Tongji Universität zu dem Zeitpunkt kein mit dem Prüfstand integrierter Fahrsimulator zur Verfügung, um den Prüfling unter Steuerung eines physischen Fahrers zu untersuchen. Am IPEK hingegen fehlten die für diese Zielanwendung relevanten Batteriemodelle und Brennstoffzellenmodelle, um die Stromversorgung des Elektromotors bzw. des Antriebsstrangs zu simulieren. Hierzu kann eine Vernetzung verteilter Teilsysteme einen wesentlichen Beitrag liefern: Obwohl der Motor in China bleibt, kann er trotzdem von beiden Seiten durch die Prüfstandsvernetzung untersucht werden. Durch diese Vernetzung lassen sich die Prüfstände und Kompetenzen von beiden Seiten komplementieren. Außerdem können die Entwickler des Motors auch während der Untersuchung dabei sein. Dadurch ist eine rechtzeitige Modifizierung bzw. Optimierung des Motors sowie dessen Steuergeräte während der Untersuchung möglich.

Der Fokus hier liegt im Rahmen dieser Arbeit auf der Implementierung der Prüfstandsvernetzung zwischen der School of Automotive Studies (SAS) an der Tongji Universität und dem IPEK am KIT. Im Folgenden werden zunächst die zum Einsatz kommenden Prüfstände und Prüflinge vorgestellt. Anschließend werden auf Basis der Prüfstände und verfügbarer Hardware die Vernetzungskonzepte analysiert. Zuerst soll die Prüfstandsvernetzung mit virtuellen Modellen getestet werden, um die Randbedingungen (z.B. Zugriff zu dem Prüfstandssystem, Internetlatenzzeit und

Gesamtlatenzzeit, etc.) festzustellen. Darauf basierend, können die geeigneten Implementierungskonzepte identifiziert werden. Anhand dieser Konzepte soll der Fahrsimulator am IPEK mit einem Antriebsstragsprüfstand und einem E-Motor am Tongji-SAS vernetzt und dann in die Gegenrichtung eine Sitzbox in der Tongji-Universität mit dem Mini-HiL am IPEK verbunden werden. Auf Basis dieser Untersuchungen, sowohl mit virtuellen Modellen, als auch mit Prüfständen, sowie physischen Prototypen kann die internationale Prüfstandsvernetzung bezüglich ihrer Machbarkeit sowie Potenziale und Einschränkungen bewertet werden.

7.2.1 Prüfstand und Hardware an der Tongji Universität

In diesem Unterkapitel werden der Elektromotor sowie die verwendeten Prüfstände und Hardware an der Tongji Universität bezüglich ihre Hard- und Softwarestruktur vorgestellt.

Elektromotor

Bevor ein neuer Elektromotor während des Projektlaufs zur Verfügung stand, kam zuerst ein existierender Permanentmagnet-Synchron-Elektromotor zur Untersuchung der Prüfstandsvernetzung zum Einsatz. Dieser Elektromotor wurde als ein zentraler Antriebsmotor für eine Elektrofahrzeuganwendung entwickelt, daher erreicht er im Vergleich zum Radnabenmotor eine höhere Drehzahl (max. Drehzahl 15000 rpm). In folgender Arbeit wird dieser Elektromotor als High-Speed-Elektromotor bezeichnet. Das folgende Diagramm zeigt die Kennlinie des High-Speed-Elektromotors (Bild 7-3). Die rote Linie stellt das Maximaldrehmoment (AB) und die Maximalleistung (BC) dar. Die blaue Linie bildet das Nenndrehmoment (DE) und die Nennleistung (EF). Die Steuerung des Motors erfolgt in zwei Moden (Drehzahlregelung und Drehmomentregelung) über einen CAN-Bus.

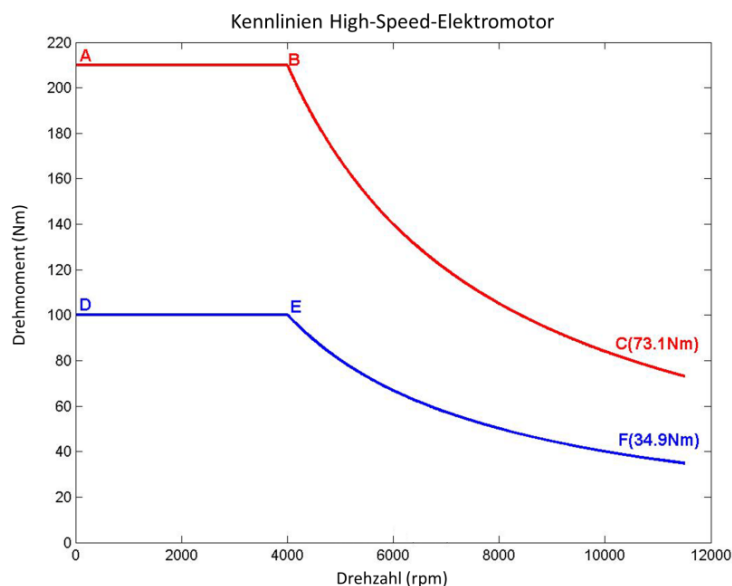


Bild 7-3 Kennlinie des High-Speed-Elektromotors

Vehicle Management System

Das Vehicle Management System (Abkürzung: VMS) ist ein zentrales Steuerungsgerät, welches bestimmte Information von allen spezifischen Steuergeräten im Fahrzeug in Echtzeit erhält und zentral behandelt. In dieser Arbeit wird ein VMS mit MPC555-Prozessor zur Steuerung des E-Motors und Kommunikation mit den Prüfständen eingesetzt. Während der Untersuchung dient das VMS als ein Echtzeitsystem, welches den Signalaustausch mit dem E-Motor sowie mit dem Prüfstand in Echtzeit über CAN-Bus ausführt. Da das VMS die erhaltenen Signale nicht direkt ins Internet senden kann, kommt noch ein Host-PC mit der Software MATLAB zum Einsatz. Der Host-PC dient als Schnittstelle zwischen dem VMS und dem Internet. Die Kommunikation zwischen dem VMS und Host-PC erfolgt ebenfalls über CAN-Bus mittels CANcaseXL. Auch das Regelungsmodell für den E-Motor und die Kommunikationsschnittstelle für den E-Motor sowie die Prüfstandssoftware können zuerst auf dem Host-PC modifiziert und ins VMS kompiliert werden. Außerdem wird ein Watchdog-Modul (siehe Kapitel 2.5.3) ins VMS integriert, welches sowohl den Zustand des E-Motors und des Prüfstands als auch die Verbindung mit dem Remote-Prüfstand in jedem Berechnungsabschnitt überwacht. Wenn zum Beispiel kein neues Signal innerhalb einer bestimmten Zeitdauer vom Remoteprüfstand über das Internet kommt, wird die Verbindung als „unterbrochen“ erkannt. Dementsprechend werden bestimmte Notfallmaßnahmen (z.B. sofortige Abschaltung des Systems) ausgeführt, um mögliche Schäden zu vermeiden.

Hybrid-Powertrain-Prüfstand

Der Hybrid-Powertrain-Prüfstand an der Tongji Universität (Abkürzung: HPP) ist ein neuartiger Antriebsstrangprüfstand der Firma HORIBA³⁷⁰, auf dem nicht nur die konventionellen Antriebsstränge, sondern auch die Hybrid-Antriebsstränge und die rein elektrischen Antriebsstränge, sowohl mit Batterie als auch mit Brennstoffzellen, untersucht werden können. Das folgende Bild stellt die Hard- und Softwarestruktur dieses Prüfstands dar. Die gepunkteten Linien stellen die zusätzliche Hardware und Signalflüsse infolge des Einsatzes vom VMS dar.

³⁷⁰ Quelle: <http://www.horiba.com/>

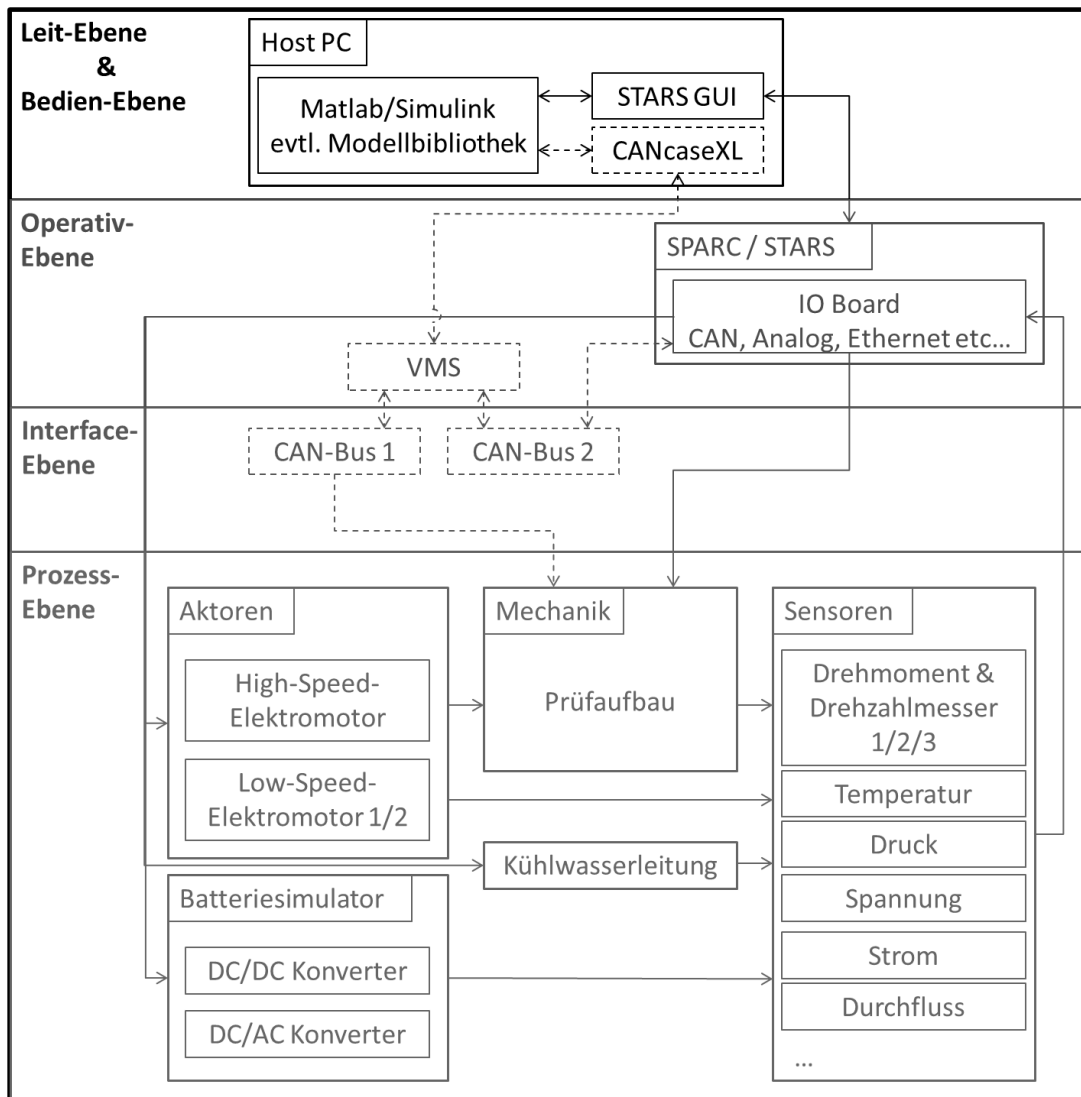


Bild 7-4 Hard- und Softwarestruktur des Hybrid-Powertrain-Prüfstands an der Tongji Universität

Die Prozess-Ebene vom HPP besteht aus drei Elektromotoren, einem Batteriesimulator sowie diverser Messtechnik. Der zentrale Elektromotor (High-Speed-Elektromotor), der eine hohe Drehzahl (15.000 rpm) erreicht und eine sehr kurze Reaktionszeit (1 ms) hat, kann sowohl die Ausgangsgrößen vom Verbrennungsmotor (Drehzahl und Drehmoment) nachbilden, als auch als ein Dynamometer zur Leistungsmessung von Elektromotoren, die untersucht werden, dienen. Die anderen zwei Elektromotoren (Low-Speed-Elektromotor), die ein hohes Drehmoment liefern können, stellen bei den Untersuchungen die passenden Widerstände bezüglich unterschiedlicher Manöver bereit. Darüber hinaus können die Low-Speed-Elektromotoren zur Untersuchung von Radnabenmotoren eingesetzt werden, da in diesem Fall ein hohes Drehmoment gefordert wird. Der Batteriesimulator dient als Stromversorgung für die drei Elektroaktoren und evtl. auch für den Prüfling. Außerdem können die Ausgangsgrößen der Batterie und der

Brennstoffzellen vom Batteriesimulator simuliert werden. Die Messtechnik beinhaltet hauptsächlich die spezifischen Drehmoment- und Drehzahlsensoren für den High-Speed-Elektromotor und die zwei Low-Speed-Elektromotoren. Um verschiedene Validierungsaufgaben zu erledigen, kann zusätzliche Messtechnik (z.B. Temperatur-, Druck- und Durchflusssensor für Kühlwasser, Strom- und Spannungsmesser, etc.) zum Einsatz kommen.

Der Signalaustausch zwischen Prozess-Ebene und Operativ-Ebene erfolgt hauptsächlich über CAN-Bus. Alle Signale lassen sich mithilfe eines im Echtzeitsystem integrierten IO-Boards austauschen.

In der Operativ-Ebene kommt das SPARC³⁷¹ als Echtzeitsystem zum Einsatz. Das SPARC ist eine von der Firma HORIBA entwickelte Controller-Plattform, in der ein Power-Supply-Board, ein CPU-Board, bis zu 3 IO-Boards, ein CAN-Interface-Board und ein Ersatz PC104-Slot integriert werden. Ein wichtiger Vorteil von SPARC ist die reibungslose Integration mit unterschiedlichen Automatisierungssystemen, insbesondere mit dem STARS³⁷² von HORIBA, welches ein integriertes Automatisierung-, Akquisitions- und Steuerungssystem beinhaltet. Die Konfiguration, Parametrisierung und Überwachung der Versuche lassen sich mittels einer Benutzerschnittstelle erleichtern. Bis zu 5 KHz Taktfrequenz ermöglicht eine hoch präzise Regelung sowohl vom Prüfling als auch vom Prüfstand. Außerdem kann der STARS mit der Software MATLAB sehr gut zusammenarbeiten. Die in MATLAB erstellten Modelle können einfach ins STARS integriert werden und während der Versuche in Echtzeit laufen.

In der Bedien-Ebene wird auch ein Host-PC verwendet. Auf dem Host-PC kann der Versuchingenieur mittels der eigenen Benutzerschnittstelle von STARS den Prüfstand bedienen. Darüber hinaus können komplexe Steuerungsmodelle in MATLAB auf dem Host-PC erstellt und modifiziert werden.

Da der Prüfstand neu aufgebaut ist, wird zurzeit in der Leit-Ebene weder die Modellbibliothek, noch die Verbindung mit PDM Software erstellt. Allerdings wird geplant, dass eine Modellbibliothek mit unterschiedlichen Batterie- und Brennstoffzellenmodellen zur Untersuchung elektrischer Antriebsstränge erstellt wird.

Sitzbox

Da die Sitzbox an der Tongji Universität neu entwickelt wurde, stellt dieser im Vergleich zum Fahrsimulator am IPEK eine relativ einfachere Struktur dar (Bild 7-5). Zu der Zeit stand noch keine komplexe Fahrzeug- und Umweltsimulation sowie

³⁷¹ Quelle: HORIBA, Ltd. <http://www.horiba.com/de/automotive-test-systems/products/mechatronic-systems/driveline-test-systems/details/sparc-878/>

³⁷² Quelle: HORIBA, Ltd. <http://www.horiba.com/de/automotive-test-systems/products/test-automation-systems/stars-automation-system/>

Visualisierung zur Verfügung. Das Gaspedal und das Bremspedal werden über einen A/D-Konverter mit einem VMS verbunden, in dem ein Fahrzeugmodell läuft. Die Fahreraktivitäten werden im VMS mit einem Fahrzeugmodell und einer Fahrwiderstandssimulation zusammen berechnet. Die gewünschten Größen (z.B. aktuelle Geschwindigkeit, etc.) können mit der Software MATLAB über CANcaseXL vom VMS ausgelesen und für weitere Anwendungen benutzt werden. Auf einem Monitor, der auf der Sitzbox aufgebaut wird, können die benötigten Signale oder Visualisierung für den Fahrer gezeigt werden. Beispielsweise wird im folgende Bild (Bild 7-5 rechts unten) der Monitor während einer Untersuchung gezeigt. Im diesem Fall wurden die Soll- und Ist-Geschwindigkeit, die Gas- und Bremspedalposition, das aktuelle Video von einem verteilten Prüfstand sowie der Verbindungszustand auf dem Monitor vorgestellt.



Bild 7-5 Sitzbox am Tongji-SAS

7.2.2 Analyse der drei Konzepte

Nachdem alle zum Einsatz kommenden Prüfstände und Hardware von beiden Seiten vorgestellt wurden (IPEK Prüfstände siehe Kapitel 6.1), soll nun ein optimales Konzept für die Vernetzung ausgewählt werden. Auf Basis der Randbedingungen werden im Folgenden die im Kapitel 6.3 erklärten drei Implementierungskonzepte zur Unterstützung der Prüfstandsvernetzung zwischen der Tongji Universität und dem KIT analysiert.

Das erste Konzept „Host to Host“ ist im Prinzip am einfachsten zu implementieren. Bezüglich der verfügbaren Prüfstände und Hardware ist dieses Konzept bei dieser Anwendung auch relativ einfach zu implementieren, weil die Software MATLAB auf beiden Host-PCs zur Verfügung steht und der Signalaustausch zwischen MATLAB und dem Prüfstandssoftware an beiden Seiten möglich ist. Die Signale aus den

Prüfständen sowie den Echtzeitsystemen von beiden Seiten können durch die Software MATLAB und die Internetverbindung ausgetauscht werden. Aus Sicherheitsgründen ist eine Verbindung der Echtzeitsysteme mit dem öffentlichen Internet für diese Anwendung nicht geeignet. Deswegen können die Echtzeitsysteme in der Regel nur mit anderen Systemen, die sich in demselben Lokalnnetzwerk befinden, kommunizieren. In Bezug auf dieses Projekt befinden sich die Echtzeitsysteme in zwei sehr weit getrennten Lokalnnetzwerken und verfügen auch über keine IP-Adresse mit öffentlichem Internetzugang. Daher sind die Konzept 2 und 3 nur sehr schwierig zu implementieren.

7.2.3 Implementierung der Prüfstandsvernetzung

Nachdem das Vernetzungskonzept festgelegt wird, ist nun die Aufgabe das Konzept auf die Prüfstände zu implementieren. Da zurzeit nur wenige Erfahrung im Bereich der Prüfstandsvernetzung über diese große Distanz zur Verfügung steht, kommen zuerst an einem Standort nur virtuelle Modelle zum Einsatz. Danach wird die Prüfstandsvernetzung Schritt für Schritt erweitert, bis diese Vernetzung mit unterschiedlichen Prüfständen und Prüflingen implementiert werden kann.

7.2.3.1 Fahrsimulator-IPEK mit VMS und Fahrzeugmodell Tongji

Beim ersten Versuch der Prüfstandsvernetzung wird an der Tongji Universität nur das VMS eingesetzt. Ein Fahrzeugmodell und ein Fahrwiderstandsmodell werden in MATLAB erstellt und mit den Kommunikationsblöcken zusammen ins VMS kompiliert. Am KIT-IPEK kommt dementsprechend der Fahrsimulator zum Einsatz. Die Gas- und Bremspedalposition werden nach Tongji zum Fahrzeugmodell gesendet. In der Gegenrichtung kommt die aktuelle Geschwindigkeit zurück zum Fahrer. Das folgende Bild illustriert die Hard- und Softwarearchitektur von dieser Untersuchung.

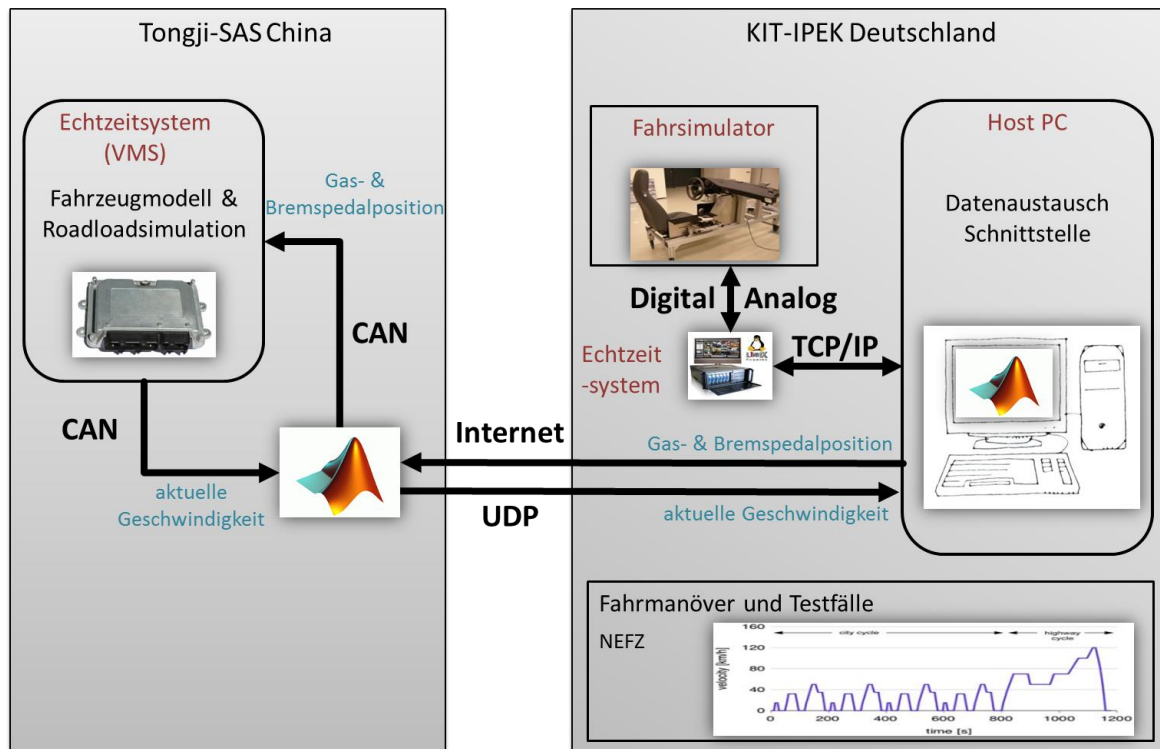


Bild 7-6 Hard- und Softwarearchitektur der Vernetzung vom IPEK-Fahrersimulator und dem Tongji-VMS

Ähnlich wie bei der Vorstudie kommt bei dieser Untersuchung auch der NEFZ zum Einsatz. Die folgenden Diagramme (Bild 7-7 oben links und oben rechts) stellen die Ergebnisse dieser Untersuchung mit den Ergebnissen unter einer direkten Kabelanbindung gegenüber. Wie im Bild gezeigt, weisen die Ergebnisse aus der Vernetzung über die Distanz einen leicht größeren Überschreitungsanteil, als bei den Ergebnissen aus einer IPEK-internen Anwendung mit direkter Kabelanbindung auf. Wenn der Fahrer sich an die Latenzzeit gewöhnt hat, kann die Überschreitung der Toleranz aber verringert werden. In den unteren zwei Bildern werden noch die Fahreraktivitäten hinzugefügt. Wie im Bild (Bild 7-7 unten rechts) dargestellt, hat es von der Gaspedalbestätigung (ca. bei 116,2 s) bis zur Geschwindigkeitsänderung (ca. bei 117,7 s) ca. 1,5 Sekunden gedauert, die nicht nur die Gesamtlatenzzeit, sondern auch die von der Fahrzeugträgheit verursachten Verzögerungen beinhaltet. Die Internetlatenzzeit während der Untersuchungen betrug ca. 300 ms. Die Signalaustauschfrequenz war ca. 5 Hz, die für bestimmte Anwendungen schon ausreichen könnte.

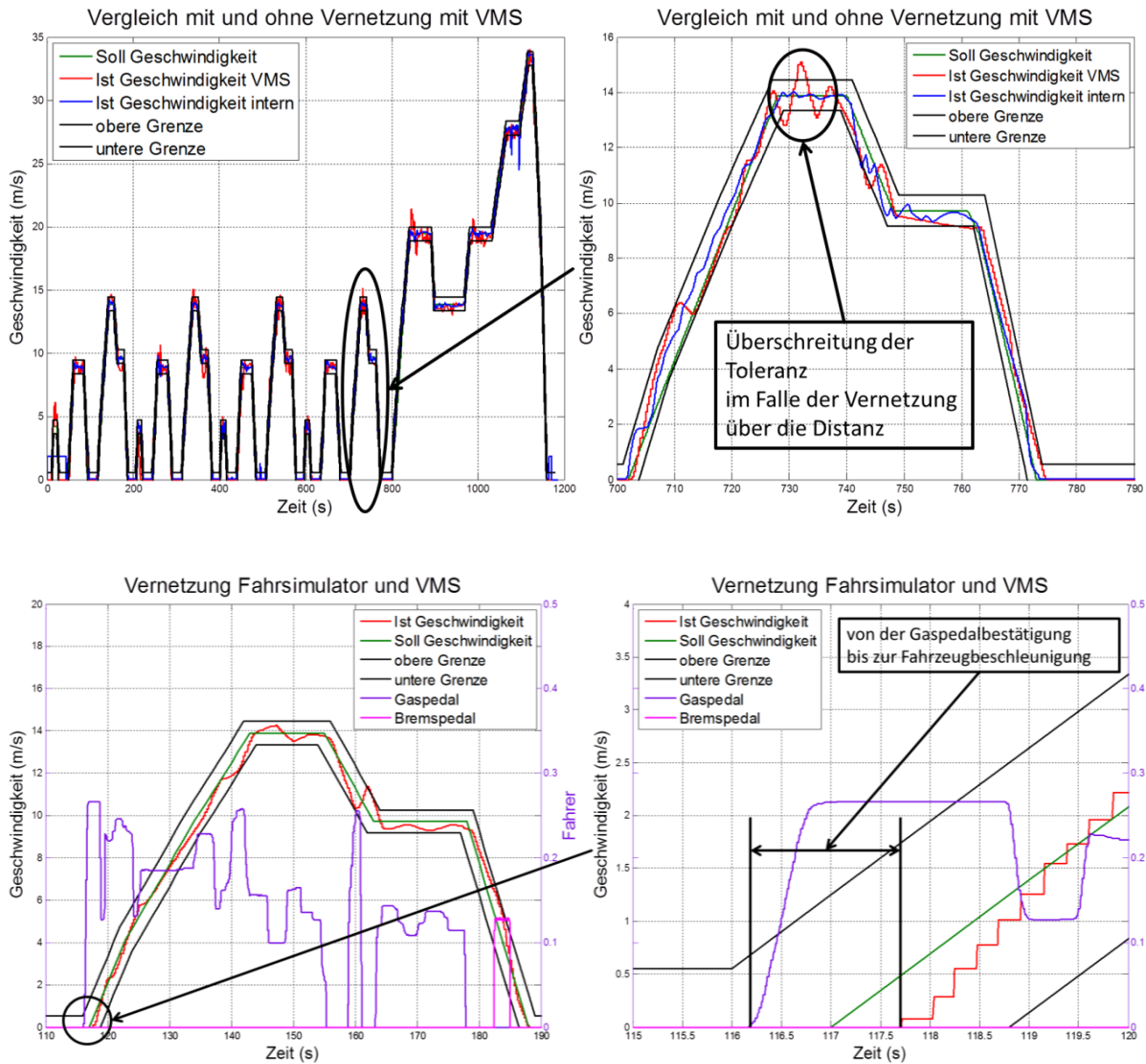


Bild 7-7 Vergleich direkte Kabelanbindung und Vernetzung über die Distanz

7.2.3.2 Fahrsimulator-IPEK mit Motor und Powertrain-Prüfstand Tongji

Basierend auf dem ersten Versuch wird das Vernetzungskonzept nun mit physischen Prototypen am Prüfstand implementiert. Am KIT-IPEK bleibt die Konfiguration wie bei der ersten Untersuchung. An der Tongji Universität kommen zusätzlich zu dem VMS der High-Speed-Elektromotor und der Hybrid-Powertrain-Prüfstand zum Einsatz. Die Hard- und Softwarearchitektur ist in Bild 7-8 dargestellt. Die Gas- und Bremspedalposition werden durch einen Gate-PC mit der Software MATLAB an Tongji-SAS gesendet. Aus der Gaspedalposition wird im VMS die Drehmomentanforderung an den E-Motor berechnet. Die Bremspedalposition wird an den Host-PC, auf dem die Restfahrzeugsimulation und Umweltsimulation laufen, gesendet. Die berechneten Straßenwiderstände und das Bremsdrehmoment werden als Drehmomentanforderung zum Dynamometer gesendet, der die Belastung des E-

Motors darstellt. Die Steuerung des Elektromotors erfolgt über ein eigenes Steuergerät, das die Drehmomentanforderungen von dem VMS über CAN-Bus erhält.

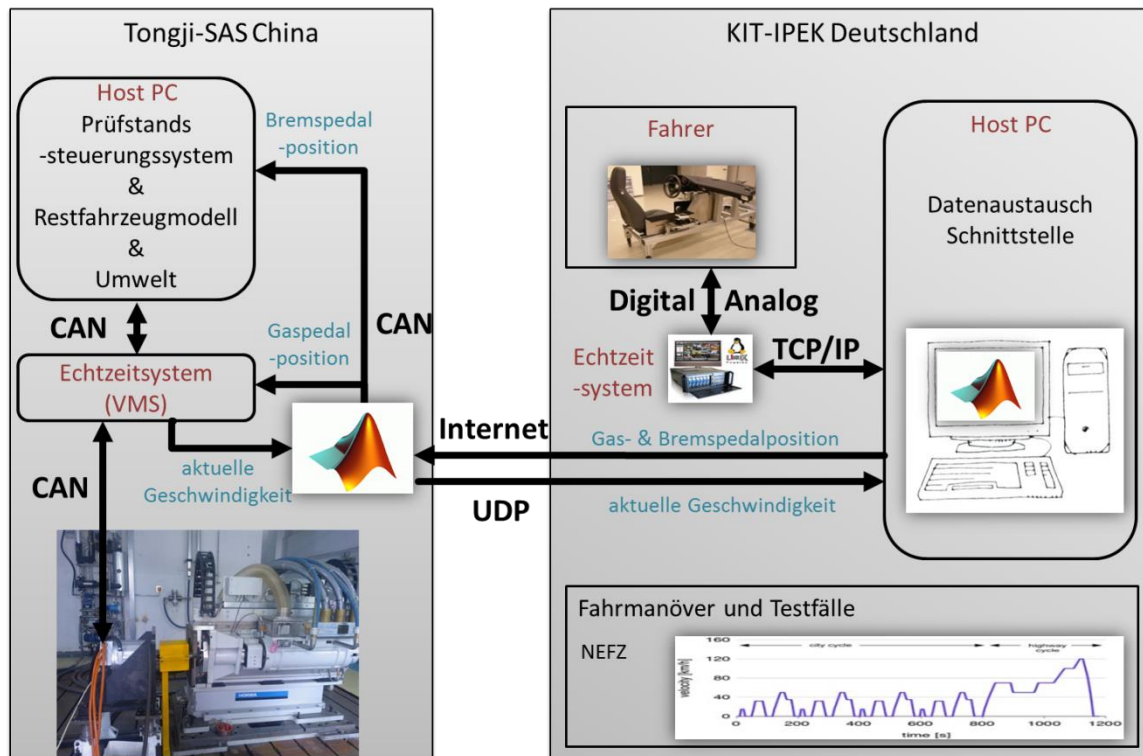


Bild 7-8 Hard- und Softwarearchitektur der Vernetzung vom Fahrersimulator und dem E-Motor

Die folgenden Diagramme stellen die Ergebnisse dieser Untersuchung dar (Bild 7-9, Bild 7-10). Am Anfang brauchte der Fahrer eine gewisse Zeit, um sich an die Gesamtlatenzzeit zu gewöhnen. Danach wurde es geschafft, dass die Ist-Geschwindigkeit innerhalb der erlaubten Toleranz gehalten wurde. Das rechte Bild zeigt die Ergebnisse im Detail. Von der Gaspedalbestätigung (bei 908,9 s) bis zur Beschleunigung des Motors bzw. des virtuellen Fahrzeugmodells (bei 910,9 s) hat es ca. 2 s gedauert. Dies beinhaltet die Zeit für den Datenaustausch und die Reaktionszeit des Motors sowie die Verzögerung wegen der Fahrzeugträgheit. Die Datenaustauschfrequenz stellt ca. 4 Hz dar. Die Ergebnisse werden im Bild 7-10 mit den Ergebnissen aus einer IPEK internen Anwendungen verglichen, bei der die Gesamtlatenzzeit auf 1 ms minimiert und die Frequenz vom Datenaustausch optimiert ist. Die Ergebnisse aus der Prüfstandsvernetzung (IPEK-Tongji) weisen zwar mehr Schwankungen der Ist-Geschwindigkeit bei den Änderungen der Soll-Geschwindigkeit auf, sind aber auch teilweise stabiler bei der konstanten Soll-Geschwindigkeit. Da die Ist-Geschwindigkeit sich in der Toleranz kontrollieren lässt, können weitere Manöver, insbesondere die mit weniger Geschwindigkeitsänderungen unter dieser Vernetzungskonfiguration in Zukunft implementiert werden.

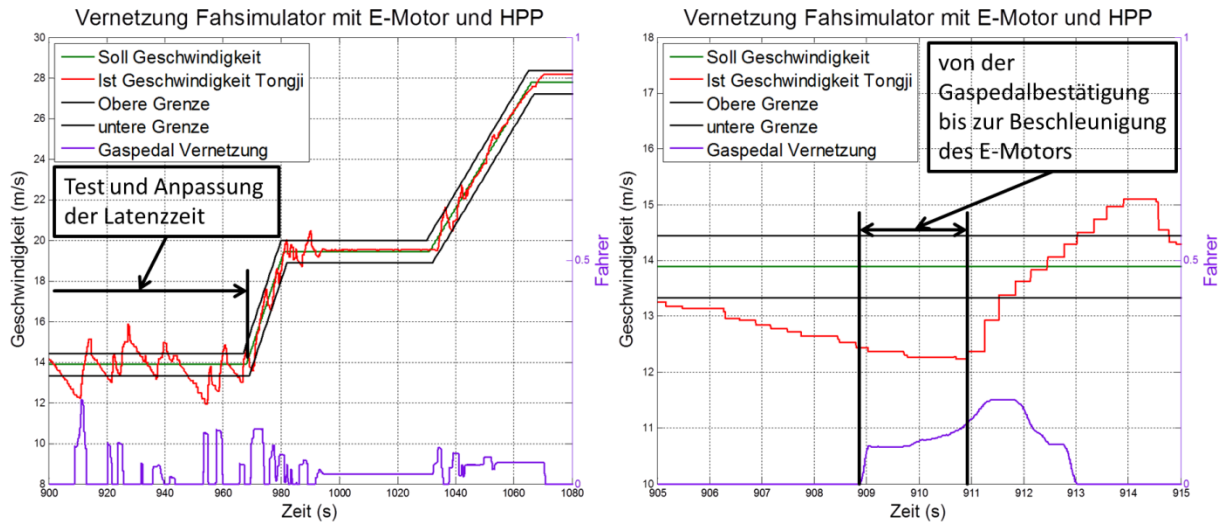


Bild 7-9 Ergebnisse der Vernetzung Fahrsimulator mit E-Motor und HPP

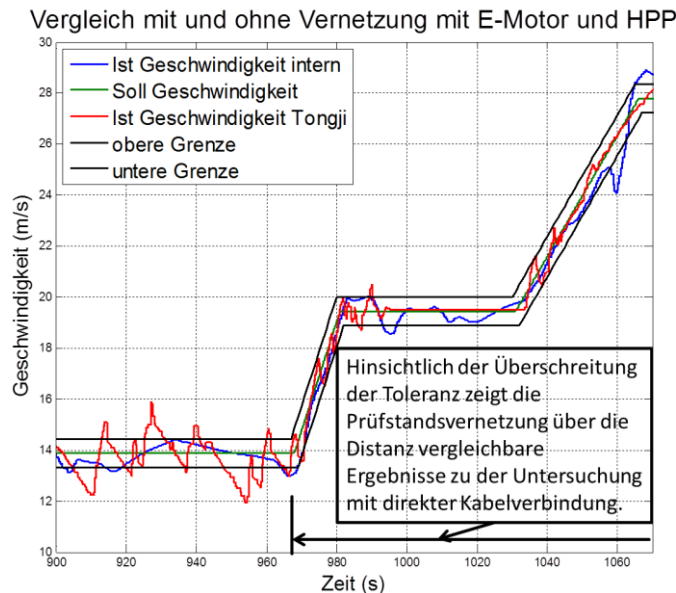


Bild 7-10 Vergleich mit und ohne Vernetzung mit E-Motor und HPP

7.2.3.3 Sitzbox-Tongji mit Mini-HiL-IPEK

Nach demselben Prinzip wird die Prüfstandsvernetzung in die entgegengesetzte Richtung untersucht. In diesem Fall wird die Sitzbox am Tongji-SAS mit dem Mini-HiL am KIT-IPEK gekoppelt. Die Fahreraktivitäten werden von Tongji Sitzbox an den IPEK Mini-HiL gesendet, auf dem das Fahrzeug durch Schwungmasse physisch herunterskaliert simuliert wird und eine Fahrwiderstandssimulation die Straßenwiderstände berechnet. Die aktuelle Geschwindigkeit wird an die Sitzbox zurückgesendet. Die Hard- und Softwarearchitektur ist im folgenden Bild dargestellt.

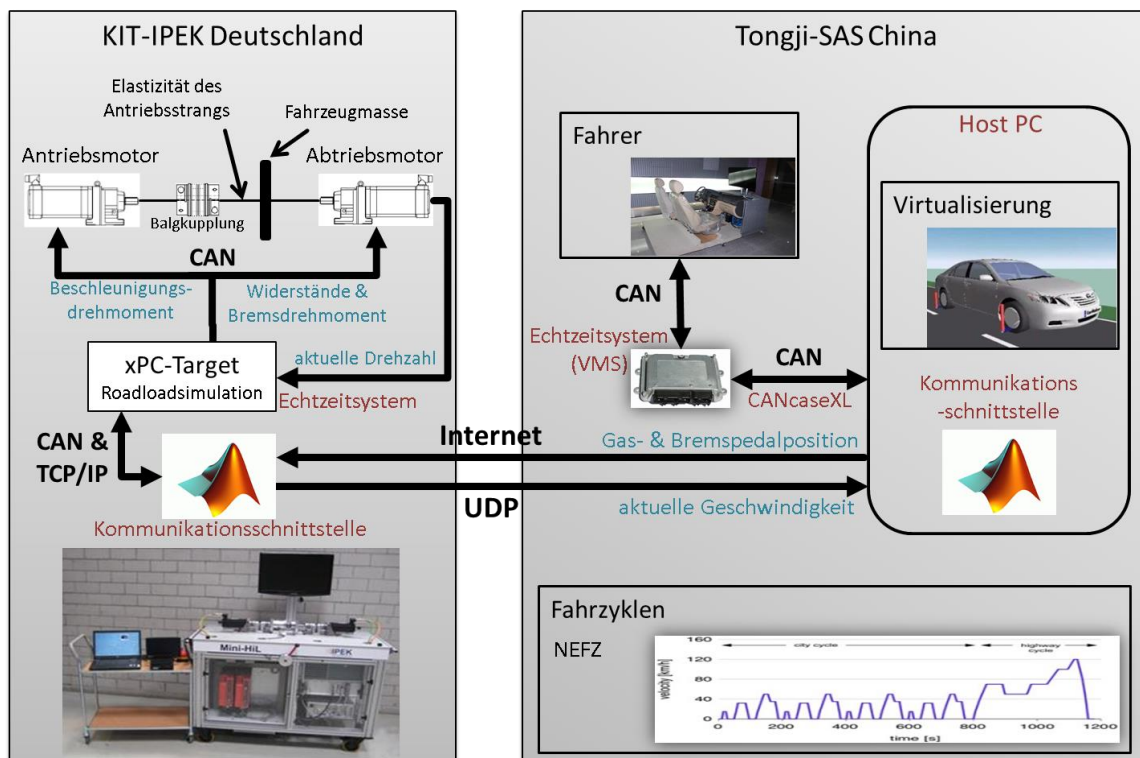


Bild 7-11 Hard- und Softwarearchitektur der Vernetzung Tongji-Sitzbox und IPEK-Mini-HiL

Die folgenden zwei Diagramme stellen die Ergebnisse dieser Untersuchung dar. Auf dem rechten Diagramm werden die Soll- und Ist-Geschwindigkeit gezeigt. Das Simulink-Modell, welches als Kommunikationsschnittstelle an Tongji-SAS dient, kann aufgrund der Eigenschaften des Rechners bis zu einer Frequenz von 2 Hz laufen. Daher findet der Datenaustausch zwischen zwei Standorten mit einer Frequenz von 2 Hz statt, dies bedeutet, dass die dem Fahrer gezeigte aktuelle Geschwindigkeit alle 500 ms aktualisiert wird. Das rechte Diagramm stellt die Ergebnisse dieser Untersuchung mit den Ergebnissen aus einer IPEK internen Anwendung mit direkter Kabelanbindung gegenüber. Im Vergleich dazu weisen die Ergebnisse dieser Untersuchung einen größeren Überschreitungsanteil auf, dafür stellt die ca. 300 ms Internetlatenzzeit bzw. ca. 800 ms Gesamtlatenzzeit (plus 500 ms Signalaustauschzeit) einen Hauptgrund dar. Allerdings kann dieser negative Effekt durch Einsatz eines vorausschauenden Reglers kompensiert werden, um bestimmte Fahrzyklen durchzuführen.

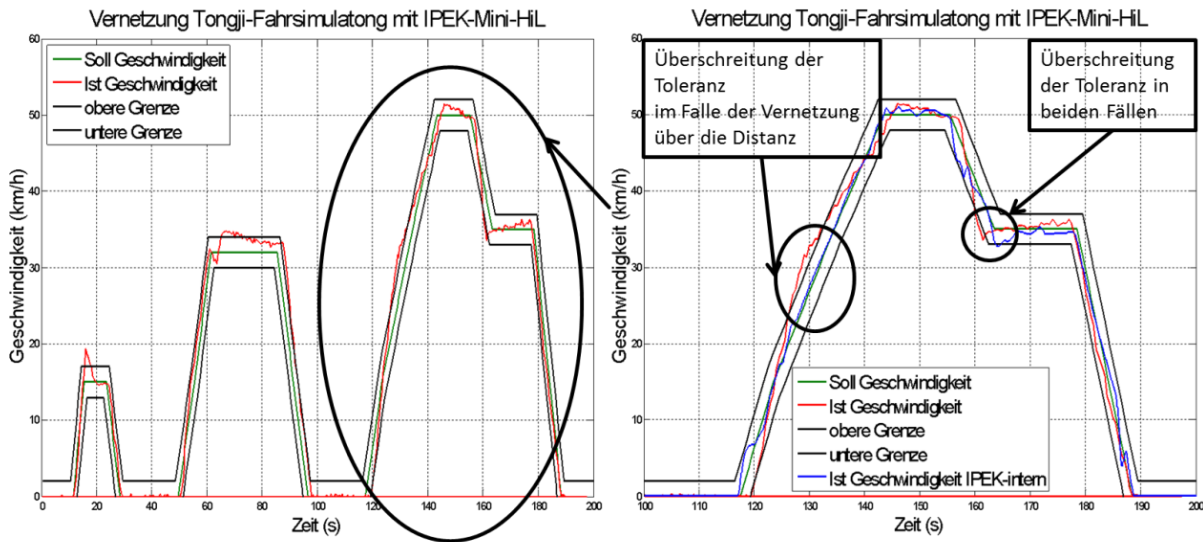


Bild 7-12 Vernetzung Tongji-Sitzbox und IPEK-Mini-HiL

7.3 Bewertung der Ergebnisse und Zusammenfassung

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen erkennt man, dass die Prüfstandsvernetzung bei bestimmten Fahrmanövern (z.B. NEFZ und Überholmanöver) innerhalb eines Unternehmensumfeldes (minimale Internetlatenzzeit) vergleichbare Ergebnisse zu der Untersuchung an einem Standort mit direkten Kabelanbindungen aufweist. Dies zeigt das große Potenzial des IPEK-XiL-Ansatzes in den Anwendungen mit verteilten Teilsystemen. Beispielsweise zeigt der Überschreitungsanteil bei der Prüfstandsvernetzung innerhalb eines Unternehmensumfeldes im Fahrzyklus NEFZ keinen signifikanten Unterschied zu den Ergebnissen der Untersuchung an einem Standort. Bei den global verteilten Anwendungen hilft der IPEK-XiL-Ansatz, die verteilten Teilsysteme gemeinsam unter Berücksichtigung ihrer Wechselwirkungen zu validieren. Dadurch lassen sich die Kosten und eventuell auftauchende Probleme für den internationalen Transport von SiD bzw. auch anderen Bestandteilen des IPEK-XiL-Frameworks vermeiden. Allerdings werden sowohl die Gesamtlatenzzeit als auch die Datenaustauschfrequenz von der großen Internetlatenzzeit beeinträchtigt. Viele Validierungsaufgaben lassen sich unter diesen Bedingungen nicht mehr sinnvoll erledigen. Daher wird die Implementierung vom IPEK-XiL-Ansatz bei Anwendungen mit großer Latenzzeit eingeschränkt. In folgender Arbeit soll analysiert werden, wann eine Prüfstandsvernetzung dennoch sinnvoll zum Einsatz kommen kann.

8 Einsatzpotential und Handlungsleitfaden

Das vorangegangene Kapitel wird die Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in verschiedenen Anwendungsbeispielen vorgestellt. Durch diese Anwendungsbeispiele lässt sich zeigen, dass der IPEK-XiL-Ansatz durch Vernetzen verteilter Teilsysteme auch zur verteilten Entwicklung und Validierung beitragen kann. Nun soll der IPEK-XiL-Ansatz mit verteilten Teilsystemen in die Entwicklungsprozesse von Antriebssträngen integriert werden. Dafür wird ein Handlungsleitfaden erstellt, anhand dessen kann die Implementierung vom IPEK-XiL-Ansatz bzw. das Vernetzen verteilter Teilsysteme für den jeweiligen Anwendungsfall abgeleitet werden. Im Folgenden wird zuerst diskutiert, wann eine Vernetzung verteilter Teilsysteme sinnvoll realisiert werden kann. Anschließend werden die drei Implementierungskonzepte bezüglich jeweiliger Stärken und Eingrenzungen voneinander abgegrenzt, um die Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in verschiedenen Entwicklungsumgebungen zu unterstützen.

8.1 Entscheidung für die Vernetzung verteilter Teilsysteme

Durch das Vernetzen verteilter Teilsysteme lässt sich der Einsatzbereich des IPEK-XiL-Ansatzes in der Antriebsstrangentwicklung erweitern. Dafür ist die Unterstützung bei der Entscheidung notwendig, wann eine Vernetzung verteilter Teilsysteme zielführend einsetzbar ist. Dies muss allerdings für jedes Validierungsziel und damit jede Validierungsaktivität getrennt bewertet werden. Hierbei spielen die folgenden drei Faktoren eine entscheidende Rolle:

- Notwendigkeit der Berücksichtigung systemischer Wechselwirkung
- Aufwand der Systemzusammenführung an einem Ort
- Aufwand zur Implementierung der Vernetzung verteilter Teilsysteme

In diesem Unterkapitel werden diese drei Punkte bzgl. ihrer Einflussfaktoren analysiert, wodurch die Entscheidung für die Vernetzung verteilter Teilsysteme in verschiedenen Anwendungsfällen konkret unterstützt wird.

Notwendigkeit der Berücksichtigung systemischer Wechselwirkung

Basierend auf dem IPEK-XiL-Ansatz spielt die Wechselwirkung zwischen allen Bestandteilen eine wichtige Rolle. Je nach Validierungszielen und –anforderungen kann eine isolierte Komponentenerprobung allerdings ebenfalls zielführend sein. In diesen Fällen lassen sich die nicht physisch vorhandenen (Teil-)Systeme entweder durch virtuelle Modelle oder sogar durch eine numerische Tabelle als Eingangsgrößen beschreiben.

Bei der Berücksichtigung systemischer Wechselwirkungen, insbesondere der Wechselwirkung zwischen Prüfstandsteilsystemen, stellt die durch Signalübertragung und Reaktionszeit des Aktuators verursachte Latenzzeit einen wesentlichen Einflussfaktor dar. Am IPEK wurde eine Untersuchung auf einem Antriebsstrangprüfstand durchgeführt, um die durchschnittliche Systemlatenzzeit zu bestimmen. Aus dieser Untersuchung variiert die Systemlatenzzeit von 8 μs bis 134 μs ³⁷³, die bei einer Untersuchung auf dem Prüfstand nicht zu vermeiden ist. Daher sollte die Systemlatenzzeit zuerst in abhängig von vorliegenden Validierungsanforderungen ermittelt werden, bevor einer Untersuchung auf dem Prüfstandssystem implementiert wird. Im Falle der Vernetzung verteilter Teilsysteme muss zusätzlich die Internetlatenzzeit bzw. die Bearbeitungszeit in den Kommunikationsschnittstellen mitgerechnet werden.

Aufwand der Systemzusammenführung an einem Ort

Für einen Einsatz des IPEK-XiL-Ansatzes an einem Standort ist es erforderlich, alle Bestandteile an dem Standort, an dem geeignete Prüfstände und Kompetenzen vorhanden sind, zusammenzuführen. Im Falle der verteilten Entwicklung kann es sehr kosten- und zeitaufwendig sein. Beispielsweise könnte im Rahmen des kooperativen Projekts zwischen dem KIT und der Tongji-Universität der Transport eines E-Motors per Schiff von China nach Deutschland über einen Monat dauern. Des Weiteren kommen noch Aufwände für die Reise (evtl. noch Visumbeantragung) und den Aufenthalt in Deutschland der chinesischen Entwickler dazu. Außerdem ist der Aufwand der Systemzusammenführung von der Geheimhaltung abhängig, da ein Austausch von neu entwickelten Prototypen oft kritisch ist.

Aufwand zur Implementierung der Vernetzung von verteilten Teilsystemen

Um eine Vernetzung verteilter Teilsystemen zu implementieren muss vor allem die Verbindungsqualität beurteilt werden, da viele Validierungsziele bei hoher Latenzzeit oder niedriger Datenaustauschfrequenz nicht zu erreichen sind. Ein weiterer wesentlicher Faktor bei dem Einsatz des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung ist die Fähigkeit zur Implementierung der Kommunikation zwischen verschiedenen Prüfständen an allen beteiligten Standorten. Dafür ist evtl. auch neue Hardware (z.B. VPN-fähiger Router, PC mit hoher Berechnungsleistung als Gate-Computer) erforderlich.

Zusammenfassend stellt das Bild 8-1 den Zusammenhang zwischen den drei oben genannten Faktoren dar. Der dargestellte Quadrant wird in 3 Bereiche aufgeteilt. Der erste Bereich zeichnet sich durch eine geringe Notwendigkeit der Berücksichtigung von systemischer Wechselwirkung aus. Hierbei kann eine getrennte „Komponenten-

³⁷³ Albers et al. 2014c

Erprobung“ an einem Ort durchgeführt werden. Der zweite Bereich zeichnet sich durch die hohe Notwendigkeit der Berücksichtigung von systemischer Wechselwirkung aus. In diesem Fall sind detaillierte virtuelle Modelle bzw. physische Prototypen als restliche Bestandteile des IPEK-XiL-Frameworks erforderlich, damit die Wechselwirkungen möglichst genau betrachtet werden können. Der Aufwand, alle notwendigen Systemmodelle an einem Ort zusammenzuführen (hierbei sind Transportkosten, jedoch vor allem der Zeitaufwand relevant), ist allerdings nur gering bis mäßig. Dadurch kann die systemische Validierung auch an einem Ort durchgeführt werden. Wenn dieser Aufwand steigt, verschieben sich die Validierungsaktivitäten in den dritten Bereich, in dem der Aufwand zur Implementierung einer Vernetzung verteilter Teilsysteme niedriger ist. Eine andere Grenzlinie, die diesen Bereich abgrenzt, wird als „Cost-Benefit-Grenze“ bezeichnet. Diese beschreibt jeweils das Maximum an Aufwand, welches für eine Realisierung der systemischen Wechselwirkungen in Kauf genommen wird. Oberhalb dieser Grenze wird auf die systemische Validierung verzichtet und eine „isolierte“ Komponentenerprobung durchgeführt³⁷⁴.

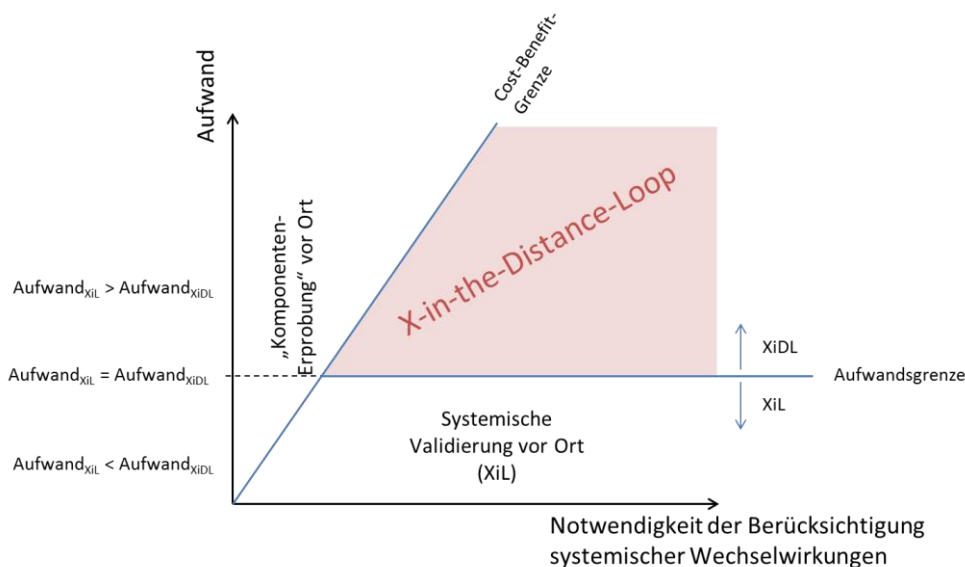


Bild 8-1 Entscheidung der Vernetzung verteilter Teilsysteme³⁷⁵

Zusätzlich zu der Positionierung in oben aufgeführter Grafik können weitere Faktoren dazu führen, dass eine Validierung durch Vernetzung der verteilten Teilsysteme sinnvoll wird. Hierunter fallen eventuell vorhandene Restriktionen bezüglich der Geheimhaltung, wodurch physische oder auch virtuelle Modelle nicht ausgetauscht

³⁷⁴ Abschlussbericht Forschungsprojekt MAP IDEA vom BMBF gefördert; „Sino-German Network on Electromobility“; Förderkennzeichen: 16N11932

³⁷⁵ Abschlussbericht Forschungsprojekt MAP IDEA vom BMBF gefördert; „Sino-German Network on Electromobility“; Förderkennzeichen: 16N11932

werden können. Dadurch tritt der Fall ein, dass die Berücksichtigung der Wechselwirkungen nur anhand einer Kopplung über die Distanz erfolgen kann. Im Gegensatz dazu kann allerdings die oben beschriebene Latenzzeit dazu führen, dass das Validierungsziel nicht erreicht werden kann. Dies kann wiederum dazu führen, dass trotz großen Aufwands die Systemzusammenführung aller Bestandteile von IPEK-XiL-Ansatz an einem Standort notwendig ist³⁷⁶.

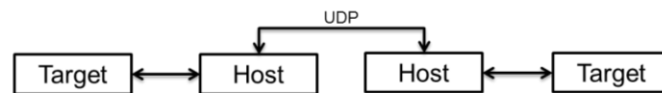
8.2 Handlungsleitfaden des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Antriebsstrangentwicklung

Dieser Handlungsleitfaden soll zu der Entscheidung beitragen, welches Implementierungskonzept zielführend zum Einsatz kommt. Zunächst werden die Stärken und Beschränkungen der drei Implementierungskonzepte identifiziert. Anschließend kann auf Basis der Validierungsanforderungen und -randbedingungen entschieden werden, welches Konzept am sinnvollsten zu implementieren ist.

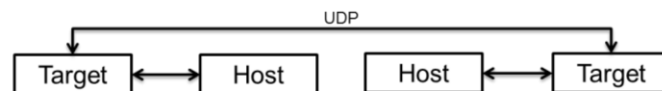
8.2.1 Differenzierung der drei Konzepte

Die drei in Kapitel 6.3 beschriebenen Implementierungskonzepte sind in Bild 8-2 vereinfacht dargestellt. Im Folgenden werden die drei Konzepte bzgl. ihre Stärken und Beschränkungen voneinander differenziert.

1. Host to Host



2. Target to Target



3. One Host to multiple Targets



Bild 8-2 Drei Implementierungskonzepte des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung

Konzept 1: Host to Host

Bei diesem Konzept muss einerseits die Kommunikation zwischen verteilten Host-PCs hergestellt und andererseits der Zugriff der Kommunikationssoftware auf die Daten der Prüfstände realisiert werden. Die Prüfstandssoftwares haben meistens integrierte Schnittstellen zur Software MATLAB, die auch zur online

³⁷⁶ Abschlussbericht Forschungsprojekt MAP IDEA vom BMBF gefördert; „Sino-German Network on Electromobility“; Förderkennzeichen: 16N11932

Datenübertragung verwendet werden kann. Deswegen ist dieses Konzept im Prinzip einfach zu implementieren. Meistens wird keine zusätzliche Hard- und Software sowie wenig Programmierungsaufwand benötigt. Eventuell benötigt der Host-PC eine zusätzliche Netzwerkkarte, um die Kommunikation mit dem Target und die Kommunikation mit dem anderen Host-PC zu trennen. Die theoretisch erreichbare Latenzzeit besteht aus der benötigten Zeit zwischen Kommunikationssoftware und Prüfstandsoftware, Datenverarbeitungszeit in beiden Host-PCs und der Internetlatenz. Da die Datenverarbeitungszeit der Host-PCs variabel ist, können die gesamte Latenzzeit und Datenübertragungsfrequenz nicht stabil bleiben. Die Schwankung der gesamten Latenzzeit kann mehr als 100 ms betragen.

Konzept 2: Target (Echtzeitsystem) to Target (Echtzeitsystem)

Da die Datenverarbeitungszeit der Targets immer in einem bestimmten Zeitintervall garantiert wird, ermöglicht dieses Konzept grundsätzlich die schnellste und stabilste Verbindung. Allerdings müssen die Kommunikationsschnittstellen für die online-Datenübertragung zusätzlich programmiert und für das Target kompiliert werden, weil viele Targets nur über die Schnittstelle zur eigenen Prüfstandsoftware verfügen. Während der Kopplung über das Internet darf die lokale Kommunikation mit dem Host-PC nicht unterbrochen werden, da ansonsten kein Zugriff auf den lokalen Host-PC zur Verfügung stehen würde. Deswegen benötigen alle beteiligten Targets jeweils eine zweite Netzwerkkarte. Die theoretisch erreichbare Latenzzeit setzt sich aus der Internetlatenz und der Verarbeitungszeit in den Targets zusammen.

Konzept 3: One Host to multiple Targets

In diesem Fall existiert nur ein Host-PC, der die Steuerung mehrerer Targets übernimmt. Somit werden die Kosten (Hardware und Softwarelizenz) für mehrere Host-PCs gespart. Alle beteiligten Targets müssen den Zugriff für den zentralen Host-PC freigeben. In vielen Fällen werden lokale Host-PCs trotzdem benötigt, um den Prüfstand lokal zu überwachen und bei Notfällen auch lokal zu steuern. Die Kommunikation zwischen den Targets findet innerhalb des zentralen Host-PCs statt. Daher muss der Datenaustausch zwischen unterschiedlichen spezifischen Prüfstandsoftwares im Host-PC realisiert werden. Ähnlich wie bei Konzept 2 sind mehrere Netzwerkkarten im Host-PC oder zumindest ein leistungsfähiger Router für die individuelle Kommunikation mit jedem Target notwendig. Die theoretisch erreichbare Gesamtlatenzzeit besteht aus der Summe der Kommunikationszeiten zwischen Host-PC und allen Targets sowie der Verarbeitungszeit im Host-PC. Wegen der Beteiligung des Host-PCs kann die Latenzzeit und Datenübertragungsfrequenz auch schwanken (im Fall Mini-HiL: 3-200 ms). Jedoch ist das Konzept in diesem Fall besser als Konzept 1, da hier nur ein Host-PC zum Einsatz kommt.

In Tabelle 8-1 werden die Stärken und Beschränkungen jedes Konzepts zusammengefasst. Allgemein kann festgestellt werden, dass Konzept 1 für unternehmensübergreifende Anwendungen besser geeignet ist, Konzept 3 eher für unternehmensinterne Anwendungen geeignet ist und Konzept 2 für beide Fälle geeignet ist. Allerdings spielen die Validierungsanforderungen und –randbedingungen bei der Auswahl eine wichtige Rolle.

Tabelle 8-1 Stärken und Beschränkungen jedes Konzepts

	Stärken	Beschränkungen
Konzept 1 Host to Host	<ul style="list-style-type: none"> • Einfach zu implementieren 	<ul style="list-style-type: none"> • Zusätzliche Kommunikationssoftware notwendig (MATLAB, etc.) • Datenübertragungsfrequenz und Latenzzeit nicht stabil
Konzept 2 Target to Target	<ul style="list-style-type: none"> • Am schnellsten und stabilsten 	<ul style="list-style-type: none"> • Programmierung und Kompilieren der Kommunikationsschnittstelle • Zweite Netzwerkkarte für jedes Target notwendig
Konzept 3 One Host to multiple Targets	<ul style="list-style-type: none"> • Zentrale Steuerung aller Prüfstände • Kosten für mehrere Host-PCs nicht mehr unbedingt notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> • Alle beteiligte Targets müssen Zugriff am zentralen Host-PC freigeben • Mehrere Netzwerkkarten am Host-PC notwendig • Datenübertragungsfrequenz und Latenzzeit nicht stabil

8.2.2 Validierungsanforderungen und –randbedingungen

Die Anforderungen, die sich aus den Validierungsaufgaben ergeben, lassen sich hauptsächlich in Form der Gesamtlatenzzeit, Frequenz und Stabilität der Datenübertragung sowie des Implementierungsaufwands bestimmen. Höhere Anforderungen an die Datenübertragung können nur mit Konzept 2 erfüllt werden. Wenn eine Fluktuation der Latenzzeit und Frequenz akzeptierbar ist, sind alle 3 Konzepte für die Anwendung einsetzbar. Das Konzept 1 erfordert einen relativ geringen Aufwand zur Implementierung.

Die Randbedingungen können in Anlehnung an das Merkmalsystem (siehe Kapitel 2.2.2.3) bestimmt werden. Der ursprüngliche Gedanke des Merkmalsystems ist, den individuellen Verteilungszustand jedes Entwicklungsprozesses mit verschiedenen Merkmalen detailliert zu beschreiben und somit die typischen Problemstellungen frühzeitig zu ermitteln. Basierend auf diesem Gedanke können die Randbedingungen einer verteilten Validierung ebenfalls durch einige Merkmale identifiziert werden, um die Auswahl eines geeigneten Konzepts zu unterstützen. Hier spielen vier Merkmale

die wichtigsten Rollen: Internetlatenzzeit, Informationszugriff, Kompetenz und Hardware.

Die Internetlatenzzeit spielt eine entscheidende Rolle bei der vernetzten Validierung. Vor der Entscheidung, ob eine vernetzte Validierung bzw. welche Implementierungskonzepte zum Einsatz kommen, soll die Internetlatenzzeit ermittelt werden. Zur Untersuchung der Internetlatenzzeit ist an jedem Standort ein echtzeitfähiger Rechner, in dem ein Modell für den Empfang und das Verschicken des Zeitsignals mit einer hohen Frequenz (mindesten 1.000 Hz) läuft, notwendig. Die Zeitdauer vom Verschicken eines Zeitsignals bis zum Empfang desselben Zeitsignals entspricht der Internetlatenzzeit. Im Falle einer öffentlichen Internetumgebung spielt noch der Internettraffic eine wichtige Rolle. Durch Verwendung von reservierten Internetverbindungen lässt sich der Einfluss des Internettraffic und der Internetlatenzzeit minimieren.

Der Informationszugriff beschreibt den Zugriff auf den Remote Host-PC oder Target. Zum Beispiel ist für das Konzept 3 der Zugriff vom zentralen Host-PC auf verteilte Targets unbedingt notwendig. Das Konzept 1 erfordert hingegen meistens keinen besonderen Zugriff.

Kompetenz stellt die Implementierungsfähigkeit dar. Beispielsweise muss für das Konzept 2 die Kommunikationsschnittstelle programmiert und für das Target kompiliert werden. Um das Konzept 3 zu implementieren, muss die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Softwares im Host-PC hergestellt werden. Im Falle von Konzept 1 muss die Kommunikationssoftware mit der Prüfstandsoftware gekoppelt werden.

Das Hardware-Merkmal bedeutet hier die Leistung der verfügbaren Hardware. Für das Konzept 1 benötigen die beiden Host-PCs eine zweite Netzwerkkarte oder einen leistungsfähigen Router für die zusätzliche Online-Kommunikation. Bei Konzept 2 ist die zweite Netzwerkkarte für die Targets unbedingt notwendig. Aus Sicherheitsgründen können bei Konzept 3 auch zusätzliche Netzwerkkarten für jedes Target erforderlich sein. Des Weiteren lässt sich die Gesamtlatenzzeit von der Signalbearbeitungszeit in der Hardware stark beeinflussen. Daher soll die Signalbearbeitungsfrequenz der eingesetzten Hardware höher als die je nach Anwendungen angeforderte Signalaustauschfrequenz liegen.

8.2.3 Zwischenfazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei der Auswahl der 3 Konzepte nicht nur ihre Stärken und Beschränkungen sondern auch die Validierungsanforderungen und -randbedingungen gemeinsam in Betracht gezogen werden müssen. Zunächst können je nach Validierungsanforderungen die möglichen

Konzepte identifiziert werden. Weiterhin sollte unter Berücksichtigung der Randbedingungen die schnellste und stabilste Kopplungsart ausgewählt werden.

8.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein Handlungsleitfaden für die Anwendung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Antriebsstrangentwicklung vorgestellt. Anhand dieses Handlungsleitfadens kann die Anwendung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Antriebsstrangentwicklung in zwei Schritte unterteilt werden. Im ersten Schritt sollen die Entwicklungsrandbedingungen festgestellt werden. Je nach Notwendigkeit und Aufwand lässt sich entscheiden, ob eine Vernetzung verteilter Teilsysteme sinnvoll zum Einsatz kommen könnte. Anschließend kann das am besten geeignete Implementierungskonzept nach verfügbaren Ressourcen (Internetlatenzzeit, Informationszugriff, Kompetenz und Hardware) ausgewählt werden, falls eine Vernetzung der verteilten Teilsysteme eingesetzt werden soll.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick für weitere Forschung am IPEK-XiL-Ansatz in der verteilten Fahrzeugentwicklung und dessen Anwendung gegeben.

9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung untersucht, um die Validierung verteilter Teilsysteme zu unterstützen. Durch die Globalisierung und die Entwicklung von E-Mobilitätskonzepten ist eine Tendenz zu erkennen, dass in der Zukunft immer mehr disziplin- und unternehmensübergreifende Zusammenarbeit erforderlich werden. Die Validierung ist nach Albers die zentrale Aktivität der Produktentwicklung. In der verteilten Produktentwicklung spielt die Validierung ebenfalls eine zentrale Rolle. Der IPEK-XiL-Ansatz stellt einen ganzheitlichen Ansatz für die Validierung in der Fahrzeugentwicklung dar. Durch die Vernetzung verteilter Teilsysteme ist es möglich, den IPEK-XiL-Ansatz auch in der verteilten Fahrzeugentwicklung einzusetzen. Demzufolge ist es nicht mehr zwingend notwendig, alle Bestandteile des IPEK-XiL-Frameworks an einem Standort zusammenzuführen. Somit lassen sich Zeit- und Kostenaufwand für den Transport sparen und Geheimhaltungsprobleme vermeiden. Darüber hinaus ist es vorstellbar, das SiD frühzeitig unter dem Einfluss von Wechselwirkungen mit Connected Systems des IPEK-XiL-Ansatzes zu validieren. So wird eine rechtzeitige Optimierung ermöglicht. Außerdem können die Aufgaben, die auf einzeltem Prüfstand nicht bzw. nicht im erwünschten Detaillierungsgrad realisierbar sind, durch eine Kopplung von mehreren Prüfstandssystemen erledigt werden. Dies ermöglicht, die Funktionen eines einzelnen Prüfstands durch Kopplung mit anderen Prüfständen zu erweitern.

In Kapitel 2 wurden zuerst die Grundhypothesen für das Verständnis der Produktentwicklung und die relevanten Begriffe vorgestellt, die als Grundstein dieser Arbeit dienen. Anschließend wurde die verteilte Produktentwicklung als erster Forschungsschwerpunkt in Bezug auf die Beschreibungen und unterschiedliche Unterstützungskonzepte berücksichtigt. Der zweite Schwerpunkt lag auf der Zusammenarbeit in der Fahrzeugentwicklung. Hauptsächlich wurden die Zusammenarbeitsformen zwischen den zwei wesentlichen Teilnehmern der Automobilindustrie, den Hersteller und Zulieferern, analysiert. Der dritte Teil des Kapitels stellt die Validierung in der Fahrzeugentwicklung vor. Zuerst wurden historische Validierungsaktivitäten in der Entwicklung der Automobilindustrie vorgestellt. Heutzutage wird die klassische Validierung je nach eingesetzten

Werkzeugen in drei Arten, die virtuelle Simulation, der physische Versuch sowie die virtuell und physisch gemischte Validierung, unterteilt. Ein modernes Fahrzeug stellt ein hoch komplexes und mit dem Fahrer sowie der Umgebung interagierendes Gesamtsystem dar. Um die Validierung moderner Fahrzeugsysteme zu unterstützen und ein globales Optimum unter Berücksichtigung des komplexen Gesamtsystems zu erreichen, wurde am IPEK der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz entwickelt. Der IPEK-XiL-Ansatz wurde in Bezug auf die Unterschiede zu den klassischen Validierungsmethoden ausführlich erklärt. Danach wurde der Stand der Validierung in der verteilten Fahrzeugentwicklung dargestellt. Abschließend wurde das Prüfstandssystem, das eine wesentliche Rolle bei der Validierung in der Fahrzeugentwicklung spielt, vorgestellt.

Basierend auf dem in Kapitel 2 vorgestellten Stand der Unterstützungsmethoden und –werkzeuge für die Validierung in der verteilten Produktentwicklung, insbesondere in der verteilten Fahrzeugentwicklung, und einer Prognose für die weitere Entwicklung wurde eine Forschungslücke identifiziert, dass die Validierungsaktivitäten in der verteilten Fahrzeugentwicklung in Zukunft mehr Unterstützung benötigen. Daher war das Ziel dieser Arbeit, den IPEK-XiL-Ansatz in der verteilten Fahrzeugentwicklung zu implementieren.

Um das Ziel sinnvoll zu erreichen, wurde zunächst das Forschungsdesign dieser Arbeit vorgestellt. Diese Arbeit wurde anhand des erweiterten ZHO-Modells gegliedert. In zwei Schleifen wurden sowohl das Zielsystem als auch das Objektsystem verfeinert. Dadurch generiertes Wissen konnte zurück in die Wissensbasis einfließen und für weitere Forschung und Anwendungen zur Verfügung stehen.

Anschließend wurden unterschiedliche Implementierungsmöglichkeiten des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung analysiert und bewertet. Die verteilten Systeme über die Distanz zu vernetzen, wurde als eine mögliche Lösung erkannt. Anschließend wurden verschiedene Vernetzungsmöglichkeiten verglichen.

Weiterhin wurde eine Vorstudie unter Verwendung von DoE durchgeführt, um die Implementierungsmöglichkeiten des IPEK-XiL-Ansatzes zu untersuchen. Basierend auf der Vorstudie wurden drei mögliche Implementierungskonzepte des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung entwickelt und in Bezug auf die Gesamtlatenzzeiten analysiert.

Diesen drei Implementierungskonzepten folgend, wurden unterschiedliche Prüfstandsvernetzungen demonstriert. Zuerst wurden unterschiedliche Prüfstandssysteme innerhalb eines Unternehmensumfeldes vernetzt. Danach wurde der IPEK-XiL-Ansatz im Rahmen eines kooperativen Forschungsprojekts in einer internationalen Umgebung implementiert. Verschiedene Prüfstandsvernetzungen

zwischen dem KIT-IPEK und dem Tongji-SAS wurden zu unterschiedlichen Zwecken realisiert und optimiert.

Auf Basis der Ergebnisse und Erfahrungen wurde ein allgemeiner Handlungsleitfaden zum Einsatz des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung, insbesondere der Antriebsentwicklung, erstellt. Im Fokus steht eine Grafik, die die Entscheidung unterstützt, ob eine Vernetzung verteilter Teilsystemen sinnvoll einzusetzen ist. Danach wurden die drei Implementierungskonzepte anhand ihrer Stärken und Beschränkungen differenziert, damit der IPEK-XiL-Ansatz effizient und effektiv in der verteilten Antriebsstrangentwicklung eingesetzt werden kann.

9.2 Ausblick

Der Fokus der vorliegenden Arbeit lag auf der Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung. Die Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung wurde zunächst in Bezug auf die Machbarkeit untersucht. Anschließend wurden unterschiedliche Vernetzungskonzepte entwickelt und auf mehreren Prüfstandssystemen implementiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der IPEK-XiL-Ansatz meistens auf Prüfständen mit relativ geringer Leistung implementiert. Daher ist in der Zukunft die Prüfstandsvernetzung mit Prüfständen höherer Leistung zu implementieren. Dafür müssen die Sicherheitsfunktionen gegen alle möglichen Notfälle zuerst ergänzt werden. Ein typischer Notfall bei der Prüfstandsvernetzung stellt die Unterbrechung der Verbindung dar. In diesem Fall sollten entsprechende Maßnahmen vor dem Untersuchungsbeginn abhängig von den eingesetzten Prüfstandssystemen und den zu validierenden Systemen definiert werden.

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen in dieser Arbeit zeigt sich, dass die Verbindungsqualität bei der Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung eine entscheidende Rolle spielt. Daher ist es sinnvoll, dass sich zukünftige Arbeiten in diesem Forschungsfeld mit dem Umgang der Gesamtlatenzzeit beschäftigen. Das kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Beispielsweise bietet eine reservierte Leitung eine viel stabilere und schnellere Internetverbindung über großen Distanzen. Darüber hinaus könnte ein zusätzliches Simulationswerkzeug, das die Instabilität und die Latenzzeiten der Verbindung aktiv kompensiert, eingesetzt werden. Um die Signale so schnell wie möglich vom Echtzeitsystem auszulesen, kann eine Schnittstelle zum Internet direkt in die Prüfstandssteuerungssoftware bzw. in das Echtzeitsystem integriert werden. Diese Schnittstelle kann beispielsweise ein spezifisches Kommunikationsprotokoll für eine bestimmte Hardware sein.

Im letzten Schritt der vorliegenden Arbeit wurde ein Handlungsleitfaden erstellt, um die Implementierung des IPEK-XiL-Ansatzes in konkreten Anwendungsfällen zu unterstützen. In Zukunft wird der IPEK-XiL-Ansatz anhand des allgemeinen Leitfadens in mehreren Anwendungsfällen eingesetzt. Dadurch lassen sich weitere Erfahrungen sammeln, um diesen Leitfaden weiter zu detaillieren und zu verfeinern.

10 Literaturverzeichnis

Albers 1994

Albers, A.: Simultaneous Engineering, Projektmanagement und Konstruktionsmethodik – Werkzeuge zur Effizienzsteigerung. VDI-Berichte Nr. 1120, VDI-Verlag Düsseldorf, 1994

Albers / Matthiesen 2002

Albers, A. ; Matthiesen, S.: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme - Das Elementmodell "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zur Analyse und Synthese technischer Systeme. In: Konstruktion, Zeitschrift für Produktentwicklung Band 54 (2002), Heft 7/8, 2002

Albers et al. 2004

Albers, A.; Kühl, M.; Müller-Glaser, K.; Schyr, C.: Vernetzung von Steuergeräten an Antriebsstrang-Prüfständen. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift October 2004, Volume 106, Issue 10, S. 934-941, ISSN: 0001-2785, Springer Automotive Media, 2004

Albers et al. 2005

Albers, A.; Burkhardt, N.; Meboldt, M.; Saak, M.: SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development. Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design, S. 553-554, ISBN 0-85825-788-2, August 15-18 2005, Melbourne, Australia 2005

Albers et al. 2006

Albers, A. ; Behrendt, M. ; Ott, S.: Systemtribometer zur Untersuchung hochbelasteter nasslaufender Friktionskontakte unter mehrachsigen Gleitbewegungen. Tribologie Fachtagung 2005 – Reibung, Schmierung und Verschleiß, , GfT Gesellschaft für Tribologie. Göttingen, 2005

Albers / Meboldt 2007

Albers, A.; Meboldt, M.: X-in-the-Loop: IPEMM - Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. Proceedings of ICED 07, 16th International Conference of Engineering Design, S. 611-612, ISBN: 1-904670-01-6, August 28-31, 2007, Paris, France 2007

Albers et al. 2009

Albers, A.; Schröter, J.; Düser, T.: Durchgängige Validierungsumgebung zum Testen von Mensch-Maschine-Schnittstellen für neuartige Fahrerassistenzsysteme. 14. VDI-Fachtagung Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung, Juni 24-25 2009, Würzburg, 2009

Albers / Düser 2009

Albers, A.; Düser, T.: Integration of Simulation and Test using Vehicle-in-Loop Technology at the Roller Test Bench and in the Road Test. In: 3. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik. Wiesbaden, 2009

Albers 2010

Albers, A.: Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. TMCE 2010, April 12–16, 2010, Ancona, Italy 2010

Albers et al. 2010a

Albers, A.; Muschik, S.; Braun, A.: Ein Beitrag zum Verständnis des Aktivitätsbegriffs im System der Produktentstehung. TDSE Tag des Systems Engineering 2010, November 10 – 12, 2010, Freising, 2010

Albers et al. 2010b

Albers, A.; Ebel, B.; Sauter, C.: COMBINING PROCESS MODEL AND SEMANTIC WIKI. INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE - DESIGN 2010, Mai 17 – 20, 2010, Dubrovnik, Croatia 2010

Albers / Düser 2011

Albers, A.; Düser, T.: Validierung im Produktentstehungsprozess. Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung, S. 133-142, ISBN: 978-3-446-42891-1, Carl Hanser Verlag, München, Mai 2011

Albers et al. 2011a

Albers, A.; Sadowski, E.; Marxen, L.: A new Perspective on Product Engineering – Overcoming Sequential Process Models. The Future of Design Methodology, Herbert Birkhofer, S. 199-209, eBook ISBN 978-0-85729-615-3, Springer-Verlag London, 2011

Albers et al. 2011b

Albers, A.; Majic, N.; Schmid, A.: Kapitel 4 Virtuelle Produktentwicklung in Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung. ISBN: 978-3-446-42891-1, Carl Hanser Verlag, München, Mai 2011

Albers et al. 2011c

Albers, A.; Jäger, S.; Blutke, R.: Validierung eines Prüfstands für Quetschöldämpfer mittels rechnerbasierter Methoden. Schwingungsdämpfung 2011, Nov. 16-17, Leonberg, 2011

Albers et al. 2012

Albers, A.; Ebel, B.; Lohmeyer, Q.: Systems of objectives in complex product. Proceedings of TMCE 2012, Mai 7–11, 2012, Karlsruhe, 2012

Albers et al. 2013a

Albers, A.; Behrendt, M.; Schröter, J.; Ott, S.; Klingler, S.: X-in-the-Loop: A Framework for Supporting Central Engineering Activities and Contracting Complexity in Product Engineering Processes. Proceedings of ICED 13, the 19th International Conference on Engineering Design, S. 391-400, ISBN: 978-1-904670-49-0, August 19-22, 2003, Seoul, Südkorea 2013

Albers et al. 2013b

Albers, A.; Boog, S.; Stier, C.: Drehungleichförmigkeitsanregung: Effizienzsteigerung verbrennungsmotorischer Antriebe durch innovative Ansätze zur Schwingungsberuhigung. FVV Abschlussbericht Vorhaben Nr. 1094; Drehungleichförmigkeitsanregung, FVV Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V., Frankfurt am Main, 2013

Albers et al. 2013c

Albers, A.; You, Y.; Klingler, S.; Behrendt, M.; Zhang, T.; Song, K.: A New Validation Concept for Globally Distributed Multidisciplinary Product Development. Proceedings of 20th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, S. 231-242, ISBN: 978-3-642-40062-9, August 17-18, Baotou, China 2013

Albers et al. 2014a

Albers, A.; You, Y.; Klingler, S.; Behrendt, M.; Zhang, T.; Song, K.: Supporting Globally Distributed Product Development with a New Validation Concept. Procedia CIRP Volume 21, 2014, S. 461-466, ISSN: 2212-8271, April 14-16, Milan, Italy 2014

Albers et al. 2014b

Albers, A.; You, Y.; Klingler, S.; Behrendt, M.; Zhang, T.; Song, K.: A New Validation Concept for the Future Automotive Development. Proceedings of The FISITA 2014 World Automotive Congress, ISBN: 978-3-662-45043-7, Juni 2-6, Maastricht, Netherlands 2014

Albers et al. 2014c

Albers, A.; Brezger, F.; Babik, A.; Pavlides, C.: Herausforderungen bei der Kommunikation von Prüfstandsteilsystemen. WiGeP Newsletter 02/2014, S. 09- 10, ISSN 1613-5504, November 2014

Albers et al. 2014d

Albers, A.; Behrendt, M.; Klingler, S.: Das Forschungsnetzwerk TU9/China mit Einblick in Entwicklungsprozesse und Ausbildung. BMBF Abschlussseminar Elektromobilitätsforschung, 2014

Albers / Koch 2014

Albers, A.; Koch, C.: Kenngrößen und Belastungsgrenzen von nasslaufenden Lamellenkupplungen unter Dauerschleifbeanspruchung. FVA Heft, 2014

Albers / Wintergerst 2014

Albers, A.; Wintergerst, E.: The Contact and Channel Approach (C&C²-A): relation a systems' physical structure to its functionality. Buchkapitel in An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations, ISBN 9781447163374, Springer-Verlag London, 2014

Albers et al. 2015

Albers, A.; Bursac, N.; Wintergerst, E.: Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015 SSP 2015, Juni 19, Stuttgart 2015

Albers et al. 2016a

Albers, A.; Bursac, N.; Rapp, S.: PGE – Product generation engineering – Case study of the dual mass flywheel. International design conference - DESIGN 2016, Mai 16-19, Dubrovnik, Croatia 2016

Albers et al. 2016b

Albers, A.; Reiss, N.; Bursac, N.; Richter, T.: iPeM – integrated Product engineering Model in context of Product Generation Engineering. Proceedings of the 26th CIRP Design Conference, Juni 15-17, Stockholm, Sweden 2016

Albers et al. 2016c

Albers, A.; Behrendt, M.; Klingler, S.; Matros, K.: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: Lindemann (Hrsg.), Handbuch Produktentwicklung, ISBN 978-3-446-44518-5, Carl Hanser Verlag, München, 2016

Albers et al. 2016d

Albers, A.; Bartosz, G.; Kniel, J.; Aschoff, M.; Meyer, A.: Integration von Versuchsergebnissen in C&C²-Modellen zur Wiederverwendung in der Produktgenerationsentwicklung am Beispiel eines trockenlaufenden Kupplungssystems. 14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Oktober 06-07, 2016, Rostock 2016

Albers et al. 2016e

Albers, A.; Bursac, N.; Walter, B.; Hahn, C.; Schröder, J.: ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor. ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN – Methoden und Werkzeuge in Produktentwicklung und Design 2016, Dresden 2016

Anderl / Ott 1999

Anderl, R.; Ott, T.: Modelling and Simulation of Distributed Product Development Processes with Neural Networks. Simulation in Industry, 12th European Simulation Symposium, S. 333-337, September 28-30, 2000, Hamburg 2000

Andert et al. 2015

Anderl, J.; Huth, T.; Savelsberg, R.; Politsch, D.: Testen von Antriebssträngen mit der virtuellen Welle. ATZextra Prüfstände und Simulation für Antriebe, September 2015

Anderl / Ott 1999

Anderl, R.; Ott, T.: Modelling and Simulation of Distributed Product Development Processes with Neural Networks. Simulation in Industry, 12th European Simulation Symposium, S. 333-337, September 28-30, 2000, Hamburg 2000

Becker 2010

Becker, H.: Darwins Gesetz in der Automobilindustrie - Warum deutsche Hersteller zu den Gewinnern zählen. eBook ISBN: 978-3-642-12085-5, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010

Biantoro 2007

Biantoro, C.: Modellierung und Analyse verteilter Entwicklungsprozesse für mechatronische Systeme.

Dissertation der Fraunhofer IPK Berlin; Technischen Universität Berlin, ISBN: 978-3-8167-7406-8, Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart 2007

Blochwitz 2014

Blochwitz, T.: Tutorial: Functional Mockup Interface 2.0 and HiL Applications. 10th International Modelica Conference 2014, März 10-12, 2014, Lund, Sweden 2014

BMW Group 2014

BMW Group: Geschäftsbericht – 2013. Herausgeber: Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft, München 2014

Braun 2013

Braun, A.: Modellbasierte Unterstützung der Produktentwicklung - Potentiale der Modellierung von Produktentstehungsprozessen am Beispiel des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM). IPEK-Forschungsberichte Band 72, ISSN 1615-8113, Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers; Karlsruhe 2013

Brendecke 2002

Brendecke, T.: Virtuelle Echtzeitumgebung für Getriebesteuergeräte mit Hardware-in-the-Loop. ISBN: 978-3-8322-0082-4, Shaker Verlag, 2002

Brunn 2009

Brunn, H.G.: Globalisierung und Produktlebenszyklen im Automobilsektor: Methoden, Konzepte und Ergebnisse aus ökonomischer Sicht. ISBN 978-3-8300-4146-7, Verlag Dr. Kovac, Hamburg, Januar 2009

Bullinger et al. 1997

Bullinger, H.-J.; Bading, A.; Warschat, J.: Forschungs- und Entwicklungsmanagement : Simultaneous engineering, Projektmanagement, Produktplanung, Rapid Product Development. ISBN: 3519063700, Teubner Verlag, Stuttgart 1997

Canzel / Schmidt 2008

Canzel, W.; Schmidt, G.: Zukünfte des Automobils - Aussichten und Grenzen der autotechnischen Globalisierung. ISBN: 9783894042509, 1. Auflage, edition sigma Verlag, 2008

Chucholowski et al. 2014

Chucholowski, F.; Tang, T.; Lienkamp, M.: Teleoperiertes Fahren Sichere und robuste Datenverbindungen. ATZelektronik February 2014, Volume 9, Issue 1, S. 60-63, Print ISSN: 1862-1791, Springer Automotive Media, 2014

Depner / Dewald 2004

Depner, H.; Dewald, U.: Globale Netzwerke und lokale Partner : deutsche Automobilzulieferer und der Wachstumsmarkt China. Economic Geography, Faculty of Geography, Philipps-University of Marburg, Marburg 2004

Diehl 2009

Diehl, H.: Systemorientierte Visualisierung disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten mechatronischer Automobilsysteme. Dissertation Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München, Verlag Dr. Hut, München 2009

DIN 44300 1972

DIN 44300 Informationsverarbeitung; Begriffe. Beuth Verlag, 1972

Dürmüller 2007

Dürmüller, C.: Sich der Herausforderung verteilte Produktentwicklung stellen. IO New Management : Zeitschrift für Unternehmenswissenschaften und Führungspraxis, 76.2007, No. 11, S. 38-42, ISSN 0019-9281, Springer Schweiz, Zürich 2007

Düser 2010

Düser, T.: X-in-the-Loop - ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen. IPEK-Forschungsberichte Band 47, ISSN 1615-8113, Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers; Karlsruhe 2010

Eckhard 2009

Eckhard, B.: Lernen in Vertragsbeziehungen - Eine empirische Untersuchung in der Automobilindustrie. eBook ISBN978-3-8349-9984-9, Springer Gabler Verlag, Dezember 2009

Ehrlenspiel 2009

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. ISBN: 978-3-446-42013-7, 4. Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien, 2009

Frankenberger 1997

Frankenberger, E.: Arbeitsteilige Produktentwicklung - empirische Untersuchung und Empfehlungen zur Gruppenarbeit in der Konstruktion. Dissertation, Darmstadt, Techn. Hochsch., ISBN: 3-18-329101-0, VDI-Verlag, Düsseldorf 1997

Fuß 2014

Fuß, P.: Die größten Automobilhersteller weltweit – Eine Analyse wichtiger Bilanzkennzahlen Kalenderjahr 2013, Ernst & Young GmbH, Eschborn 2014

Gaul 2001

Gaul, H.-D.: Verteilte Produktentwicklung -Perspektiven und Modell zur Optimierung. Dissertation Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München, ISBN 3-934767-36-2, Verlag Dr. Hut, München 2001

Gausemeier 2006

Gausemeier, J.; Hahn, A.; Kespol, H.D.; Seifert, L.: Vernetzte Produktentwicklung: Der erfolgreiche Weg zum Global Engineering Networking. ISBN 978-3-446-22725-5, 1. Auflage, Carl Hanser Verlag, München 2006

Geier et al. 2012

Geier, M.; Jäger, S.; Stier, C.; Albers, A.: Combined real and virtual domain product validation using top-down strategies. Proceedings of ASME 2012 Verification & Validation Symposium, Las Vegas, USA, Mai 2-4, 2012

Geimer et al. 2006

Geimer, M.; Krüger, T.; Linsel, P.: Co-Simulation, gekoppelte Simulation oder Simulatorkopplung? Ein Versuch der Begriffsvereinheitlichung. Zeitschrift: O+P 11-12/2006, ISSN: 0341-2660, S. 572-576, 2006

Gierhardt 2001

Gierhardt, H.: Global verteilte Produktentwicklungsprojekte - Ein Vorgehensmodell auf der operativen Ebene. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München, ISBN 3-934767-68-0, Verlag Dr. Hut, München 2001

Hahn / Kaufmann 2002

Hahn, D.; Kaufmann, L.: Handbuch Industrielles Beschaffungsmanagement. ISBN: 978-3-409-22253-2, Springer Gabler Verlag, 2002

Hanschen 2010

Hanschen, R.: Weiterentwicklung internationaler Joint Ventures als Gestaltungsobjekt des strategischen Managements - Konzept am Beispiel eines deutschen Automobilherstellers in China. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, ISBN: 978-3-86618-386-5, Rainer Hampp Verlage, München und Mering 2010

Heftrich 2001

Heftrich, F.: Moderne F&E-Zusammenarbeiten in der Automobilindustrie : Organisation und Instrumente. Dissertation der Universität-Gesamthochschule Siegen, 2001

Hoffmann 2007

Hoffmann, R.: Die Gründung eines Joint Ventures in China. Dezan Shira & Associates, Oktober 2007

International Monetary Fund (IMF) 2014

International Monetary Fund (IMF): World economic outlook: Legacies, clouds, uncertainties. International Monetary Fund (IMF), Oktober 2014

ISO/IEC 7498-1: 1994

ISO/IEC 7498-1:1994, Information technology - Open Systems Interconnection - Basic Reference Model: The Basic Model. 1994

Katzy et al. 2000

Katzy, B.; Evaristo, R.; Zigurs, I.: Knowledge management in virtual projects: a research agenda. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, ISBN 0-7695-0493-0, Januar 4-7, 2000, Hawaii, USA 2000

Kern 2005

Kern, E.-M.: Verteilte Produktentwicklung - Rahmenkonzept und Vorgehensweise zur organisatorischen Gestaltung. ISBN 3-936771-58-8, GITO-Verlag Berlin, 2005

Kirchner 2011

Kirchner, E.: Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben - Grundlagen der Auslegung, Entwicklung und Validierung von Fahrzeuggetrieben und deren Komponenten. eBook ISBN: 978-3-540-35292-1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007

Kirschke-Biller et al. 2011

Kirschke-Biller, F.; Fürst, S.; Lupp, S.; Bunzel, S.; Schmerler, S.; Rimkus, R.; Gilberg, A.; Nishikawa, K.; Titze, A.: AUTOSAR - A worldwide standard Current developments, roll-out and outlook. 15th International VDI Congress Electronic Systems for Vehicles, Oktober 12-13, Baden-Baden 2011

Klemmer / Everitt 2002

Klemmer, S.; Everitt, K.: Bridging Physical and Electronic Media for Distributed Design Collaboration. Proceedings of Computer-Human Interaction CHI ACM 2002, S. 878-879, ACM Press, April 20-25, 2002, Minneapolis, USA 2002

Koufterosa et al. 2007

Koufterosa, X.A.; Cheng, T.C.E.; Lai, K.-H.: "Black-box" and "gray-box" supplier integration in product development: Antecedents, consequences and the moderating role of firm size. Journal of Operations Management, Volume 25, Issue 4, S. 847-870, Herausgeber: APICS Educational & Research Foundation, 2007

Krause et al. 1994

Krause, F.-L.; Jansen, H.; Kramer, S.; Kiesewetter, T.: Verteilte Produktentwicklung mittels Breitbandkommunikation. ZWF CIM: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung, 89.1994, No.11, S. 544-547, ISSN: 0932-0482, Carl Hanser Verlag, 1994

Krause et al. 2001

Krause, F.-T.; Tang, T.; Ahle, U.: Leitprojekt integrierte Virtuelle Produktentstehung: Fortschrittsbericht. ISBN: 3-8167-5638-7, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart April 2001

Krause et al. 2002a

Krause, F.-T.; Tang, T.; Ahle, U.: Leitprojekt integrierte Virtuelle Produktentstehung: Fortschrittsbericht II. ISBN: 3-8167-6090-2, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart März 2002

Krause et al. 2002b

Krause, F.-T.; Tang, T.; Ahle, U.: Leitprojekt integrierte Virtuelle Produktentstehung: Abschlussbericht. ISBN: 3-8167-6165-8, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart Juni 2002

Kyriasoglou 2012

Kyriasoglou, C.: China wildert im deutschen Mittelstand.
<http://www.ittribalwo.com/article/885.html>, Zeit Online, 2012

Larsson et al. 2003

Larsson, A.; Törlind, P.; Karlsson, L.; Mabogunje, A.; Leifer, L.; Larsson, T.; Elfström, B.-O.: Distributed Team Innovation – A framework for distributed product development. Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, S. 321-322, ISBN 1-904670-00-8, August 19-21, 2003, Stockholm, Sweden 2003

Leimeister 2014

Leimeister, J.M.: Collaboration Engineering - IT-gestützte Zusammenarbeitsprozesse systematisch entwickeln und durchführen. eBook ISBN978-3-642-20891-1, Springer Gabler Verlag, April 2014

Lohmeyer 2013

Lohmeyer, Q.: Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme. IPEK-Forschungsberichte Band 59, ISSN 1615-8113, Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers; Karlsruhe 2013

Matthiesen 2002

Matthiesen, S.: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. IPEK-Forschungsberichte Band 6, ISSN 1615-8113, Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers; Karlsruhe 2002

Matthiesen / Ruckpaul 2012

Matthiesen, S.; Ruckpaul, A.: New insights on the contact & channel-approach – modeling of systems with several logical states. International Design Conference 2012, S. 1019-1028, ISBN: 978-953-7738-17-4, Mai 21 – 24, 2012, Dubrovnik, Croatia 2012

Meboldt 2008

Meboldt, M.: Ganzheitliche Modellbildung der Produktentstehung - von mentalen Modellen bis zum Workflow für den Umgang mit Komplexität - als Beitrag zum integrierten Produktentstehungsmodell (IPeM). IPEK-Forschungsberichte Band 29, ISSN 1615-8113, Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers; Karlsruhe 2002

Milne 2005

Milne, A.J.: An information-theoretic approach to the study of ubiquitous computing workspaces supporting geographically distributed engineering design teams as group-users. Dissertation, Stanford University, ISBN 0-496-96009-1, Stanford, USA 2005

Müller-Tomfelde 2010

Müller-Tomfelde, C.: Tabletops - Horizontal Interactive Displays. eBook ISBN: 978-1-84996-113-4, Springer-Verlag London, 2010

Neubauer / Rudow 2012

Neubauer, W.; Rudow, B.: Trends in der Automobilindustrie: Entwicklungstendenzen - Betriebsratsarbeit - Steuer- und Fördertechnik - Gießereitechnik - Informationstechnologie - Informations- und Assistenzsysteme. ISBN: 978-3486715279, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, April 2012

Nocker 2005

Nocker, R.: Digitale Kommunikationssysteme 2 - Grundlagen der Vermittlungstechnik. ISBN 978-3-528-03977-6, Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2005

Oerding 2009

Oerding, J.: Ein Beitrag zum Modellverständnis der Produktentstehung – Strukturierung von Zielsystemen mittels C&CM. IPEK-Forschungsberichte Band 37, ISSN 1615-8113, Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers; Karlsruhe 2009

O'Hara-Devereaux / Johansen 1994

O'Hara-Devereaux, M.; Johansen, R.: GlobalWork: Bridging Distance, Culture and Time. ISBN: 978-1-55542-602-6, 1. Auflage, Jossey-Bass Verlag, Juni 1994

Pahl / Beitz 2005

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.: Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. ISBN 3-540-22048-8, 6. Auflage, Springer Berlin Heidelberg New York, 2005

Paulweber / Lebert 2005

Paulweber, M.; Lebert, K.: Mess- und Prüfstandstechnik - Antriebsstrangentwicklung Hybridisierung Elektrifizierung. eBook ISBN: 978-3-658-04453-4, Springer Vieweg, 2014

Petersen et al. 2005

Petersen, K.J.; Handfield, R.B.; Ragatz, G.L.: Supplier integration into new product development: Coordinating product, process and supply chain design. Journal of Operations Management 04/ 2005; 23(3), S. 371-388, Tempe (Arizona), USA 2005

Picot et al. 2003

Picot, A.; Reichwald, R.; Wigand, R.-T.: Die grenzenlose Unternehmung - Information, Organisation und Management. ISBN 978-3-8349-2162-8, 5. Auflage, Springer Gabler Verlag, Wiesbaden 2003

Pollmeier 2008

Pollmeier, I.: Strategisches Supply Chain Controlling in der Automobilwirtschaft. ISBN 978-3-8300-3996-9, Verlag Dr. Kovac, Hamburg, November 2008

Prasad 1996

Prasad, B.: Concurrent Engineering Fundamentals, Volume II: Integrated product development. ISBN 0-13-396946-0, Prentice-Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, USA 1996

Reichhuber 2010

Reichhuber, A.: Strategie und Struktur in der Automobilindustrie - Strategische und organisatorische Programme zur Handhabung automobilwirtschaftlicher Herausforderungen. 1. Auflage, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2010

Reinhardt et al. 2001

Reinhardt, G.; Fusch, T.; Patron, C.: Web-basierte Lösungen für die durchgängige Virtualisierung des Produktionsprozesses. VDI-Z 143 (2001), Springer-VDI-Verlag, 2001

Robens 2013

Robens, G.: Ein Handlungssystem zur Skalierung der simulierten Vorbeifahrt mittels Mikrofonarray für eine effiziente Validierung in kleinen Halbfreifeldräumen im Fahrzeugentwicklungsprozess. IPEK-Forschungsberichte Band 61, ISSN 1615-8113, Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers; Karlsruhe 2013

Sanz et al. 2007

Sanz, F.J.G.; Semmler, K.; Walther, J.: Die Automobilindustrie auf dem Weg zur globalen Netzwerkkompetenz. eBook ISBN 978-3-540-70787-5, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, September 2007

Sauter 2013

Sauter, M.: Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme - UMTS, HSPA und LTE, GSM, GPRS, Wireless LAN und Bluetooth. eBook ISBN: 978-3-658-01461-2, 5. Auflage, Springer Vieweg, 2013

Schmidt / Fickler 2013

Schmidt, F.; Fickler, M.: Fahrzeugentwicklung im Umbruch – Baukastenstrategien allein reichen nicht aus!. automotivIT international, 11/2013, BWH GmbH, 2013

Schröter 2013

Schröter, J.: Das erweiterte X-in-the-Loop-Framework zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess am Beispiel der Entwicklung energieeffizienter Fahrzeuge. IPEK-Forschungsberichte Band 64, ISSN 1615-8113, Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers; Karlsruhe 2013

Schyr 2006

Schyr, C.: Modellbasierte Methoden für die Validierungsphase im Produktentwicklungsprozess mechatronischer Systeme am Beispiel der Antriebsstrangentwicklung. IPEK-Forschungsberichte Band 22, ISSN 1615-8113, Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers; Karlsruhe 2006

Seeliger 2007

Seeliger, P.: Elektronik und Software im modernen Kraftfahrzeug – neue Herausforderungen für Ingenieure. EDAG Engineering GmbH, 2007

Seliger et al. 1997

Seliger, G.; Weber, H.; Schröter, W.; Andreev, A.: Zusammenarbeit bei der Entwicklung komplexer Produkte. Konstruktion : Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe 49 (1997), S.37-41, ISSN: 0373-3300, Springer-VDI-Verlag, 1997

Siebertz et al. 1997

Siebertz, K.; Bebbler, D.V.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE). eBook ISBN: 978-3-642-05493-8, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010

Sommer 2016

Sommer Obando, H.: Reinforcement learning Framework for the self-learning Suppression of Clutch Judder in automotive Drive Trains. IPEK-Forschungsberichte Band 94, ISSN 1615-8113, Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers; Karlsruhe 2016

Sosa et al. 2002

Sosa, M.-E.; Eppinger, S.-D.; Pich, M.; McKendrick, D.-G.; Stout, S.-K.: Factors that influence technical communication in distributed product development: an empirical study in the telecommunications industry. IEEE Transactions on Engineering Management (Volume:49 , Issue: 1), S. 45-48, ISSN: 0018-9391, Februar 2002

Taylor / Volpert 1977

Taylor, F.W.; Volpert, W.: Die Grundsätze wissenschaftlicher Betriebsführung. ISBN: 3-407-54043-4, Beltz Verlagsgruppe, 1977

T-Systems 2009

T-Systems: Whitepaper: Vernetzte Wertschöpfung in der Automobilindustrie. Herausgeber: T-Systems Enterprise Services GmbH, 2009

Vajna / Marosvary 2004

Vajna, S.; Marosvary, Z.: Communication and Knowledge sharing in distributed engineering design. Proceedings of DESIGN 2004, the 8th International Design Conference, S. 937-942, ISBN 953-6313-59-6, Mai 18-21, 2004, Dubrovnik, Croatia 2004

VDI 2206

Richtlinie VDI 2206 "Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme". Herausgeber: VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung, 2004

VDI 2221

Richtlinie VDI 2221 "Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte". Herausgeber: VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung, 1993

Vogelpohl 2013

Vogelpohl, J.: Entwicklung eines roboterbasierten Prüfstands für die Ermittlung der Langzeitbetriebsfestigkeit von beweglichen Karosserieteilen. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, TU Bergakademie Freiberg, 2013

Vökl et al. 2006

Vökl, M.; Krötzsch, M.; Vrandečić, D.; Haller, H.; Studer, R.: Semantic Wikipedia. IW3C2 Edinburgh, Scotland, 2006.

Voß 2008

Voß, P.H.: Horizontale Supply-Chain-Beziehungen - Potentiale der Zusammenarbeit zwischen Zulieferern in Supply Chains. eBook ISBN:978-3-8350-5532-2, Deutscher Universitäts-Verlag, 2008

Wagenknecht / Hielscher 2014

Wagenknecht, C.; Hielscher, M.: Formale Sprachen, abstrakte Automaten und Compiler - Lehr- und Arbeitsbuch für Grundstudium und Fortbildung. eBook ISBN: 978-3-658-02692-9, Springer Vieweg, 2014

Wallentowitz et al. 2009

Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I.: Strategien in der Automobilindustrie - Technologietrends und Marktentwicklungen. eBook ISBN: 978-3-8348-9311-6, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2009

Walter et al. 2016

Walter, B.; Rapp, S.; Albers, A.: Selecting appropriate tools for synchronous communication and collaboration in locally distributed product development. NordDesign 2016, August 10-12, Trondheim, Norway 2016

Wang 2014

Wang, C.: Deutsche Direktinvestitionen in der Volksrepublik China - Gestaltungsfaktoren und Internationales Management. eBook ISBN: 978-3-658-06139-5, Springer Gabler Verlag, Wiesbaden 2014

Welp 1996

Welp, E.-G. / VDI: Planung und Steuerung verteilter Produktentwicklungsprozesse. Deutscher Konstrukteurtag '96 - Zukunftschance Produktentwicklung - Tagung (VDI Berichte Nr. 1270), VDI-Gesellschaft Entwicklung - Konstruktion - Vertrieb, S. 185-208, ISBN: 3180912707, Juni 3-4, 1996, Dresden 1996

Wheelwright et al. 1994

Wheelwright, S. C.; Clark, K. B.; Allgeier, H. (Übersetzer): Revolution der Produktentwicklung: Spitzenleistungen in Schnelligkeit, Effizienz und Qualität durch dynamische Teams. ISBN 359335019X, 1. Auflage, Campus Verlag Frankfurt / New York, März 1994

Wilhelm 2008

Wilhelm, M.: Kooperation und Wettbewerb in Automobilzulieferernetzwerken - Erkenntnisse zum Management eines Spannungsverhältnisses aus Deutschland und Japan. ISBN 978-3-89518-716-2, Metropolis Verlag, Dezember 2008

Winner et al. 1998

Winner, R.I.; Pennell, J.P.; Bertrand, H. E.; Slusarczyk, M.M.: The Role of Concurrent Engineering in Weapons System Acquisition. Institute for Defense Analysis, 1988

Winners 2003

Winners, R.: Strukturwandel der Wertschöpfungsketten in der Automobil- und Zulieferindustrie: Chancen und Risiken des Supply Chain Managements. Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion am Karlsruher Institut für Technologie, 2003

Wojda / Barth 2006

Wojda, F.; Barth, A.: Innovative Kooperationsnetzwerke. ISBN: 978-3-8350-0463-4, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden 2006

Wolters 1995

Wolters, H.: Echtzeitsysteme - Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendungen. eBook ISBN: 978-3-540-27416-2. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005

Wörn / Brinkschulte 2005

Wörn, H.; Brinkschulte, U.: Echtzeitsysteme. Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendungen. ISBN: 3-540-20588-8, Springer, Berlin 2005

Wörn 2005

Wörn, H.: Modul- und Systembeschaffung in der Automobilindustrie : Gestaltung der Kooperation zwischen europäischen Hersteller- und Zulieferunternehmen. Dissertaion der Freie Universität Berlin, ISBN: 3824462443, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden 1995

Wyman 2008

Wyman, O.: Herausforderung Globalisierung - Eckpunkte einer ganzheitlichen Strategie für Automobilzulieferer. Oliver Wyman, 2008

Zwicker 1998

Zwicker, E.: Unterstützung der unternehmensübergreifenden Produktentwicklung durch den Einsatz moderner Informationstechnologien. Dissertation ETH Zürich, ISBN 3-18-328820-6, 1998

Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten

Ma et al. 2014

Ma, H.; You, Y.; Albers, A.: Machbarkeitsstudie von einer Remote-Joint Validierungsplattform.
Bachelorarbeit 2014 am IPEK

11 Anhang

11.1 Vorgehensweise DoE³⁷⁷

1. Auswahl der Parameter für ein Experiment

Die Auswahl der im Versuch berücksichtigten Parameter ist entscheidend für den Erfolg. Werden wichtige Parameter im Versuch nicht berücksichtigt, so lässt sich die im Versuch beobachtete Streuung nicht ausreichend erklären und es muss nach weiteren Einflussgrößen gesucht werden.

2. Festlegung der Parameterebenen

Die Einstellungen für die Parameterstufen sollten möglichst weit auseinanderliegend voneinander gewählt werden, ohne dass die Funktion nicht mehr ausführbar ist oder Ergebnisse nicht mehr gemessen werden können. Es sollten jedoch keine Einstellungen vorgenommen werden, welche in der Praxis nicht auch eingestellt werden würde.

3. Aufstellung des Versuchsplans

Der Versuchsplan wird im Allgemeinen mit Hilfe von statistischer Planungssoftware erstellt, welcher die Faktoren zur Bestimmung aller Effekte orthogonal zueinander positioniert.

4. Versuchsdurchführung

Die Versuche werden in der von der DoE-Struktur vorgeschlagenen Reihenfolge durchgeführt und die Versuchsergebnisse mit hinreichender Genauigkeit gemessen. Zur Minimierung des Einflusses externer Störvariablen, werden die Versuchsdurchläufe nach Identifikation und Festlegung der Faktorstufen in zufälliger Reihenfolge angeordnet (randomisiert).

5. Analyse der Versuchsergebnisse

Die Analyse erfolgt mit Hilfe der statistischen Varianzanalyse mit dem Ziel der Koeffizientenbestimmung für alle signifikanten Faktoranteile der Haupt- und Wechselwirkungseffekte. Eine Modellreduzierung sollte solange erfolgen, bis einzig die statistisch signifikanten Anteile zur Ergebnisstreuung vorhanden sind.

6. Bestimmung des Zusammenhangs

Bei genügend hohem Anteil der erklärbaren Streuung des Funktionsergebnisses durch die unabhängigen Faktoren, bilden die signifikanten Koeffizienten der Streuungsanteile die exakte mathematische Formel für die Funktion.

³⁷⁷ Quelle: Institut für Technologie und Arbeit <http://www.optimus-spitzencluster.de/DoE.pdf>

11.2 Das orthogonale Formular und die Ergebnisse

Tabelle 11-1 Das orthogonale Formular und die Ergebnisse³⁷⁸

Card	A	B	C	D	Überschreitung	Systemverzögerung (ms)
1	2	1	1	1	0,1743	247,0
2	2	1	2	2	0,1525	198,6
3	1	2	1	2	0,1796	300,8
4	1	1	1	2	0,2171	324,5
5	1	1	1	7	0,1627	317,7
6	2	2	1	3	0,2376	222,5
7	2	1	2	8	0,1812	352,7
8	1	2	2	9	0,2211	228,6
9	1	1	1	1	0,1156	300,6
10	1	1	1	5	0,1274	311,9
11	1	2	1	8	0,1001	202,2
12	1	1	2	4	0,1658	301,2
13	1	2	1	4	0,0665	235,3
14	1	1	1	8	0,1523	233,5
15	1	1	2	6	0,1641	418,1
16	2	1	1	6	0,2545	322,0
17	2	1	1	4	0,2723	376,5
18	2	1	1	9	0,2386	223,6
19	1	1	2	7	0,2024	257,1
20	1	1	1	3	0,1506	330,1
21	1	2	2	1	0,1903	391,7
22	1	1	2	3	0,1332	374,4
23	1	1	1	5	0,1522	231,2
24	2	2	2	5	0,2634	271,8
25	1	1	1	9	0,2444	357,4
26	2	2	1	7	0,2842	376,4
27	1	2	1	6	0,0781	281,6

³⁷⁸ Ma et al. 2014