

Michael Andreas Steck

**Frühe funktionale Absicherung in der
Antriebsstrangentwicklung – Ein Ansatz zur
Einbindung von skalierten Teilsystemen durch
physisch-virtuelle Leistungsskalierung**

Early Functional Validation in Drivetrain
Development: An Approach to Integrate Scaled
Subsystems through Physical-Virtual Performance
Scaling

Band 158

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

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

Copyright IPEK – Institut für Produktentwicklung, 2022
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1615-8113

Frühe funktionale Absicherung in der Antriebsstrangentwicklung – Ein Ansatz zur Einbindung von skalierten Teilsystemen durch physisch-virtuelle Leistungsskalierung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des

Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M.Sc. Michael Andreas Steck

Tag der mündlichen Prüfung: 05.10.22

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Kreimeyer

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 zur Verfügung, um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

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

Vorwort zu Band 158

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird ein Ansatz zur Unterstützung des Frontloadings aufgezeigt und an einem Beispielsystem aus einem Akkubohrschrauber in drei Untersuchungen angewendet. Dazu werden Maßnahmen, die den breiten Einsatz von frühen Prototypen zur Absicherung von Antriebssträngen und eine vorgezogene Validierung in XiL-Plattformen erlauben, vorgestellt.

In der Produktentwicklung ist es essentiell, möglichst viele belastbare Informationen über das tatsächliche Verhalten eines noch zu entwickelnden technischen Systems zu erzeugen. Diese belastbaren Informationen zum Verhalten geben Aufschluss darüber, inwieweit das erwartete Verhalten vom tatsächlichen abweicht und wie Zielgrößen für die nächste Entwicklungsgeneration innerhalb des Entwicklungsprojektes abgeleitet werden können. Sollen diese Verhaltensinformationen auf Prüfständen erzeugt werden, ist dafür vorliegende Hardware notwendig. Um diese möglichst früh in Prüfstandversuchen untersuchen zu können, wird sie oft mit Prototypen-Fertigungsverfahren erzeugt. Ein frühes Absichern wird in der Produktentwicklung auch Frontloading genannt. In der Produktgenerationsentwicklung liegen häufig aus bereits am Markt befindlichen Vorgängerprodukten Bauteile vor. Diese unterscheiden sich in einigen Perspektiven von den neu zu entwickelnden Bauteilen in der nachfolgenden Produktgeneration. Eine Möglichkeit Frontloading weiter zu erhöhen, ist es diese Bauteile, obwohl sie vom Endbauteil abweichen, in Prüfstandversuchen einzusetzen. Bei Baureihen liegen oft Bauteile in einer anderen Größe oder Leistungsklasse vor. Um derartige abweichende Bauteile in Systemtests zu untersuchen, müssen Teilsysteme unterschiedlicher Größenstufen gemeinsam auf Prüfständen untersuchbar gemacht werden. Dazu muss zwischen den Teilsystemen unterschiedlicher Größenstufe Leistung skaliert transferiert werden. Im Stand der Forschung fehlen Methoden, wie diese Skalierung erfolgen muss und wie Testumgebungen aufzubauen sind, um Bauteil-Teilsysteme unterschiedlicher Größenstufen skaliert in Systemtests zu koppeln.

Diesem Thema widmet sich Michael Steck in der vorliegenden Forschungsarbeit. Er entwickelt den sogenannten X-in-the-Loop Ansatz zu einem scaled-Components-in-the-Loop (sCiL) Ansatz weiter. Seine Arbeit leistet wichtige Beiträge für die frühe Produktvalidierung durch Frontloading und unterstützt damit bei der Verlagerung von Validierungsaktivitäten in frühe Phasen noch bevor alle Teilsysteme prototypisch vorliegen. Dadurch wird eine gemeinsame Absicherung von Teilsystemen in unterschiedlichen Größenstufen möglich. Er entwickelt dazu Koppelsysteme zur Einbindung von physischen Teilsystemen und Skalierungsmethoden von Leistungsgrößen, um Referenzprodukte in der Absicherung nutzbar zu machen. Seine Untersuchung führt er exemplarisch an einem Antriebsstrangprüfstand durch, indem Teilsysteme eines Antriebsstranges unterschiedlicher Größenstufen in-the-Loop untersucht werden. Über seine Untersuchungen entwickelt Michael Steck Skalierungsmodelle, mit denen Federkräfte, Baugrößen und Geometrievariationen zwischen Teilsystemen unterschiedlicher Baugröße skaliert werden können. Außerdem weist er

nach, wie gut die Skalierungsmodelle das Systemverhalten abbilden. Damit leistet die Arbeit wichtige Beiträge zur Entwicklung derartiger sCiL-Antriebsprüfstände und zur Skalierung der Koppelemente zwischen den Teilsystemen unterschiedlicher Größenordnung. Es entstehen wichtige Erkenntnisse, wie ein Antriebsstrangprüfstand auf Basis des X-in-the-Loop Ansatzes gestaltet sein muss, um die Einbindung von Antriebsstrangkomponenten unterschiedlicher Baugröße zu unterstützen und früh Absicherung für Antriebsstrangkomponenten zu ermöglichen. Durch die Einbindung von physischen Komponenten und Teilsystemen aus Referenzprodukten und der Ableitung von Skalierungsfaktoren können frühe Untersuchungen des Folgeentwurfs unter Berücksichtigung des Gesamtsystems durchgeführt werden.

Oktober 2022

Sven Matthiesen

Kurzfassung

Die Verkürzung der Entwicklungszeit und Reduzierung der Gesamtkosten durch die Vermeidung von späten Designänderungen wird in der Produktentwicklung immer relevanter.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird ein Ansatz zur Unterstützung des Frontloading aufgezeigt und an einem Beispielsystem aus einem Akkuboehrschrauber angewandt. An drei Untersuchungsbeispielen werden die Einsatzmöglichkeiten des Ansatzes zu skalierten Untersuchungen in der Produktentwicklung aufgezeigt und evaluiert.

Durch die Kopplung von unterschiedlichen Teilsystemen und dem zeitgleichen Betrieb in einem Antriebsstrangprüfstand (scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstand) wird eine vorgezogene Absicherung unterstützt. Vorteile bietet eine vorgezogene Absicherung insbesondere für die Vorentwicklungsphasen, in denen noch keine vollständig funktionsfähigen Versuchs- bzw. Technologieträger zur Verfügung stehen, gleichzeitig jedoch eine frühe funktionale Absicherung mit Hardwarekomponenten gewünscht ist. Das Frontloading in der Produktentwicklung wird damit unterstützt und gefördert.

Die skalierten Untersuchungen werden in drei Experimenten am scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstand für einen Akkuboehrschrauber durch exemplarische Anwendungen veranschaulicht. Es erfolgt die beispielhafte Umsetzung der Skalierung der Leistungsgrößen in einem XiL-Prüfstand zur Anpassung des Systemverhaltens an veränderte Prototypen. Anhand von Experimenten an einem Antriebsstrangprüfstand werden Skalierungsfaktoren für die Anpassung der rotatorischen Leistungsgrößen zwischen miteinander verbundenen Systemen abgeleitet und verifiziert. Die Integration der skalierten Komponenten erfolgt auf einem XiL-Prüfstand über Koppelsysteme in das Gesamtsystem.

Dadurch wird eine skalierte Komponentenprüfung unter Berücksichtigung des restlichen Systems ermöglicht. Basierend auf den abgeleiteten Skalierungsmodellen wird der Einfluss von Geometrievarianten auf das dynamische Verhalten einer Überlastkupplung eines Akkuboehrschraubers untersucht. Durch den Einsatz des scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstands und der abgeleiteten Skalierungsfaktoren können Gestaltvariationen bereits durch Einsatz eines Referenzsystems bewertet werden. Durch die Einbindung von physischen Komponenten und Teilsystemen aus Referenzprodukten und die Ableitung von Skalierungsfaktoren können frühe Untersuchungen skaliertter Komponenten unter Berücksichtigung des Gesamtsystems durchgeführt werden.

Die Forschungsarbeit beschreibt basierend auf den gezeigten Untersuchungen eine Validierungsmethode und stellt Möglichkeiten zur Integration der Methode in den Produktentwicklungsprozess vor.

Abstract

Shortening development time and reducing overall costs, by avoiding late design changes is becoming more and more relevant.

Within the context of this research work, an approach for supporting frontloading is demonstrated and applied to an example system consisting of a cordless screwdriver. The possible applications of the approach for scaled investigations in product development are demonstrated and evaluated on the basis of three test examples.

By coupling different subsystems and simultaneous operation in a powertrain test bench (scaled components-in-the-loop test bench), an early validation is supported. Advance validation is particularly advantageous in the pre-development phases, when fully functional test or technology prototypes are not yet available, but early functional validation with hardware components is desired. Frontloading in product development is thus supported and promoted.

The scaled investigations are illustrated in three examples on the scaled-components-in-the-loop test bench for a cordless screwdriver. The exemplary implementation of the scaling of the performance variables in an XiL test bench is carried out to adapt the system behavior to modified prototypes. Experiments on a powertrain test bench are used to derive and verify scaling factors for adapting the rotational power quantities between interconnected systems. The scaled components are integrated into the overall system on an XiL test bench via coupling systems.

This enables scaled component testing while taking the rest of the system into account. Based on the derived scaling models, the influence of geometry variants on the dynamic behavior of an overload clutch of a cordless drill is investigated. By using the scaled-components-in-the-loop test rig and the derived scaling factors, design variations can already be evaluated by using a reference system.

By incorporating physical components and subsystems from reference products and deriving scaling factors, early investigations of the subsequent design can be carried out taking the overall system into account.

Based on the investigations shown, the research work describes a validation method and presents possibilities for integrating the method into the product development process.

Danksagung

Die vorliegende Forschungsarbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Viele Menschen haben zum Gelingen dieser Forschungsarbeit beigetragen, ihnen gilt mein herzlicher Dank.

Mein besonders herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die wertvollen Gespräche. Für die Übernahme des Korreferats bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Matthias Kreimeyer, der mir wichtige Impulse für diese Forschungsarbeit gegeben hat.

Für die finanzielle Unterstützung meiner Forschungsarbeit danke ich dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo V 20Y1509B). Basierend auf den Aktivitäten im Forschungsprojekt (Effiziente Entwicklungsprozesskette 4.0 – EFFPRO_4.0) konnte ich meine Forschung durchführen und wichtige Ergebnisse für diese Arbeit erzielen. Ebenso danke ich dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für die Unterstützung dieser Forschung.

Ich danke dem gesamten IPEK-Team und insbesondere den Kolleginnen und Kollegen am Institut für die gemeinsamen Diskussionen und den wissenschaftlichen Austausch sowie für die gute Unterstützung durch die Servicecenter und die Sekretariate. Für das Korrekturlesen und die hilfreichen Kommentare zu meiner Forschungsarbeit danke ich meinen Kollegen und Kolleginnen am IPEK – Institut für Produktentwicklung.

Weiterhin danke ich allen am Projekt beteiligten Firmen sowie allen ehemaligen Studierenden, die im Rahmen von Abschlussarbeiten sowie ihrer Tätigkeit als Studentische Hilfskräfte einen Beitrag zu dieser Forschungsarbeit geleistet haben.

Meinen Eltern danke ich für alles, das sie mir ermöglicht und mitgegeben haben. Auch bei meinen Freundinnen und Freunden möchte ich mich herzlich für die Anregungen und die zuweilen ebenso wichtige Ablenkung bedanken. Mein größter Dank gilt meiner Ehefrau, für die beständige Unterstützung und die vielen schönen gemeinsamen Momente in der Zeit der Erstellung dieser Forschungsarbeit.

Oktober 2022

Michael Andreas Steck

*The secret of change is to focus all of your energy,
not on fighting the old, but on building the new.*

SOKRATES

Inhaltsverzeichnis

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Kurzfassung | i |
| Inhaltsverzeichnis | ix |
| Abbildungsverzeichnis | xii |
| Tabellenverzeichnis | xv |
| Abkürzungsverzeichnis | xvii |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Bedarf und Thema der Arbeit | 1 |
| 1.2 Fokus der Arbeit | 4 |
| 1.3 Aufbau der Arbeit | 5 |
| 2 Grundlagen und Stand der Forschung | 7 |
| 2.1 Frontloading durch frühe Absicherung in der Produktentwicklung | 7 |
| 2.1.1 Absicherung in der Produktentwicklung | 8 |
| 2.1.2 Reduktion von Entwicklungsaufwand | 11 |
| 2.1.3 Etablierte Testaktivitäten in der Produktentwicklung | 16 |
| 2.1.4 Zwischenfazit..... | 19 |
| 2.2 XiL-Prüfstände und Koppelsysteme | 20 |
| 2.2.1 Einbindung eines einzelnen Teilsystems | 20 |
| 2.2.2 IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz | 22 |
| 2.2.3 Koppelsysteme zur Einbindung von Teilsystemen | 24 |
| 2.2.4 XiL-Prüfstände zur Absicherung | 25 |
| 2.2.5 Zwischenfazit zur Abbildung der Wechselwirkungen | 25 |
| 2.3 Entwicklung und Absicherung von Elektrowerkzeugen..... | 26 |
| 2.3.1 Besonderheiten im Aufbau und der Entwicklung von Elektrowerkzeugen | 27 |
| 2.3.2 Grundlagen Elektrowerkzeuge..... | 28 |
| 2.3.3 Grundlagen Akkuboehrschrauber | 29 |
| 2.3.4 Überlastkupplung im Akkuboehrschrauber | 31 |
| 2.3.5 Testaktivitäten bei der Entwicklung von kompakten Antriebssträngen | 33 |
| 2.4 Skalierte Untersuchungen | 34 |
| 2.4.1 Ähnlichkeitsmechanik | 35 |
| 2.4.2 Ähnlichkeitsgesetze..... | 37 |
| 2.4.3 Dimensionshomogenität und Buckingham Theorem..... | 39 |
| 2.4.4 Vorgehen zur Ableitung von Ähnlichkeitsgesetzen | 41 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.5 | Modellversuche im Windkanal und Skalierte Untersuchungen .. | 43 |
| 2.4.6 | Zwischenfazit | 46 |
| 2.5 | Fazit zum Stand der Forschung und Forschungsbedarf..... | 47 |
| 3 | Motivation und Zielsetzung | 49 |
| 3.1 | Motivation | 49 |
| 3.2 | Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag | 50 |
| 3.2.1 | Wissenschaftlicher Beitrag | 52 |
| 4 | Forschungsdesign | 53 |
| 4.1 | Forschungsfragen | 53 |
| 4.2 | Forschungsvorgehen | 55 |
| 4.3 | Lösungsansatz der skalierten Absicherung..... | 57 |
| 4.3.1 | Aufbau und Architektur der Untersuchungsumgebung..... | 59 |
| 4.3.2 | Koppelsysteme und virtuelle Kopplung | 60 |
| 5 | Skalierung der Leistungsgrößen einer Überlastkupplung am Beispiel der Federkraft | 63 |
| 5.1 | Zielsetzung und Hypothese | 65 |
| 5.2 | Untersuchungsmethode und Versuchsaufbau | 66 |
| 5.2.1 | Überlastkupplung als Beispielsystem | 66 |
| 5.2.2 | Untersuchungsumgebung | 69 |
| 5.2.3 | Vorgehen zur Ableitung der Skalierung mittels Dimensionsanalyse | 71 |
| 5.2.4 | Versuchsdurchführung | 73 |
| 5.2.5 | Auswertung der Versuche zur Skalierung am Beispiel der Federkraft | 74 |
| 5.3 | Ergebnis zur Modellbildung der Kupplung und Ableitung der Skalierungsfaktoren | 75 |
| 5.3.1 | Mathematische Beschreibung der Kupplung | 76 |
| 5.3.2 | Skalierungsfaktoren | 77 |
| 5.4 | Verifikation des Skalierungsmodells am sCiL-Prüfstand | 81 |
| 5.5 | Diskussion der Skalierung bezüglich der Federvorspannkraft..... | 86 |
| 5.6 | Fazit und Beantwortung der Forschungsfrage | 87 |
| 6 | Skalierung der Leistungsgrößen am Beispiel der Baugröße einer Überlastkupplung | 91 |
| 6.1 | Zielsetzung und Hypothese | 93 |
| 6.2 | Untersuchungsmethode und Versuchsaufbau | 94 |
| 6.2.1 | Überlastkupplung als Beispielsystem | 95 |
| 6.2.2 | Prüfstand und virtuelle Kopplung | 97 |
| 6.2.3 | Vorgehen zur Ableitung der Skalierung..... | 100 |
| 6.2.4 | Versuchsdurchführung | 100 |

| | | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 6.2.5 | Auswertung | 101 |
| 6.3 | Ergebnis zur Skalierung bezüglich der Baugröße..... | 102 |
| 6.3.1 | Modellunterschiede der Kupplung | 103 |
| 6.3.2 | Skalierungsfaktoren..... | 104 |
| 6.3.3 | Verifikation der Skalierungsfaktoren am sCiL-Prüfstand..... | 107 |
| 6.4 | Diskussion zur Skalierung bezüglich Baugröße..... | 112 |
| 6.5 | Fazit und Beantwortung der Forschungsfrage..... | 114 |
| 7 | Geometrieuntersuchungen einer skalierten Überlastkupplung eines Akkuboehrschraubers | 117 |
| 7.1 | Zielsetzung und Hypothese | 117 |
| 7.2 | Untersuchungsmethode und Versuchsaufbau..... | 118 |
| 7.2.1 | Bauteilvarianten der Überlastkupplung | 118 |
| 7.2.2 | Versuchsaufbau..... | 121 |
| 7.2.3 | Versuchsdurchführung..... | 122 |
| 7.3 | Ergebnis und Vergleich der Geometrievarianten | 123 |
| 7.4 | Diskussion zur Skalierung bezüglich Geometrieänderung..... | 126 |
| 7.5 | Fazit und Beantwortung der Forschungsfrage..... | 128 |
| 8 | Übertrag der Ergebnisse und Beitrag zur frühen Absicherung | 131 |
| 8.1 | Ansatz und Untersuchungsumgebung..... | 131 |
| 8.1.1 | Aufbau und Architektur der Untersuchungsumgebung | 132 |
| 8.1.2 | Einsatzszenarien einer virtuellen Kopplung | 134 |
| 8.2 | Beschreibung der sCiL-Validierungsmethode..... | 135 |
| 8.3 | Vorgehensweise zur Entwicklung des Skalierungsmodells..... | 137 |
| 8.4 | Integration der Validierungsmethode | 139 |
| 9 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 143 |
| 9.1 | Zusammenfassung..... | 143 |
| 9.2 | Ausblick..... | 145 |
| | Literaturverzeichnis | I |
| | Glossar | XXI |
| | Symbolverzeichnis..... | XXIII |
| A | Anhang – Beispieluntersuchungen | XXV |
| A1 | Vergleich Getriebevarianten | XXV |
| A2 | Untersuchungsumgebung..... | XXIX |
| A3 | Untersuchungsumgebung für TF 1 | XXX |
| A4 | Untersuchungsumgebung für TF 2 und TF 3..... | XXXI |
| B | Anhang – Validierungsmethode..... | XXXIII |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1.1: | Frühe Absicherung durch Einbindung von verfügbaren Komponenten | 3 |
| Abbildung 1.2: | Fokus der vorliegenden Forschungsarbeit..... | 4 |
| Abbildung 1.3: | Gliederung der Forschungsarbeit | 5 |
| Abbildung 2.1: | Übersicht über den relevanten Stand der Forschung..... | 7 |
| Abbildung 2.2: | Möglichkeit der Kostenbeeinflussung und -beurteilung im Produktentwicklungsprozess | 12 |
| Abbildung 2.3: | Frontloading ermöglicht eine Verkürzung der Entwicklungszeit | 13 |
| Abbildung 2.4: | Übersicht über die Testaktivitäten bei der Systementwicklung und Produktion. | 18 |
| Abbildung 2.5: | Reduzierte Darstellung des X-in-the-Loop-Frameworks am Beispiel eines Fahrzeugs..... | 22 |
| Abbildung 2.6: | X-in-the-Loop-Framework für Elektrowerkzeuge..... | 24 |
| Abbildung 2.7: | Entwicklungsprozess für handgehaltene Geräte..... | 27 |
| Abbildung 2.8: | Akkuboehrschrauber (GSR 18-2-LI Plus des Elektrowerkzeugherstellers Robert Bosch GmbH)..... | 30 |
| Abbildung 2.9: | Komponenten des Akkuboehrschraubers | 31 |
| Abbildung 2.10: | Komponenten einer Überlastkupplung und Drehmomentverlauf einer symmetrischen Überlastkupplung, | 32 |
| Abbildung 2.11: | Mechanische Überlastkupplung..... | 33 |
| Abbildung 2.12: | Geometrische Skalierung eines Dreiecks. | 36 |
| Abbildung 2.13: | Vorgehen bei der Skalierung | 42 |
| Abbildung 2.14: | Fazit zum Stand der Forschung..... | 48 |
| Abbildung 4.1: | Vorgehen zur skalierten Absicherung in der Produktentwicklung..... | 55 |
| Abbildung 4.2: | Forschungsvorgehen zur Beantwortung der aufgestellten Teilforschungsfragen | 56 |
| Abbildung 4.3: | Lösungsansatz zur Einbindung von skalierten Prototypen in das Gesamtsystem..... | 58 |
| Abbildung 4.4: | Struktur der skalierten Absicherung. | 59 |

| | | |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 4.5: | Beispielhafte XiL-Architektur für skalierte Absicherung | 60 |
| Abbildung 4.6: | Einbindung der Skalierung über die virtuelle Kopplung | 61 |
| Abbildung 5.1: | Übersicht der Untersuchung zur 1. Teilforschungsfrage | 64 |
| Abbildung 5.2: | Virtuelle Kopplung von mechanischen Teilsystemen | 65 |
| Abbildung 5.3: | Beispielsystem für die Untersuchung zu TF 1 | 67 |
| Abbildung 5.4: | Sequenzmodell der Kupplungsauslösung | 68 |
| Abbildung 5.5: | Theoretische Betrachtung der Funktionsweise der Überlastkupplung | 68 |
| Abbildung 5.6: | Einbindung der Skalierungsmodelle in die virtuelle Kopplung .. | 69 |
| Abbildung 5.7: | sCiL-Prüfstand zur Durchführung der Verifikation | 70 |
| Abbildung 5.8: | Vorgehen zur Ableitung der Skalierung | 72 |
| Abbildung 5.9: | Versuchsreihen zur Überprüfung der Hypothesen..... | 74 |
| Abbildung 5.10: | Verifikations-Testaufbau zur Bewertung der Skalierung | 75 |
| Abbildung 5.11: | Kupplung mit der in der Skalierung berücksichtigten Längenänderungen | 76 |
| Abbildung 5.12: | Integration der Skalierungsfaktoren in die virtuelle Kopplung .. | 81 |
| Abbildung 5.13: | Drehmomentkurven der Kupplungsauslösung..... | 83 |
| Abbildung 5.14: | Box-Plot der Kupplungsdrehmomente..... | 84 |
| Abbildung 5.15: | Box-Plot der Kupplungsdrehmomente..... | 85 |
| Abbildung 5.16: | Vorgehen zur Ableitung der Skalierung | 89 |
| Abbildung 6.1: | Übersicht der Untersuchung zu TF 2..... | 92 |
| Abbildung 6.2: | Beispielsystem für die Untersuchung zu TF 2 | 95 |
| Abbildung 6.3: | Unterschiedliche Zustände im Planetengetriebe | 96 |
| Abbildung 6.4: | Systemeigenschaften der Kupplung..... | 97 |
| Abbildung 6.5: | Einbindung der Skalierung in die virtuelle Kopplung..... | 98 |
| Abbildung 6.6: | sCiL-Prüfstand zur Durchführung der Verifikation | 99 |
| Abbildung 6.7: | Versuchsreihen zur Überprüfung der Hypothesen..... | 101 |
| Abbildung 6.8: | Verifikations-Testaufbau zur Bewertung der Skalierung | 102 |
| Abbildung 6.9: | Unterschiede der betrachteten Teilsystemvarianten..... | 103 |
| Abbildung 6.10: | Skalierungsfaktoren zum Ausgleich der Größenstufe..... | 107 |
| Abbildung 6.11: | Drehmomentkurven der Kupplungsauslösung..... | 108 |
| Abbildung 6.12: | Kupplungsmomente der betrachteten Versuche..... | 109 |
| Abbildung 6.13: | Verteilung des Kupplungsdrehmoments..... | 110 |

| | | |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Abbildung 6.14: | Bewertung der Anregung durch die Kupplungsauslösungen | 111 |
| Abbildung 6.15: | Verteilung der Auslösefrequenz..... | 112 |
| Abbildung 7.1: | Unterschiede der Laufbahngeometrie..... | 119 |
| Abbildung 7.2: | Qualitativer Verlauf des Drehmoments bei aktiver Überlastkupplung..... | 119 |
| Abbildung 7.3: | Untersuchungssetup für die Variantenuntersuchung | 121 |
| Abbildung 7.4: | sCiL-Prüfstand zur Durchführung der Verifikation | 122 |
| Abbildung 7.5: | Komponenten zur Überprüfung der Hypothese..... | 123 |
| Abbildung 7.6: | Reibmoment der beiden Gestaltvarianten..... | 124 |
| Abbildung 7.7: | Vergleich der Kupplungsmomente | 125 |
| Abbildung 8.1: | Struktur der skalierten Absicherung | 132 |
| Abbildung 8.2: | Beispielhafte XiL-Architektur für skalierte Absicherung | 133 |
| Abbildung 8.3: | Koppelsysteme und virtuelle Kopplung | 134 |
| Abbildung 8.4: | Schritte der sCiL-Validierungsmethode..... | 135 |
| Abbildung 8.5: | Vorgehensweise zur Entwicklung des Skalierungsmodells ... | 137 |
| Abbildung 8.6: | Einordnung der Validierungsmethode in einen Luftfahrtentwicklungsprozess..... | 140 |
| Abbildung 8.7: | Einordnung der Validierungsmethode..... | 141 |
| Abbildung A.1: | Untersuchungsumgebung und zeitliche Anordnung der möglichen Versuche | XXIX |
| Abbildung A.2: | Foto Untersuchungsumgebung TF 1 | XXX |
| Abbildung A.3: | Benennung und Anordnung der Komponenten TF 1..... | XXX |
| Abbildung A.4: | Foto Untersuchungsumgebung TF 2 und TF 3 | XXXI |
| Abbildung A.5: | Benennung der Komponenten TF 2 und TF 3..... | XXXII |
| Abbildung B.6: | Einordnung der Validierungsmethode in einen Luftfahrtentwicklungsprozess..... | XXXIII |
| Abbildung B.7: | Einordnung der Validierungsmethode..... | XXXIV |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 2.1: | Grundähnlichkeiten | 38 |
| Tabelle 2.2: | Spezielle Ähnlichkeitsbeziehungen | 39 |
| Tabelle 2.3: | Internationales Einheitensystem..... | 40 |
| Tabelle 5.1: | Ergebnis der Dimensionsanalyse..... | 78 |
| Tabelle 5.2: | Zusammenfassung der Skalierungsfaktoren der betrachteten Parameter | 80 |
| Tabelle 5.3: | Maximales Drehmoment der Kupplungsauslösung | 82 |
| Tabelle 6.1: | Ergebnis der Dimensionsanalyse..... | 105 |
| Tabelle 6.2: | Zusammenfassung der Skalierungsfaktoren der betrachteten Parameter | 106 |
| Tabelle 6.3: | Maximales Drehmoment der Kupplungsauslösung | 109 |
| Tabelle 7.1: | Kenngößen zur Bewertung der Geometrievarianten. | 124 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------|-------------------------------------------|
| IPEK | Institut für Produktentwicklung am KIT |
| KIT | Karlsruher Institut für Technologie |
| PGE | Produktgenerationsentwicklung |
| FF | Forschungsfrage |
| TF | Teilforschungsfrage |
| GV | Gestaltvariation |
| PV | Prinzipvariation |
| ÜV | Übernahmevariation |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure e.V. |
| DIN | Deutsches Institut für Normung e.V. |
| XiL | X-in-the-Loop |
| sCiL | scaled-Components-in-the-Loop |
| HiL | Hardware-in-the-Loop |
| SiL | Software-in-the-Loop |
| MiL | Model-in-the-Loop |
| UUT | Unit-Under-Test |
| SUT | System-Under-Test |
| DUT | Device-Under-Test |
| ZHO | Zielsystem, Handlungssystem, Objektsystem |

1 Einleitung

1.1 Bedarf und Thema der Arbeit

Der Wettbewerbsdruck auf den verschiedenen Märkten zwingt Unternehmen zu einer schnellen Produktentwicklung sowie einer Verkürzung der Entwicklungszeit. Zusätzlich verlangt der Markt an seine Bedürfnisse angepasste Produkte. Dies führt für die Unternehmen zu einer hohen Variantenanzahl. Gerade für Unternehmen, die ein breites Produktspektrum anbieten, stellt die umfassende Absicherung aller Produktvarianten eine Herausforderung dar.

Die Produktentwicklung erfolgt häufig unter Nutzung von Baureihen und Baukästen (Krause & Gebhardt, 2018, S. 144). Beispiele für derartige Produkte sind Elektrowerkzeuge, wie Akkuboehrschrauber, Winkelschleifer und Bohrhämmer, aber auch andere Produkte mit rotatorischen Antriebssträngen die in unterschiedlichen Ausführungen für die verschiedenen Kundenbedürfnisse angeboten werden.

Die steigende Anzahl an unterschiedlichen Produktvarianten ist für die Absicherung in der Produktentwicklung zunehmend herausfordernd, da es Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten der Varianten gibt. Eine durchgängige Absicherung der Funktionserfüllung ist jedoch für die Zufriedenheit und den Erfolg des Unternehmens am Markt von großer Bedeutung. Werden die Wechselwirkungen der Systeme nicht berücksichtigt, kann es zu unzuverlässigen Produkten kommen, die eine negative Wahrnehmung am Markt hervorrufen.

Der Wunsch des Marktes nach wiederkehrend neuen Produkten mit erweiterten Funktionen erfordert zusätzlich eine Verkürzung der Entwicklungszeit. Dabei gilt nach Grabowski und Geiger (1997) das „Paradox der Konstruktion“. Früh in der Entwicklung kann viel bewegt werden, die Auswirkungen sind jedoch unbekannt. Später kann leichter beurteilt werden, aber Änderungen sind schwerer durchzuführen. (Grabowski & Geiger, 1997)

Neben der Steigerung der Ergebnisqualität ist die Verlagerung der Eigenschaftsanalyse in frühere Entwicklungsphasen wichtig, um die Entwicklungszeit zu verkürzen. Ein Ansatz zur Verkürzung der Entwicklungszeit ist das Frontloading, darunter wird die eine Verschiebung der Absicherung in frühere Entwicklungsphasen ver-

standen (vgl. Thomke & Fujimoto, 2000). Ziel ist es dabei, möglichst früh die wichtigen Produkteigenschaften zu testen und abzusichern. Durch die frühe Absicherung können späte und damit teure Designänderungen vermieden werden (vgl. Lindemann, 2009; Thomke & Fujimoto, 2000). Zur Unterstützung des Frontloading wird auf unterschiedliche Test- und Validierungsansätze zurückgegriffen.

Der Entwicklungsaufwand eines Unternehmens ist aus wirtschaftlichen Gründen limitiert und muss an die aktuelle Entwicklung und die geplanten Stückzahlen angepasst werden. Besonders bei neuen und komplexen Produkten wird in der Produktentwicklung versucht, aus den Erfahrungen und dem Wissen von vergangenen Projekten zu profitieren. Produktinnovationen werden häufig durch eine geschickte Kombination von erfolgreichen alten Designs und neuen Ideen erzielt. Die Produktentwicklung jedes neuen technischen Produkts wird auch als die Entwicklung einer neuen Produktgeneration verstanden (Albers, Rapp, Birk & Bursać, 2017). Um die Aufwände in der Produktentwicklung zusätzlich zu reduzieren, erfolgt die Entwicklung von Produkten unter Zuhilfenahme von Baureihen. Die jeweiligen technischen Produkte unterscheiden sich dabei durch die Ausprägung einzelner Eigenschaften, die durch Skalieren variiert werden.

Um Ressourcen zu sparen, werden Komponenten und Wissen aus bestehenden Produkten und Baureihen übernommen und entsprechend den neuen Entwicklungszielen geändert oder modifiziert. Durch die hohe Variantenvielfalt (Krause & Gebhardt, 2018, S. 51) und die Nutzung von bestehenden Komponenten wird eine angepasste Absicherung notwendig, um die Erfüllung der Kundenanforderungen möglichst früh im Entwicklungsprozess zu überprüfen. Wichtig ist dabei, das Produkt als Gesamtsystem mit den bestehenden Wechselwirkungen zu den interagierenden Systemen bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung abzusichern.

Eine Möglichkeit der frühen Absicherung bietet der Einsatz von X-in-the-Loop-Prüfständen¹ (Albers, Düser & Ott, 2008), in welchem die relevanten Funktionseigenschaften des Gesamtsystemverhaltens berücksichtigt werden und Untersuchungen mit noch nicht vollständig entwickelten Systemen möglich sind. Der XiL-Ansatz unterstützt die Einbindung der zu untersuchenden Komponente in die umgebenden und interagierenden Systeme durch Koppelsysteme. Dabei können Prototypen und andere verfügbare Komponenten in der Absicherung genutzt werden. Zusätzlich können Simulationsmodelle bekanntes Verhalten abbilden und in die Absicherung

¹ X-in-the-Loop-Prüfstände werden in der weiteren Arbeit auch als XiL-Prüfstände bezeichnet.

einbringen. Durch den XiL-Ansatz wird eine gemischt physisch/virtuelle Absicherung im Gesamtsystem unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen möglich.

Von großer Bedeutung für die Industrie ist es, späte, langwierige und mit hohem wirtschaftlichem Verlust verbundene Iterationen im Entwicklungsprozess durch den Einsatz von neuen Validierungsmethoden zu reduzieren. Gerade für sicherheitskritische Komponenten in Antriebssträngen ist eine frühe Absicherung im Gesamtsystem unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen essenziell. Zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens ist eine Unterstützung des Frontloading erforderlich. Für die Absicherung werden in Unternehmen Simulations- und Prüfstandsuntersuchungen genutzt. Bei Prüfstandsuntersuchungen (siehe Abbildung 1.1) ist eine Einbindung des Gesamtsystems innerhalb der Testumgebung erforderlich. Durch die Nutzung von Komponenten anderer Größenstufe ergeben sich Möglichkeiten, die Absicherung vorzuziehen (siehe Abbildung 1.1). Notwendig ist für eine noch frühere Absicherung, dass verfügbare Komponenten anderer Größenstufen und Teilsysteme aus vorangegangenen Produktgenerationen in Testumgebungen eingesetzt werden, bevor Serienteile vorliegen und nutzbar sind.

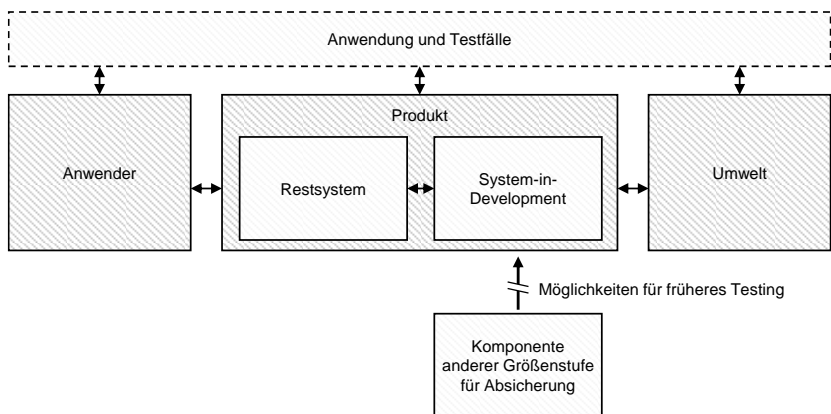


Abbildung 1.1: Frühe Absicherung durch Einbindung von verfügbaren Komponenten, beispielsweise anderer Größenstufe in einer Testumgebung. (angepasst aus Albers, Behrendt, Klingler & Matros, 2016; Steck, Matthiesen & Gwosch, 2022)

In der Wissenschaft sind weiterführende Forschungsaktivitäten notwendig, um Testumgebungen und dazu passende Methoden für die frühe Absicherung von Antriebsstrang-Teilsystemen unterschiedlicher Größenstufe bereitzustellen.

1.2 Fokus der Arbeit

Zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen ist der Einsatz von Maßnahmen im Entwicklungsprozess, welche das Frontloading unterstützen, notwendig. Eine Herausforderung ergibt sich, wenn für eine frühe Absicherung auf einer X-in-the-Loop (XiL)-Plattform nur bestehende Versuchsmuster anderer Baugröße oder anderer Produktgenerationen zur Verfügung stehen.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird ein Ansatz zur Unterstützung des Frontloading aufgezeigt und an einem Beispielsystem aus einem Akkubohrschrauber in drei Untersuchungen angewandt. Dazu werden Maßnahmen vorgestellt, die den breiten Einsatz von frühen Prototypen zur Absicherung von Antriebssträngen und eine vorgezogene Validierung in XiL-Plattformen erlauben. Die Unterstützung des Frontloading soll durch die Einbindung von verfügbaren Antriebsstrang-Teilsystemen anderer Größenstufe in einer XiL-Plattform und die simulative Ergänzung der physisch fehlenden Eigenschaften des zu entwickelnden Teilsystems erreicht werden. Die Arbeit stellt einen Ansatz vor, um Antriebsstrang-Teilsysteme unterschiedlicher Größenstufe gemeinsam hinsichtlich der Funktionserfüllung untersuchen zu können. Die Wechselwirkungen der interagierenden Teilsysteme werden trotz unterschiedlicher Größenstufe berücksichtigt. Dazu werden Skalierungsmodelle und Koppelsysteme in einem XiL-Prüfstand genutzt. Die Umsetzung des Ansatzes wird beispielhaft an den Antriebsstrangkomponenten eines Akkubohrschraubers gezeigt. Die Untersuchungsbeispiele orientieren sich an aktuellen Herausforderungen in der Produktentwicklung von Teilsystemen mit Wechselwirkungen.

Abbildung 1.2 zeigt die adressierten Forschungsthemen mit Bezug zur vorliegenden Forschungsarbeit und benennt den Fokus der Forschungsarbeit.

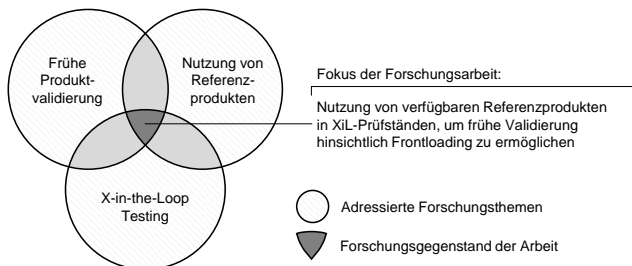


Abbildung 1.2: Fokus der vorliegenden Forschungsarbeit

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Forschungsarbeit ist in neun Kapitel unterteilt. Die Einteilung der Kapitel dieser Ausarbeitung können der Abbildung 1.3 entnommen werden. Der nachfolgend erläuterte Aufbau der Forschungsarbeit dient dazu, einen Überblick über die Ausarbeitung zu geben, und auf relevante Themen hinzuweisen.

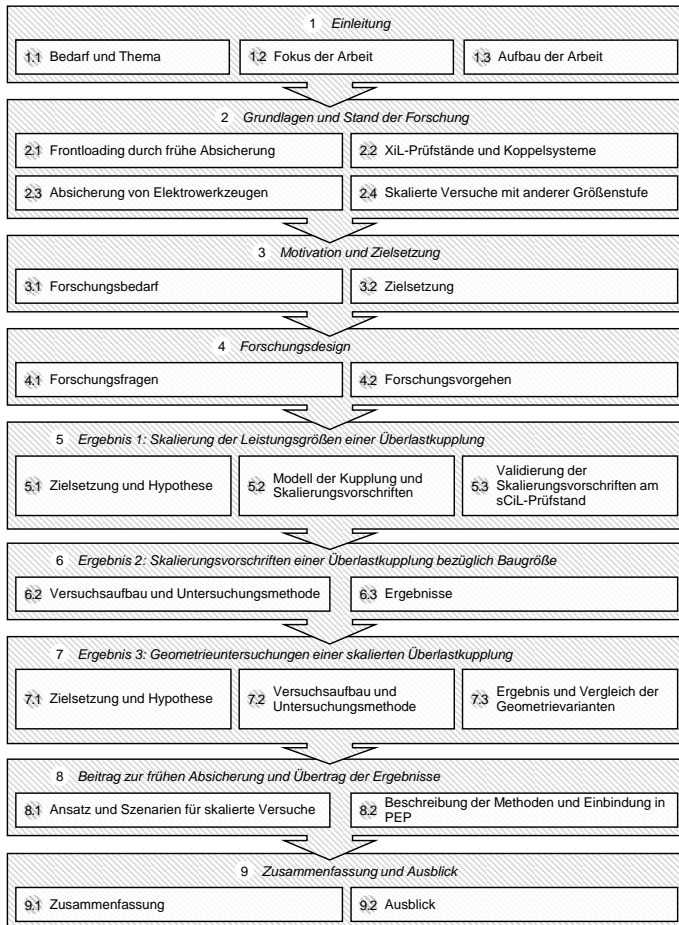


Abbildung 1.3: Gliederung der Forschungsarbeit

In Kapitel 1 wurde bereits auf das Forschungsthema und den Bedarf der Arbeit eingegangen. Die Einleitung beschreibt kurz die derzeitige Situation und erläutert die Notwendigkeit des Forschungsthemas.

Kapitel 2 behandelt den Stand der Forschung. Hierzu werden aktuelle Themen mit Bezug zur frühen Absicherung betrachtet. Dabei wird auf XiL-Prüfstände und Kopplensysteme sowie skalierte Versuche eingegangen. Dieses Kapitel stellt die Grundlage für das Verständnis der weiteren Forschungsarbeit dar. Das Fazit fasst den relevanten Stand der Forschung zusammen und leitet daraus den Forschungsbedarf ab.

Das Kapitel 3 beschreibt basierend auf dem Fazit zum Stand der Forschung die Motivation und die Zielsetzung der Forschungsarbeit. Der wissenschaftliche Beitrag wird hier aufgezeigt. Im Anschluss an den Stand der Forschung wird die Zielsetzung erläutert.

Das Kapitel 4 beschreibt das Forschungsdesign. Dazu werden aus der Zielstellung Forschungsfragen und Teilforschungsfragen abgeleitet und eine Vorgehensweise zur Beantwortung dieser aufgezeigt. Der dargestellte Lösungsansatz bildet die Grundlage für die anschließenden Untersuchungen.

Anschließend wird in Kapitel 5 der Ansatz zur Anpassung von rotatorischen Leistungsgrößen zwischen miteinander verbundenen Systemen abgeleitet und verifiziert. Dazu werden für ein Beispielsystem der Überlastkupplung Leistungsfaktoren abgeleitet und in Prüfstandsuntersuchungen bewertet.

In Kapitel 6 werden weitere Einflüsse in das Skalierungsmodell eingebunden, um eine veränderte Baugröße zu berücksichtigen. Anhand von Prüfstandsuntersuchungen wird die Skalierung zur gemeinsamen Absicherung von miteinander verbundenen Systemen gezeigt.

In Kapitel 7 werden Gestaltvarianten einer Überlastkupplung in skalierten Untersuchungen betrachtet. Anhand von Prüfstandsuntersuchungen werden Überlastkupplungen mit veränderter Gestalt untersucht.

Kapitel 8 greift die erzielten Ergebnisse dieser Forschungsarbeit auf und leitet daraus den Beitrag zur frühen Absicherung ab. Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen wird eine Validierungsmethode beschrieben und eine Möglichkeit zur Integration in den Produktentwicklungsprozess vorgeschlagen.

In Kapitel 9 wird die Ausarbeitung zusammengefasst und mit einem Ausblick auf weiterführende Forschung abgeschlossen.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die theoretischen Grundlagen der Forschungsarbeit und stellt den aktuellen Stand der Forschung dar. Aufbauend auf dem Verständnis der Absicherung in der Produktentwicklung beschreibt Kapitel 2.2 aktuelle Ansätze für XiL-Prüfstände und Koppelsysteme. Kapitel 2.3 gibt einen Überblick über die Grundlagen zur Untersuchung von Elektrowerkzeugen. Kapitel 2.4 stellt Ansätze der Ähnlichkeitsmechanik vor. Abschließend wird in Kapitel 2.5 ein Fazit zum aktuellen Stand der Forschung gezogen und die bestehende Lücke aufgezeigt.

Forschungsthemen mit Bezug zur Forschungsarbeit und notwendige Grundlagen sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

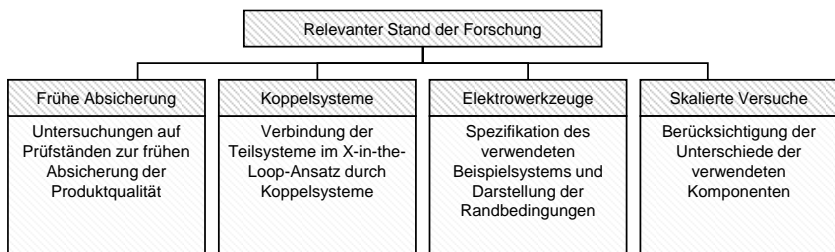


Abbildung 2.1: Übersicht über den relevanten Stand der Forschung. Dargestellt sind Forschungsthemen mit Bezug zur Forschungsarbeit und wichtige Grundlagen.

2.1 Frontloading durch frühe Absicherung in der Produktentwicklung

In diesem Kapitel werden Grundlagen aus Lehrbüchern (z. B. Albers und Behrendt et al. 2016 und Matthiesen 2021) einbezogen. Die Beschreibungen der genannten Buchautoren sind in folgende Aufarbeitung eingeflossen.

2.1.1 Absicherung in der Produktentwicklung

Produktentwicklung bezeichnet die Aktivität innerhalb eines Unternehmens, die darauf abzielt „funktionsfähige und produzierbare Produkte zu generieren, die am Markt erfolgreich sind“ (Ebel, 2015, S. 34). Das produzierbare Produkt wird nach Matthiesen (2021) in der Gestaltung definiert, in dem aus dem Konzept der Entwurf und das Produkt definiert wird. Dabei wird die Produktgestalt durch die Beschreibung ihrer geometrischen und stofflichen Merkmale festgelegt.

Nach Matthiesen (2021) ist die Gestaltung „eine schwierige und langwierige Aufgabe in der Produktentwicklung.“ Begründet wird dies damit, dass „eine Vielzahl von Anforderungen und Randbedingungen gleichzeitig beachtet werden (siehe hierzu Wittel, Muhs, Jannasch & Voßiek, 2013), andererseits entscheidet die Festlegung der konstruktiven Details über die Güte der Funktionserfüllung und die Herstellkosten des Produkts.“ (Matthiesen, 2021)

Erfolgreiche Produktentwicklung hängt nach Matthiesen stark von einer erfolgreichen Gestaltung ab. Matthiesen (2021) beschreibt dazu: „Gut funktionierende Produkte unterscheiden sich dabei oft nicht durch das gewählte Konzept, sondern durch die Details in der Produktgestalt von solchen, die nicht so gut funktionieren.“ Laut Cross (2008) liegt ein Großteil der Ingenieurstätigkeit in der Änderung und Modifikation von bestehenden Produkten.

In der Gestaltung sollte die kritische Funktion so früh wie möglich durch einen Funktionsprototyp überprüft werden. Wichtig ist dabei, dass Vermutungen durch geeignete Überprüfungen, wie beispielsweise durch den Test eines Funktionsprototyps, in Erkenntnisse überführt werden. Das Verständnis von Matthiesen folgt dem Grundgedanken von Albers und Behrendt et al. (2016), dass durch eine kontinuierliche Validierung im Entwicklungsprozess der erreichte Entwicklungsstand mit den Zielen und Zwecken des Produkts abgeglichen wird.

Albers beschreibt auf Basis seiner Forschung an Produktentstehungsprozessen, dass die Validierung die zentrale Aktivität im Entwicklungsprozess ist (Albers, Behrendt et al., 2016). Dieses Verständnis wird auch in der DIN EN ISO 9000:2015-11 beschrieben, dort wird die Absicherung der Anforderungserfüllung als eine zentrale Aktivität in der Produktentwicklung dargestellt. (DIN EN ISO 9000:2015-11)

Nach Albers, Sadowski und Marxen (2011) können nur durch die Validierung neue Erkenntnisse gewonnen werden. Zur Erhöhung des Kenntnisstands bezüglich der Produkteigenschaften dient nach Lindemann auch die Eigenschaftsanalyse, um mögliche Fehler zu erkennen und Schwachstellen aufzuzeigen. Als Möglichkeiten

zur Eigenschaftsanalyse schlägt Lindemann (2009) Berechnungen, Simulationen und Versuche vor. Die Validierung trägt ganz erheblich zum Wissensgewinn und letztendlich zur erfolgreichen Produktentwicklung bei (Albers in Düser, 2010 und Freudenmann, 2014). Validierungsprozesse werden deshalb immer früher im Produktentwicklungsprozess notwendig (Albers, Behrendt et al., 2016).

2.1.1.1 Verständnis von Validierung und Verifikation

Im Kontext der Produktentwicklung herrscht kein einheitliches Verständnis für die Begriffe zur Beschreibung der Eigenschaftsanalyse und der Absicherung. Die Begriffe Validierung, Verifikation, Absicherung und Test werden unterschiedlich genutzt und disziplin- und kontextspezifisch verstanden (siehe DIN EN ISO 9000:2015-11; VDI 2206)

Unabhängig von den verwendeten Begriffen haben jedoch alle darunterfallenden Aktivitäten das Ziel der Absicherung der Produktentwicklung, um Risiken zu reduzieren und die Qualität des Produktes zu verbessern. Nur dadurch kann größtmögliche Kundenzufriedenheit erzielt werden.

In der Literatur¹ werden für die Aktivitäten unterschiedliche Begriffe verwendet:

Verifikation:

Unter Verifikation ist „[. . .] die Überprüfung zu verstehen, ob eine Realisierung (z.B. ein Software-Programm) mit der Spezifikation (in diesem Fall mit der Algorithmenbeschreibung) übereinstimmt.“ (VDI 2206)

Validierung:

Unter Validierung ist „[. . .] die Prüfung zu verstehen, ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt. Hier geht die Erwartungshaltung des Fachexperten und des Anwenders ein.“ (VDI 2206)

¹ Entnommen aus Albers, Behrendt, Klingler und Matros (2016).

Dieses Verständnis wird in der VDI 2206 in Bezug auf die Modellbildung ebenfalls deutlich:

„Die Verifikation ermittelt, ob ein Modell grundsätzlich plausibel und richtig ist und ob es den eingangs aufgestellten Anforderungen genügt. Eine Aussage, ob das erstellte Modell ein reales System hinreichend beschreibt und damit auch eventuell nicht spezifizierte Anforderungen erfüllt, liefert die Validierung [. . .].“ (VDI 2206)

Im Zuge der Verifikation wird nicht überprüft, ob das technische System einen Nutzen für Kunden/-innen, Anwender/-innen oder Unternehmen erfüllt und ob das definierte Zielsystem für diese Gruppe überhaupt relevant ist. (Albers & Düser, 2011; Albers, Behrendt et al., 2016)

Die Validierung geht hier weiter und prüft zudem den Nutzen eines Produktes hinsichtlich der Anforderungen des Marktes und der Unternehmen.

Die Validierung beantwortet damit die Frage, ob das richtige Produkt entwickelt wird, während die Verifikation prüft, ob ein korrektes Produkt entwickelt wird. (VDI 2206, 2004)

Die VDI 2206 (2004) definiert als Überbegriff der beiden Begriffe Verifikation und Validierung die Eigenschaftsabsicherung (VDI 2206). In der Eigenschaftsabsicherung können zum einen ganz konkrete technische Anforderungen oder auch eher vage Hypothesen validiert werden. Liegt der Fokus auf der Validierung von Hypothesen, wird häufig der Begriff Experiment benutzt (Freudenmann, 2014). In allgemeinerem Fall wird üblicherweise der Begriff Test verwendet. (Ebel, 2015)

Steht dabei das Erforschen des Verhaltens des zu testenden Systems im Vordergrund, spricht man nach Engel (2010) auch von explorativem Testen. Beim explorativen Testen steht das Sammeln von Erkenntnissen über das System im Vordergrund. Es erfolgt also keine Prüfung hinsichtlich eines erwarteten Ergebnisses, sondern der Test ist ergebnisoffen (Engel, 2010). Das durch exploratives Testen gewonnene Wissen über ein Produkt kann in zukünftigen Produktentstehungsprozessen genutzt werden.

In der industriellen Praxis wird häufig der Begriff Absicherung verwendet. Hiermit werden alle Testaktivitäten eines Entwicklungsprojektes zusammengefasst, von der Materialerprobung bis hin zu Versuchsfahrten oder Dauerlauftests. In dieser Forschungsarbeit wird aus Gründen einer durchgängigen Bezeichnung der Begriff Absicherung mit der Bedeutung als Eigenschaftsabsicherung verwendet. (Albers, Behrendt et al., 2016)

Die Validierung muss nach aktuellem Verständnis kontinuierlich über die gesamte Entwicklungszeit hinweg und von deren Beginn an erfolgen. Nur durch eine stetig steigende Wissensbasis kann sichergestellt werden, dass die Produkte später am Markt erfolgreich sind. (Albers, Behrendt et al., 2016)

Frühes Wissen zu neuen Teilsystemen ist für aktuelle Produktentwicklungen zunehmend wichtiger. Validierungsprozesse werden deshalb immer früher in den Produktentwicklungsprozess eingebunden (Albers, Behrendt et al., 2016). Aktuelle Maßnahmen zur Reduktion des Entwicklungsaufwands und etablierte Testansätze werden nachfolgend betrachtet.

2.1.2 Reduktion von Entwicklungsaufwand

In der Entwicklung ergibt sich der Bedarf an früher Validierung durch die notwendigen Änderungskosten, um auf die Validierungsergebnisse reagieren und nachbessern zu können. Fließen Validierungsergebnisse jedoch erst später ein, ist eine Anpassung mit einem erheblich größeren Aufwand verbunden. Beschreiben lässt sich dieser Zusammenhang anhand der Zehnerregel (Rule of Ten), welche eine Steigerung der Änderungskosten um den Faktor 10 von einer Entwicklungsphase zur nächsten beziffert (Ehrlenspiel, 2009). In der Praxis werden Produktänderungen häufig erst spät veranlasst und verursachen dadurch hohe Kosten.

Ein Vorteil ergibt sich, wenn Änderungen früh angegangen werden, da diese in frühen Phasen mit relativ geringen Kosten verbunden sind (Lindemann, 2009, S. 198). Die Potenziale bzw. positiven Auswirkungen einer frühzeitigen Erkennung von Problemen und Fehlern sind entsprechend hoch. Ehrlenspiel und Meerkamm (2013) illustrieren diesen Zusammenhang anhand der Möglichkeit der Kostenbeeinflussung und -beurteilung (vgl. Abbildung 2.2).

Da die Absicherung als die aufwendigste im ganzen Produktentstehungsprozess (Albers in Düser, 2010 und Freudenmann, 2014) bewertet wird, ist es wünschenswert, dass Unsicherheiten möglichst frühzeitig eliminiert oder zumindest reduziert werden (Lindemann, 2009, S. 199). Maßnahmen, die den Entwicklungsaufwand reduzieren und früh neues Wissen generieren, sind für die Industrie besonders relevant.

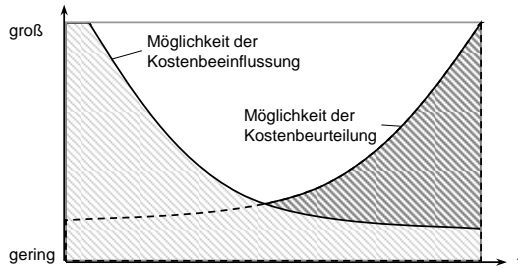


Abbildung 2.2: Möglichkeit der Kostenbeeinflussung und -beurteilung im Produktentwicklungsprozess nach Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013, S. 668

2.1.2.1 Frontloading

Frontloading ist eine häufig genutzte Möglichkeit zur Verkürzung der Entwicklungszeit und zur Reduzierung der Gesamtkosten durch die Vermeidung von späten Designänderungen. (Thomke & Bell, 2001)

Thomke und Fujimoto (2000) beschreiben Frontloading als die Verlagerung von Entwicklungsentscheidungen und -tätigkeiten in frühere Entwicklungsphasen, wodurch früher im Entwicklungsprozess Wissenslücken geschlossen und damit Unsicherheit begrenzt werden (siehe Abbildung 2.3). Durch das Identifizieren kritischer Stellen bei der Gestaltung und das anschließende Problemlösen wird die Leistungsfähigkeit in der Entwicklung gesteigert.

Lindemann (2009) beschreibt den Mehrwert von frühem Informationsgewinn in qualitativen Zusammenhängen. In Unternehmen kann dieser Mehrwert oft nicht genau beziffert werden, eine quantitative Bewertung durch Kennzahlen wird selten durchgeführt und ist damit schwierig (Lindemann, 2009, S. 159). Die durch Frontloading entstehenden Mehrkosten werden typischerweise in späteren Produktlebenszyklen wieder eingespart. Das Frontloading erlaubt durch eine zeitliche Verschiebung von Ressourcen zur Absicherung eine Verkürzung der Entwicklungszeit und eine frühere Verfügbarkeit von Wissen über die Produkteigenschaften.

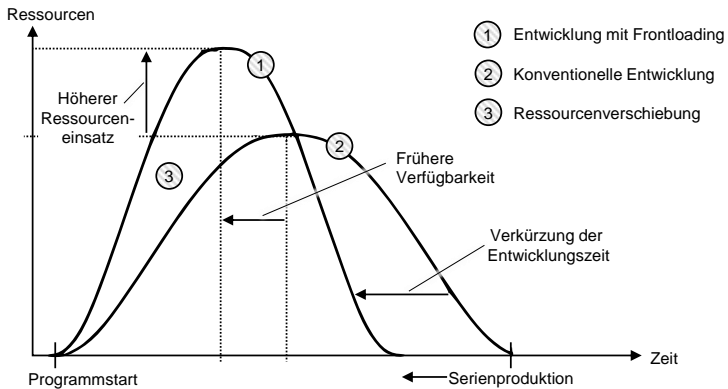


Abbildung 2.3: Frontloading ermöglicht eine Verkürzung der Entwicklungszeit (Angepasste Darstellung aus Reuter & Zimmer, 2015)

Matthiesen (2021) beschreibt die Wichtigkeit der Überprüfung der kritischen Funktion durch Funktionsprototypen. Nach Albers et al. (2011) können nur durch die Validierung neue Erkenntnisse gewonnen werden. Eine Möglichkeit zur Untersuchung bzw. Absicherung der kritischen Funktion ist der Einsatz von Entwicklungsprüfständen. Für Prüfstandsuntersuchungen ist es eine Voraussetzung, nicht vorhandene Komponenten zu simulieren (Paulweber & Lebert, 2014, S. 4).

2.1.2.2 Baureihen und Baukästen

Neue Produkte werden nicht zwingend vollständig neu entwickelt. Produktinnovationen sind immer auch ein Mix aus erfolgreichen „alten“ Designs und neuen Anteilen (Sivaloganathan & Shahin, 1999; Wyatt, Eckert & Clarkson, 2009). Die meisten Produkte entstehen durch Modifikationen, wobei insbesondere bei komplexen Produkten zuverlässig funktionierende Komponenten und Teilsysteme übernommen werden. Der technische Neuheitsgrad, die potenziellen Risiken und die erforderlichen Investitionen, zum Beispiel in Produktionsmittel, werden dadurch reduziert. (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015)

Um durch eine möglichst geringe Anzahl an Varianten in der Produktentwicklung eine hohe Variantenanzahl von Produkten am Markt zu realisieren, werden in der Entwicklung Baureihen und Baukästen genutzt. (Ponn & Lindemann, 2011)

Unter einer Baureihe versteht man technische Gebilde (Maschinen, Baugruppen oder Einzelteile), die dieselbe Funktion mit der gleichen Lösung, in mehreren Größenstufen, bei möglichst gleicher Fertigung in einem weiten Anwendungsbereich erfüllen. (Feldhusen & Grote, 2013, S. 820)

Nach Krause und Gebhardt (2018, S. 144) umfassen Baureihen eine „Reihe von Komponenten, Modulen oder Produkten, die bis auf einen oder wenige bestimmende Parameter identisch sind.“ Bei einer Baureihe können die einzelnen Attribute, wie beispielweise die Größe, variiert werden. Von einer „Baugröße der zu entwickelnden Baureihe (Maschine, Baugruppe oder Einzelteil) ausgehend, werden weitere Baugrößen nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten abgeleitet“ (Pahl & Beitz, 1974, 71-79 und 113-118). Dabei werden der Ausgangsentwurf als Grundentwurf und die abgeleiteten Baugrößen als Folgeentwürfe bezeichnet.

Die technischen Systeme der Baureihe erfüllen folglich noch das gleiche Lösungsprinzip durch dieselbe Funktion. Durch die resultierende Ähnlichkeit ermöglicht die Baureihe, in der Entwicklung und der Produktion, auf dieselben Verfahren und Werkstoffe zurückgreifen zu können. (Albers, Scherer, Bursać & Rachenkova, 2015)

Beispiele für die Verwendung von Baureihen finden sich in der Literatur in großer Zahl. Verwendung finden Baureihen bei Werkzeugmaschinen, Elektrowerkzeugen, im Automobilbau sowie bei Standardelementen, wie Kupplungen und Lagern.

Die Entwicklung von Baureihen (Krause & Gebhardt, 2018, S. 144), ist ein wesentliches Mittel zur Einsparung im Konstruktions- und Fertigungsbereich. Baureihenentwicklungen können von vornherein vorgesehen sein oder von einem bestehenden Produkt ausgehen, auch wenn dies zunächst als Einzellösung entwickelt wurde. Methoden zur Ableitung von Baureihen und praxisnahe Beispiele sind in der Literatur weit verbreitet. (Pahl & Beitz, 1974, 71-79 und 113-118)

Zusätzlich werden in der Entwicklung Baukästen genutzt, um notwendige Aufwände in der Produktentwicklung zu reduzieren: „Sind zusätzlich zur Größenstufung auch andere zugeordnete Funktionen zu erfüllen, ist neben der Baureihe ein Baukastensystem zu entwickeln“. (Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote, 2003, S. 629)

Die Baukastenentwicklung hat zum Ziel, eine hohe Variantenanzahl von Produkten am Markt durch eine geringere Anzahl an Varianten in der Produktentwicklung und der Produktion zu erreichen. (Ponn & Lindemann, 2011)

Nach Pahl et al. (2003) ergeben sich für die Hersteller folgende Vorteile:

- Die konstruktive Arbeit wird für viele Anwendungsfälle nur einmal unter Ordnungsprinzipien geleistet.
- Die Fertigung von bestimmten Losgrößen wiederholt sich und wird dadurch wirtschaftlicher.
- Es ist eher eine hohe Qualität erreichbar.

Für die Entwicklung von Baureihen sind Ähnlichkeitsgesetze zweckmäßig. Diese Gesetze werden in Kapitel 2.4.2 als generelle Hilfsmittel erläutert.

2.1.2.3 Produktgenerationsentwicklung (PGE)

Albers beschreibt jede Produktentwicklung als eine Produktgenerationsentwicklung (siehe Albers, Bursac et al., 2015). Im Sinne der Produktgenerationsentwicklung (PGE) nach Albers und Bursac et al. (2015) sind die meisten Entwicklungsprozesse keine reinen Neukonstruktionen, sondern eine Kombination aus Prinzip-, Gestalt- und Übernahmevariationen. Für eine Beschreibung der Unterschiede zwischen Prinzip-, Gestalt- und Übernahmevariationen siehe Albers und Bursac et al. (2015).

Albers und Bursac et al. (2015, S. 4) definieren die Produktgenerationsentwicklung wie folgt:

„Als Produktgenerationsentwicklung wird die Entwicklung technischer Produkte verstanden, die sowohl durch die Anpassung von Teilsystemen als Übernahmevariation (ÜV) als auch durch eine Neuentwicklung von Teilsystemen charakterisiert ist. [...] Die Anteile technischer Neuentwicklungen einzelner Funktionseinheiten können sowohl durch die Aktivität Gestaltvariation (GV) als auch durch die [...] Aktivität Prinzipvariation (PV) [...] erfolgen.“

In dieser Betrachtung werden die einzelnen Produkte als Generationen entwickelt, die in einem Zusammenhang verstanden werden.

Albers und Bursac et al. (2015, S. 4–5) weisen dabei darauf hin, dass die Gestaltvariation die häufigste Aktivität der Produktentwicklung und entgegen verbreiteter Annahmen „ebenfalls ein hochgradig kreativer und komplexer Vorgang“ ist. Das deckt sich mit den von Matthiesen aufgezeigten Herausforderungen in der Gestaltung (Matthiesen, 2021).

Die Wiederverwendung von bestehenden Modellen, Designs und kompletten Teilsystemen ist für die Reduktion der Unsicherheiten enorm wichtig. Sivaloganathan und Shahin (1999) beschreiben, dass Produktinnovationen immer ein Mix aus erfolgreichen bekannten Designs und neuen Entwicklungen sind.

Durch Anwendung methodischer Grundsätze sowie einer kontinuierlichen Dokumentation des Systemverständnisses lassen sich Modelle und Wissen wiederverwenden, die für zukünftige Entwicklungen genutzt werden können. Dementsprechend kommt dem Konzept der Produktgenerationsentwicklung eine besondere Bedeutung zu, da zum Beispiel die Erkenntnis über die Anwendung einer vorherigen Generation direkt in die Entwicklung der nachfolgenden Generation einfließen kann bzw. muss. (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 558)

Die Steigerung der Effizienz von Produktentwicklungsprozessen ergibt sich im Sinne der Produktgenerationsentwicklung (PGE) nach Albers (vgl. Albers, Bursac et al., 2015) durch die Berücksichtigung von Übernahme- bzw. Variationsanteilen, da die nachgelagerte Entwicklung der nächsten Produktgeneration bei größerem Initialwissen startet. Beispielsweise können für die Entwicklung und Validierung auch Artefakte aus Vorgängerprodukten genutzt werden. (Albers, Bursac et al., 2015)

Verstärkt wird dieser Effekt durch die Wiederverwendung von Artefakten (Modellen oder auch Validierungsumgebungen) aus Vorgängerprojekten. Referenzprodukte sind bestehende Produkte (z.B. Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukte), auf deren Basis neue Produktgenerationen entwickelt werden und deren Struktur in großen Teilen übernommen wird (Bursac, 2016, S. 38).

2.1.3 Etablierte Testaktivitäten in der Produktentwicklung

Für die Absicherung in der Produktentwicklung gibt es disziplin-, aufgaben- und produktspezifisch unterschiedliche Ausprägungen. Die Validierung erfolgt oft erfahrungsbasiert und ist geprägt durch produktspezifische Besonderheiten.

Um möglichst früh in der Produktentwicklung eine Absicherung zu ermöglichen, werden im Allgemeinen Simulation und Berechnungen sowie experimentelle Untersuchungen auf Testumgebungen mit Prototypen (siehe Lindemann, 2009, S. 157) verwendet. Siebertz, van Bebbber und Hochkirchen (2010) vergleichen Simulation und Experiment und stellen die Vor- bzw. die Nachteile übergreifend dar.

2.1.3.1 Simulation und Berechnung

Die Generierung von Erkenntnissen und die Absicherung der Anforderungen können in frühen Entwicklungsphasen durch Simulationen und Berechnungsmodelle unterstützt werden. Genutzt werden Berechnungen und Simulationen, um in den frühen Phasen der Produktentwicklung physikalische Ursachen für störende Er-

scheinungen zu klären und optimale Parameterwerte zu finden sowie Anforderungen abzusichern. Weiteres Ziel ist es nach Dresig und Fidlin (2014a, S. 5), den Einfluss von konstruktiven Parametern auf das Verhalten zu beschreiben und Erkenntnisse abzuleiten (Dresig & Fidlin, 2014b).

Die Anwendung von Berechnungsmodellen erfolgt dabei in der Regel mithilfe von Computersimulationen (vgl. Dresig & Holzweißig, 2012, S. 5). Häufig werden in diesem Umfeld die Begriffe Simulation und virtuelles Experiment verwendet. Oft existieren nur für universelle Probleme zielführende Simulationswerkzeuge.

Die Aussagekraft der Simulationsergebnisse beschränkt sich jedoch auf die in der Modellbildung berücksichtigten Systemeigenschaften (siehe hierzu Verkürzungsmerkmal nach Stachowiak (1973)). Dresig und Fidlin (2014a) heben hervor, dass ein Berechnungsmodell so einfach wie möglich sein soll.

„Ein Berechnungsmodell muss zweckmäßig und qualitativ richtig sein. Es soll so einfach wie möglich und nur so kompliziert sein, dass es die gestellten Genauigkeitsanforderungen erfüllt.“ (Dresig & Fidlin, 2014a, S. 10)

Bei rotatorischen Systemen, wie sie beispielsweise in Antriebssträngen genutzt werden, treten häufig Wechselwirkungen zwischen den interagierenden Systemkomponenten auf. Die Funktionsweise des Systems hängt häufig von diesen Wechselwirkungen ab.

Die Modellierung dieser Wechselwirkungen, soweit diese bekannt sind, bedarf eines detaillierten Systemverständnisses sowie einer umfassenden Wissensbasis. Oft führt die Modellierung dieser Wechselwirkungen zu komplizierten Modellen, in einigen Fällen ist es mit annehmbarem Aufwand nicht möglich, die relevanten Eigenschaften abzubilden. Es kann also nur das bereits bekannte Systemwissen in der Modellbildung abgebildet werden (Simon, 1996, S. 14–16). Die Herausforderung ist dabei, die für die Fragestellung relevanten Aspekte und Komponenten im Simulationsmodell zu berücksichtigen (Shannon, 1998, S. 10).

2.1.3.2 Experimentelle Absicherung

Ergänzend zu Simulationen ist die experimentelle Untersuchung auf Testumgebungen ein häufig genutztes Vorgehen in verschiedenen Stadien der Produktentwicklung. Die steigende Zahl an Testumgebungen und Prüfständen und deren Einsatz in der Produktentwicklung zeigt trotz immer umfangreicherem Einsatz von Simulationen die Relevanz in Unternehmen auf.

Nach Gwosch (2019, S. 20) begründet sich das einerseits aus dem hohes Maß an Vertrauen durch die Bewertung der Prüfstandergebnisse anhand objektiver Messwerte sowie einem sinkenden Abstraktionsniveau und vereinfachter Modellbildung.

Im Vergleich zu rein virtuellen Simulationsmodellen zeichnet sich die experimentelle Untersuchung durch die Nähe zum realen System aus. Damit kann durch den Einsatz von Hardwarekomponenten auch unbekanntes Systemverhalten abgebildet und untersucht werden. Test- und Validierungsansätze werden vor allem für die Absicherung der Anforderungen und Produkteigenschaften herangezogen.

Nach Thomke und Bell (2001, S. 320) sind Tests und Prüfstandsuntersuchungen ein wesentlicher Erfolgsfaktor in der Produktentwicklung. Die in der Produktentwicklung eingesetzten Prüfstandstypen sind vielfältig und vom Untersuchungsziel sowie dem Produkt abhängig. Häufig genutzte Testaktivität und Prüfstände stellt Engel (2010) in den zeitlichen Kontext während der Produktentwicklung (siehe Abbildung 2.4).

Früh in der Entwicklung können Komponenten- und Teilsystemtests genutzt werden, um die Funktionsweisen durch Absicherung sicherzustellen. Daran anknüpfend wird in Integrationstests die Vereinbarkeit zwischen den Systemen geprüft. Weiter im Entwicklungsprozess erfolgen dann Qualifikations-, Akzeptanz- und Zulassungstests, um die Produkte weiter gegenüber Kundenanforderungen und Randbedingungen abzusichern. Begleitend zur Produktion können Erstmuster geprüft und weitere produktionsbegleitende Tests erfolgen.

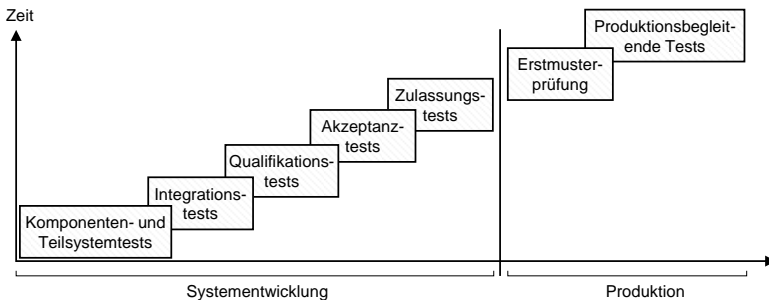


Abbildung 2.4: Übersicht über die Testaktivitäten bei der Systementwicklung und Produktion. (Darstellung basierend auf Engel, 2010, S. 444)

Für alle experimentellen Untersuchungen auf Testumgebungen bedarf es nutzbarer Systeme, die eine an die jeweilige Situation angepasste Absicherung ermöglichen (Paulweber & Lebert, 2014).

Je nach Aktivität im Entwicklungsprozess werden dazu unterschiedliche Prototypen genutzt, von einfachen Papierprototypen, über erste Versuchsmuster, bis zu frühen technischen Umsetzungen (siehe Bertsche, 2007; Boës, Batliner, Stücheli & Meboldt, 2017).

2.1.4 Zwischenfazit

Um früh in der Produktentwicklung die Unsicherheiten zu reduzieren, ist eine Absicherung des Produkts notwendig. Dazu ist Wissen über das Verhalten des Systems erforderlich (Božek & Turygin, 2014; Karthaus, Binz & Roth, 2015; Lindemann, 2009; Matthiesen, 2021). In der Industrie hat die Absicherung einen hohen Stellenwert, das wird durch die vielfältigen Test- und Validierungsaktivitäten deutlich.

Die eingesetzten Methoden und Ansätze der Eigenschaftsabsicherung sind je nach Zweck sehr unterschiedlich und hängen von den systemspezifischen Randbedingungen ab. In allen Test- und Validierungsaktivitäten steht der Erkenntnisgewinn über das Systemverhalten im Fokus der Untersuchungen. Ein Abgleich der Ziele und der Entwicklungsstände mit den Erwartungen und Anforderungen stellt dabei sicher, dass die technische Umsetzbarkeit gegeben ist und das spätere Produkt am Markt erfolgreich sein kann.

Zur Reduktion der Entwicklungsaufwände in der Produktentwicklung werden Bauzeilen und Baukästen genutzt. Darüber hinaus wird zur Reduzierung der Unsicherheiten während der Entwicklung Frontloading eingesetzt. Durch Frontloading können in der Produktentwicklung die Entwicklungszeiten verkürzt und späte Designänderungen vermieden werden (Thomke & Fujimoto, 2000; Thomke & Bell, 2001). Die entstehenden Erkenntnisse fließen in die nachfolgenden Entwicklungsschritte ein und erweitern die Wissensbasis. Dabei ist der Zeitpunkt, wann Erkenntnisse zum Systemverhalten vorliegen, ein wesentlicher Erfolgsfaktor.

Das notwendige Systemwissen kann mithilfe von experimentellen Untersuchungen mit Prototypen in Antriebsstrangprüfständen ermittelt werden, nicht vorhandene Komponenten sind zu simulieren (Matthiesen, 2021; Paulweber & Lebert, 2014). Für die Entwicklung und Validierung können diese Artefakte aus Vorgängerprodukten oder anderen Referenzsystemen genutzt werden (Albers, Bursac et al., 2015).

Gerade in frühen Entwicklungsphasen stellt die Berücksichtigung der Wechselwirkungen eine Herausforderung dar, im Speziellen, wenn nicht alle Komponenten und Teilsysteme des Produkts vorliegen. Untersuchungen im Gesamtsystem mit realitätsnahen Belastungen sind damit schwierig (Matthiesen, Gwosch, Mangold, Dülten et al., 2017). Für aussagekräftige Test- und Validierungsaktivitäten ist die Einbindung des zu untersuchenden Systems in das Gesamtsystem wichtig.

2.2 XiL-Prüfstände und Koppelsysteme

2.2.1 Einbindung eines einzelnen Teilsystems

Durch die frühzeitige Einbindung von physischen Versuchen mit Teilsystemen in die Entwicklungsaktivitäten können Designfehler sehr früh erkannt und eliminiert werden. Eine Absicherung im Kontext von Verifikation und Validierung kann nach Albers und Düser et al. (2008) nur dann sinnvoll durchgeführt werden, wenn das zu testende Teilsystem in einer entsprechenden Repräsentanz des Gesamtsystems² und auch der Umwelt sowie der Nutzer eingebunden ist. Nach Matthiesen ist es wichtig, die Funktionen im Produkt zeitnah in einer geeigneten Form zu überprüfen, um ziel führend und risikoarm gestalten zu können (Matthiesen, 2021, S. 418). Ansätze zur Einbindung eines einzelnen Teilsystems in das Gesamtsystem anhand von Modellen oder Prototypen zum Zwecke der Validierung kommen ursprünglich aus dem Bereich der Steuergeräteentwicklung. Die Grundidee von Hardware-in-the-Loop-Systemen (kurz: HiL-Systeme) ist, das Gesamtsystem in einem Test adäquat darzustellen (Fischer & Jassmann, 2017, S. 10958), wobei das zu untersuchende System in ein virtuelles oder physisches Gesamtsystem eingebunden wird (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 559).

Hardware-in-the-Loop-Methoden werden seit einigen Jahren bei der Entwicklung von Reglern für Flugsteuerungen eingesetzt. Beispiele hierfür sind in Karpenko & Sepehri (2009) und Kaden et al. (2012) vorgestellt. Hierbei werden Regelungsalgorithmen nicht nur in rein virtuellen Versuchsumgebungen mit Hilfe einer virtuellen Regelstrecke untersucht, sondern durch Hardwarekomponenten ergänzt. Beispielsweise kann das Originalsteuergerät inklusive Motor durch Aktuatoren und Sensoren

² Ziel ist es, alle beteiligten Teilsysteme zu berücksichtigen, um die Unsicherheit zu reduzieren.

in Simulationen oder Ersatzsystemen getestet werden. Ein Beispiel dieser Untersuchungen mit Ersatzsystemen ist in Karpenko und Sepehri (2009) für elektrohydraulische Aktuatoren gezeigt. (Matthiesen, Gwosch, Mangold, Grauberger et al., 2017)

Für den Einsatz von HiL-Systemen beschreiben Powell, Lawson und Hogh (1988) zwei Bausteine. Powell empfiehlt einerseits die Modellierung von Teilsystemen, die schwierig zu entwickeln sind, und andererseits für schwierig zu modellierende Teilsysteme die Einbindung von Hardwarekomponenten. Durch diese beiden Bausteine können die Wechselwirkungen in einer realistischen, reproduzierbaren Laborumgebung abgebildet werden. (Powell et al., 1988)

Der HiL-Ansatz wurde ursprünglich für das Testen von Steuerungs- und Regelungssystemen entwickelt, wurde dann jedoch für unterschiedliche Systeme und Domänen erweitert. Je nach Reifegrad des zu untersuchenden Systems existieren unterschiedliche Ansätze und Benennungen. Beim Model-in-the-Loop- (MiL), Software-in-the-Loop- (SiL) bzw. Hardware-in-the-Loop-Ansatz (HiL), werden unterschiedliche zu untersuchenden Systeme in virtuelle Gesamtsysteme eingebunden.

In Hardware-in-the-Loop (HiL)-Prüfstände können Steuergeräte während der Entwicklungsphase getestet werden (Bacic, Neild & Gawthrop, 2009). Die Hardware-in-the-Loop (HiL)-Simulation ermöglicht die virtuelle oder physikalische Integration eines Systems oder Subsystems in Echtzeit mit den übrigen Systemkomponenten (Bouscayrol, 2008). Bei Model-in-the-Loop befindet sich ein Modell im Fokus der Untersuchungen. Bei Software-in-the-Loop wird ein Computerprogramm in das Gesamtsystem eingebunden und untersucht. Fathy, Filipi, Hagena und Stein (2006) fassen basierend auf einer Literaturanalyse aktuelle Ausprägungen der Hardware-in-the-Loop-Prüfstände zusammen und beschreiben die Perspektiven im Automobilbau.

Während der Begriff „Hardware“ ursprünglich im Zusammenhang mit programmierbarer Elektronik, wie z.B. Steuergeräten, verwendet wurde, beschreiben viele Veröffentlichungen eine breitere Nutzung des Konzepts (vgl. Bier et al., 2012; Fathy et al., 2006; Kaden et al., 2012; Skjetne & Egeland, 2005; Walter, Heinke, Buscher, Schwandtner & Leonhardt, 2013). In diesem Fall ist nicht mehr die Regelung die Unit-under-Test, sondern ein beliebiges Teilsystem, das in ein physisches oder virtuelles Gesamtsystem integriert wird. Beispielsweise beschränkt sich Maclay (1997) in seinen HiL-Simulationen von Flugsteuerungen und Bremsregelungen von Kraftfahrzeugen nicht nur auf die Regelungssysteme, sondern schlägt einen derartigen Ansatz für beliebige Systeme mit komplexem Systemverhalten vor.

2.2.2 IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz

Der IPEK-X-in-the-Loop-(XiL)-Ansatz nach Albers greift die „etablierten Ansätze (Model-in-the-Loop, Software-in-the-Loop, Hardware-in-the-Loop) auf, integriert die jeweiligen Vorteile und erweitert diese für die Validierung mechanischer und mechatronischer Komponenten und Teilsysteme. Somit beschreibt der IPEK-XiL-Ansatz das grundlegende Verständnis in der Validierung eines Teilsystems, dieses in das Gesamtsystem, die Umwelt und weitere interagierende Systeme einzubinden.“ (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 559)

Der X-in-the-Loop-Ansatz von Albers et al. (2012) sowie der XiL-Ansatz von Bier et al. (2012) nutzen eine Dreiteilung des Gesamtsystems in die Subsysteme Fahrer, Fahrzeug und Umwelt (vgl. Abbildung 2.5). Die zu untersuchende Komponente, das „X“ im „X-in-the-Loop“-Ansatz, wird durch die Restfahrzeugsimulation an die umgebenden Systeme Fahrer und Umwelt angekoppelt und bildet mit diesen auch im Versuch ein Gesamtsystem (Albers, Behrendt et al., 2016).

In der Literatur finden sich unterschiedliche Begriffe für die zu untersuchende Komponente. So wird in der Literatur die zu untersuchende Komponente auch als System-in-Development (SiD, vgl. Albers, Matros, Behrendt & Jetzinger, 2015), System-Under-Test (SUT, vgl. Engel, 2010) bezeichnet. Hervorgehoben wird dabei, dass die Untersuchungen auf Systemebene erfolgen. In der Literatur werden auch die Bezeichnungen Device-Under-Test (DUT) und Unit-Under-Test (UUT) verwendet.

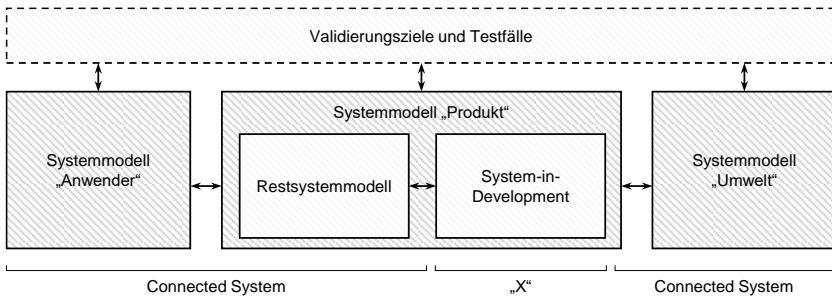


Abbildung 2.5: Reduzierte Darstellung des X-in-the-Loop-Frameworks am Beispiel eines Fahrzeugs. Dreiteilung nach Albers und Behrendt et al. (2016, S. 559).

Die Untersuchung des System-in-Development (SiD) kann auf mehreren Detaillierungsebenen (vgl. Abbildung 2.6), beispielsweise einem Gesamtfahrzeug, einem Getriebe oder einem einzelnen Funktionskontakt stattfinden. Durch die Anwendung von Modellen des Fahrers und der Umwelt können die zu untersuchenden Komponenten im reproduzierbaren Gesamtsystem validiert werden.

Bei der Einbindung des zu untersuchenden Systems wird ausdrücklich nicht zwischen physischer und virtueller Modellbildung unterschieden. Beide Modellbildungen und insbesondere die Kombination sind Teil des IPEK-XiL-Ansatzes. Alle Systeme der Testumgebung, das SiD sowie die verschiedenen Restsysteme, können physische, virtuelle oder gemischt physisch-virtuelle Ausprägungen annehmen. (Albers, Behrendt et al., 2016)

Der XiL-Ansatz unterstützt die Integration in das Gesamtsystem und ermöglicht den funktionalen Test einer Komponente oder eines Teilsystems (System-in-Development) in Prüfständen durch Abbildung der übrigen Teilsysteme (als Connected Systems) durch geeignete physikalische oder virtuelle Modelle (Thomke & Bell, 2001).

Albers und Behrendt et al. (2016) haben in diversen Publikationen den X-in-the-Loop-Ansatz für die Validierung mechanischer und mechatronischer Komponenten und Teilsysteme aufgezeigt (siehe Albers, Düser et al., 2008; Albers & Düser, 2010; vgl. Albers, Pinner, Yan, Hettel & Behrendt, 2016; Albers, Yan & Behrendt, 2016; Albers, Behrendt et al., 2016; Geier et al., 2009; Nickel, Behrendt, Bause & Albers, 2018; You, 2017).

XiL-Ansatz für Elektrowerkzeuge

Matthiesen hat den X-in-the-Loop-Ansatz auf Power-Tools übertragen und beschreibt die Einbindung des Gesamtsystems, bestehend aus dem Anwender, der Anwendung und den Testfällen sowie der Umwelt, bei Test- und Validierungsaktivitäten in der Gerätebranche. (Matthiesen, Schaefer, Mangold & Durow, 2013)

Das IPEK-X-in-the-Loop-Framework für handgehaltene Power-Tools ist in Abbildung 2.6 dargestellt und beschreibt mögliche Detaillierungsebenen des zu untersuchenden Power-Tool-Teilsystems (Matthiesen, Behrendt, Gwosch, Bruchmueller & Schaefer, 2018). Die zu untersuchende Komponente (SiD) kann je nach Validierungsaufgabe auf verschiedenen Systemebenen, vom Gesamtsystem bis zum einzelnen Wirkflächenpaar, untersucht werden (Albers, Behrendt et al., 2016).

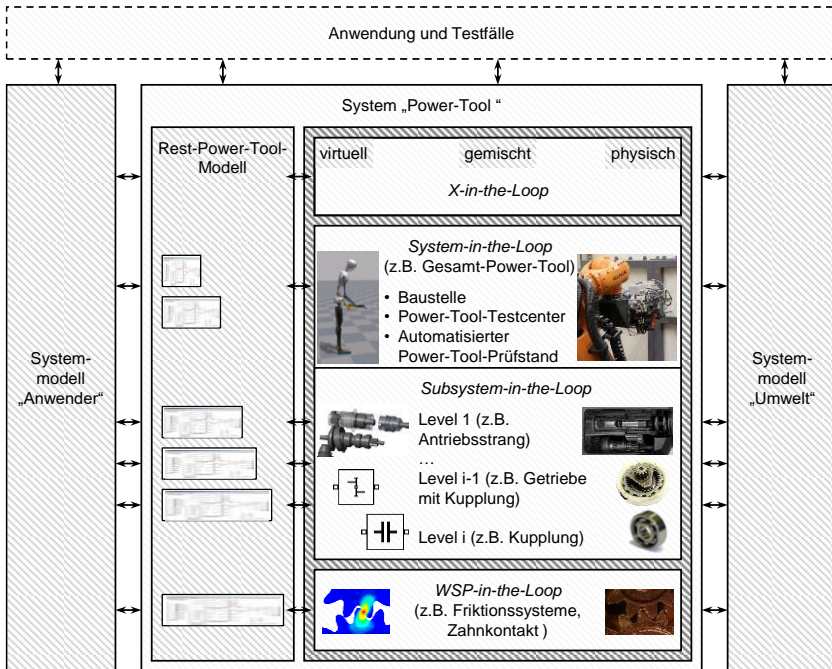


Abbildung 2.6: X-in-the-Loop-Framework für Elektrowerkzeuge nach Matthiesen und Behrendt et al. (2018)

Der X-in-the-Loop (XiL)-Ansatz ermöglicht das funktionale Testen einer zu untersuchenden Komponente oder eines Systems (System-in-Development, SiD) in Prüfständen, indem die interagierenden Systeme als physische oder virtuelle Modelle (als Connected Systems) integriert werden. XiL-Tests werden systemspezifisch in Anwendungen mit vielen Wechselwirkungen zwischen den Subsystemen eingesetzt, wie beispielsweise bei Fahrzeugantrieben, Flugzeugen und Elektrowerkzeugen.

2.2.3 Koppelsysteme zur Einbindung von Teilsystemen

Für eine realitätsnahe Einbindung der zu untersuchenden Komponente werden Modelle und Ersatzsysteme der umgebenden und interagierenden Teilsysteme benö-

tigt. Die Kopplung des System-in-Development mit dem Restsystem geschieht entweder über Hardwareschnittstellen oder für virtuelle Restsystemmodelle über Sensoren und Aktuatoren. Die Subsysteme des Prüfstandes sind über Koppelsysteme verbunden, welche die verschiedenen Antriebsstrangkomponenten und Simulationsmodelle miteinander verbinden.

Diese Kopplungssysteme wurden bereits ausführlich beschrieben und untersucht (vgl. Albers, Düser et al., 2008; Albers, Pinner et al., 2016; Andert, Klein, Savelsberg, Pischinger & Hameyer, 2016; Düser, 2010; Lentijo, D'Arco & Monti, 2010; Yan, Nickel, Behrendt & Albers, 2017). Andert et al. (2016) nutzen das Konzept der virtuellen Welle, um unterschiedliche Teilsysteme auf Prüfständen zu verbinden. Die virtuelle Kopplung von Subsystemen am Prüfstand wird zusätzlich bei der verteilten Validierung genutzt, um Prüfstände über verteilte Standorte hinweg zu koppeln (Nickel et al., 2018).

2.2.4 XiL-Prüfstände zur Absicherung

In der Luftfahrt-, Automobil- und Elektrowerkzeugindustrie finden XiL-Prüfstände für die Validierung von Subsystemen während der Entwicklungstätigkeit schon sehr breite Anwendung. Diese XiL-Prüfstände sind sowohl in der Automobil- als auch in der Flugzeugindustrie für die Untersuchung von Subsystemen bereits weit verbreitet. Untersuchungen auf XiL-Prüfständen werden für verschiedene Systeme mit unterschiedlichen Zielsetzungen verwendet. Beispielsweise für einen elektro-hydraulischen Stellantrieb für Schienenfahrzeuge (Liebig, Helduser, Stüwing & Dronka, 2001) oder ein Herzunterstützungssystem (Walter et al., 2013).

Gwosch zeigt Antriebsstrangprüfstände, bei denen die noch nicht verfügbaren Teilsysteme und die äußeren Belastungen hinzusimuliert werden (Gwosch, 2019). Genutzt werden Modelle und Ersatzsysteme, um die äußeren Belastungen am Antriebsstrangprüfstand realitätsnah abzubilden (Matthiesen, Gwosch, Mangold, Dültgen et al., 2017). Die Umsetzung erfolgte für einen Winkelschleifer und einen Akkubohrschrauber. Der Prüfstandsaufbau zur Untersuchung eines Akkubohrschraubers dient als Grundlage dieser Forschungsarbeit und wird in Kapitel 5.2 erläutert.

2.2.5 Zwischenfazit zur Abbildung der Wechselwirkungen

Der X-in-the-Loop-Ansatz beschreibt das grundlegende Verständnis in der Validierung eines Teilsystems, dieses in das Gesamtsystem einzubinden. Durch derartige Versuche können die gegebenen Unsicherheiten reduziert werden und ermöglichen

so eine realistischere Untersuchung in den frühen Entwicklungsphasen (Albers, Behrendt et al., 2016; You, 2017).

Im Gegensatz zu isolierten Komponententests ist die Closed-Loop-XiL-Prüfung von Prototypen besonders sinnvoll, um die Wechselwirkungen zwischen interagierenden Teilsystemen zu untersuchen. Durch die Einbindung von physischen und virtuellen Modellen können realistischere Untersuchungen in frühen Entwicklungsphasen durchgeführt werden. Die Unsicherheiten werden so reduziert. Zur Abbildung der relevanten Wechselwirkungen werden die richtigen Modelle benötigt. Eine Herausforderung ist die Reproduktion der relevanten Randbedingungen und Wechselwirkungen auf dem Prüfstand durch physische und virtuelle Modelle.

Als physisches Modell können jegliche Arten von Prototypen, bestehenden Produkten oder Zukaufteilen und Teilsysteme aus anderen Produktgenerationen genutzt werden, sofern diese mit den notwendigen Eigenschaften vorliegen. Eine Herausforderung bei der frühen Validierung von Antriebsstrangkomponenten ist die frühzeitige Verfügbarkeit von mechanisch robusten Prototypen (Gwosch, 2019). Additiv gefertigte Prototypen erreichen oft nicht die gewünschten Eigenschaften hinsichtlich der mechanischen Belastbarkeit im Vergleich zum Originalsystem.

Die Koppelsysteme bilden die Basis zur Einbindung der physischen und virtuellen Teilsysteme. Bei gleicher Leistungsfähigkeit ist durch die Koppelsysteme eine direkte Integration der interagierenden Teilsysteme in das Gesamtsystem möglich. Der X-in-the-loop (XiL) unterstützt die Validierung und ermöglicht Frontloading.

Um das gemeinsame Testen von unterschiedlich belastbaren Komponenten zu ermöglichen, ist die Anpassung der mechanischen Leistung zwischen den Teilsystemen erforderlich. In einem mechanisch gekoppelten System ist die unabhängige Anpassung von Drehmoment und Drehzahl aufgrund der Energieerhaltung nicht möglich. Eine mechanische Kopplung kann durch Koppelsysteme, bestehend aus Aktoren und der dazugehörigen Regelungstechnik, ersetzt werden. Durch diese virtuelle Kopplung wird die unabhängige Anpassung der Leistung an beiden Seiten der Koppelsysteme möglich.

2.3 Entwicklung und Absicherung von Elektrowerkzeugen

Dieses Kapitel behandelt die Grundlagen sowie die im Stand der Forschung veröffentlichten Untersuchungen zu kompakten Antriebssträngen, wie sie beispielsweise in Elektrowerkzeugen genutzt werden. In diesen kompakten Antriebsträngen liegen

vielfältige Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen vor. Da in dieser Arbeit ein Akkuboehrschrauber als Beispielsystem verwendet wird, wird verstärkt auf die dafür relevanten Grundlagen eingegangen.

2.3.1 Besonderheiten im Aufbau und der Entwicklung von Elektrowerkzeugen

Häufig werden in der Entwicklung von handgehaltenen Elektrowerkzeugen nur bestimmte Teilsysteme vom Unternehmen selbst entwickelt. Ergänzt werden diese Teilsysteme durch standardisierte Produkte, welche bei Zulieferern beauftragt oder zugekauft werden. Ein beispielhafter Entwicklungsprozess für handgehaltene Geräte ist in Abbildung 2.7 dargestellt.

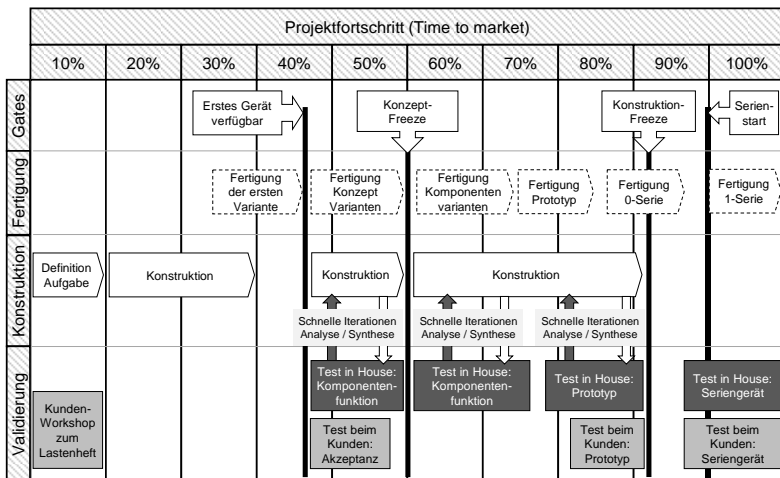


Abbildung 2.7: Entwicklungsprozess für handgehaltene Geräte (angeglichene Darstellung aus Matthiesen, Mangold und Zumstein, 2016).

Oft entwickeln die Hersteller ihre Produkte nicht losgelöst, oft werden verschiedene Produkte unter Nutzung von Baureihen und Baukästen entwickelt. Es werden verschiedene Teilsysteme mit speziellen Funktionen zu vielfältigen Produkten zusammengesetzt. Damit wird das Ziel der schnellen und kostengünstigen Produktentwicklung angestrebt.

Bei handgehaltenen Elektrowerkzeugen ergibt sich eine zusätzliche Herausforderung, dass Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bauteilen und Komponenten oder interagierenden Teilsystemen die Funktionsweise beeinflussen. (Matthiesen, Mangold, Bruchmüller & Marko, 2014). Die Berücksichtigung der Wechselwirkungen stellt gerade bei der Abstimmung von Antriebsstrangkomponenten hinsichtlich Sicherheitsaspekten ein wichtiges Ziel der Absicherung dar. So ist beispielsweise die funktionskritische Abstimmung des Antriebsstrangs von Interesse, um die notwendigen Sicherheitsfunktionen im Produkt sicherzustellen.

Für eine realitätsnahe Absicherung sind diese Wechselwirkungen durch geeignete physische oder virtuelle Modelle zu berücksichtigen. In der Absicherung bedarf es der unterschiedlichen Prototypen und Teilsysteme, sowie Komponenten von Zulieferern, die in das Produkt einfließen, um diese dann gemeinsam zu validieren. Die physische Absicherung erfolgt häufig erst spät im Entwicklungsprozess, sobald erste Gesamtgeräte oder funktionsfähige Prototypen vorliegen (Gwosch, 2019).

2.3.2 Grundlagen Elektrowerkzeuge

Da in dieser Arbeit ein Akkubohrschrauber als Beispielsystem verwendet wird, werden nachfolgend die dafür relevanten Grundlagen beschrieben. Dazu werden Elektrowerkzeuge und im Speziellen Akkubohrschrauber betrachtet.

Nach Schweizer (2003) sind Elektrowerkzeuge „handgeführte Maschinenwerkzeuge, welche elektromotorisch angetrieben werden bzw. deren Funktion durch die Wirkung der Elektrizität erfolgt.“ „Elektrowerkzeuge werden überall dort verwendet, wo dieselbe Arbeitsaufgabe nicht mit stationären Maschinenwerkzeugen erfolgen kann oder zu aufwendig wäre.“ (Schweizer, 2003, S. 33)

Die Produkte der Branche sind nach DIN EN 62841-1 VDE 0740-1:2016-07 folgendermaßen definiert:

Elektrowerkzeug, mit oder ohne Vorrichtungen zur Befestigung in einer Halterung, das zur Ausführung mechanischer Arbeiten bestimmt und so konstruiert ist, dass Motor und Maschine eine Baueinheit bilden, die leicht an ihren Einsatzort gebracht werden kann und die während des Gebrauchs von Hand geführt oder unterstützt wird oder in einer Halterung aufgenommen ist. DIN EN 62841-1 VDE 0740-1:2016-07

Unter handgehaltenen tragbaren Maschinen versteht man Maschinen, die während der Benutzung vom Bediener (mit oder ohne Tragegurt) getragen werden. (Leitfa- den³ für die Anwendung der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG, 2020)

Handgehaltene Maschinen umfassen elektrisch angetriebene Maschinen (nach DIN EN 62841-1 VDE 0740-1:2016-07 Absatz 3.24) und nicht elektrisch betriebene Ma- schinen (nach DIN EN ISO 11148-1:2012-06). Handgehaltene Maschinen werden auch als Power-Tools bezeichnet (Matthiesen, Gwosch, Mangold, Dültgen et al., 2017).

Zum Produktspektrum „der Branche gehören bohrende Werkzeuge (wie Bohrma- schine, Schlagbohrmaschine), schraubende Werkzeuge (Schlagschrauber), sä- gende Werkzeuge (Stichsäge, Handkreissäge), schleifende Werkzeuge (Schwing- schleifer, Exzentrerschleifer, Winkelschleifer) sowie fräsende, hobelnde, scherende, schlagende und fügende Werkzeuge“ (Dispan, 2016, S. 10–11). „Bosch, Fein, Fest- ool, Flex, Mafell, Metabo sind berühmte Marken, die zumindest in der Fachwelt der Profi-Elektrowerkzeuge allseits bekannt sind.“ (Dispan, 2016, S. 10)

Wesentliche „Anforderungen an Elektrowerkzeuge aus Nutzersicht sind Leistungs- fähigkeit, Qualität, Langlebigkeit, Preiswürdigkeit und Ergonomie“ (Dispan, 2016, S. 10–11). „Mit handgeführten Elektrowerkzeugen können nur solche Arbeiten aus- geführt werden, deren Reaktionskräfte (z.B. Rückdrehmomente) noch gefahrlos vom Anwender beherrscht werden können. Die erzielbare Arbeitsqualität hängt von der Maschinenführung durch den Anwender bzw. von dessen Erfahrung und Kennt- nissen ab.“ (Schweizer, 2003, S. 33)

2.3.3 Grundlagen Akkubohrschrauber

Akkubohrschrauber gehören zu den handgeführten Elektrowerkzeugen, die für Schraub- als auch Bohranwendungen genutzt werden. Möglich wird das durch eine Kupplung, die mechanisch blockiert wird (vgl. Schweizer, 2003, S. 264). Durch die blockierte Überlastkupplungen steht das maximal mögliche Drehmoment für Boh- rungen großer Durchmesser oder Einschraubungen mit großen Schrauben zur Ver- fügung. (Schweizer, 2003, S. 264)

³ Europäische Kommission Unternehmen und Industrie (2020).

„Akku-Bohrschrauber haben sich wegen ihrer Leistungsfähigkeit und ihrer universellen Anwendungsmöglichkeit in allen Gewerken durchgesetzt. Sie dominieren das Segment der Akkuwerkzeuge [...]“ (Schweizer, 2003, S. 264)

Der Aufbau von Akkubohrschraubern wird beispielhaft anhand des Modells GSR 18-2-LI Plus des Elektrowerkzeugherstellers Robert Bosch GmbH erläutert.

Der Akkubohrschrauber (GSR 18-2-LI Plus, siehe Robert Bosch Power Tools GmbH, 2014) verfügt über einen Akku, eine Leistungselektronik, einen Antriebsmotor, ein schaltbares mehrstufiges Getriebe, eine Überlastkupplung und eine Rückdreh Sperre. Bei dem Antriebsmotor zur Wandlung der elektrischen Leistung in eine mechanische Drehbewegung handelt es sich um einen permanentmagneterregten Gleichstrommotor (PMDC-Motor). Die Kenndaten sind 18 V Nennspannung und 19800 U/min Nenndrehzahl. (Matthiesen, Gwosch & Steck, 2019)

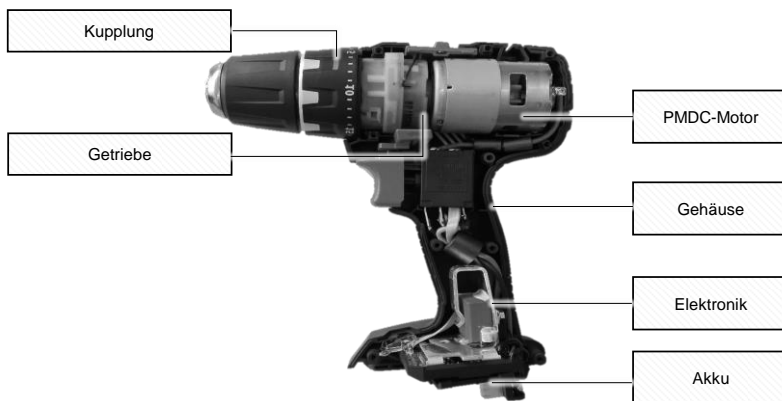


Abbildung 2.8: Akkubohrschrauber (GSR 18-2-LI Plus des Elektrowerkzeugherstellers Robert Bosch GmbH) bestehend aus Akku und Leistungselektronik und mechanischem Antriebsstrang mit drehmomentbegrenzender Überlastkupplung. (vgl. Matthiesen et al., 2019 und Gwosch, 2019)

Der mechanische „Teil des Antriebsstrangs besteht aus einem Getriebe mit zwei- bzw. dreistufigem Planetenradsatz, einer drehmomentbegrenzenden Kupplung und einem Bohrfutter zur Aufnahme der jeweiligen Einsatzwerkzeuge (Bohrer bzw. Bit). Der Antriebsmotor treibt die Getriebestufen an. Die Übersetzung des Antriebs-

strangs ist umschaltbar, wobei bei der Umschaltung die zweite Getriebestufe überbrückt wird. Das Hohlrad der dritten Getriebestufe enthält die Überlastkupplung. Die Überlastfunktion wird durch das freie Drehen des Hohlrades bei zu großen Drehmomenten realisiert. Eine detaillierte Funktionsbeschreibung der Überlastkupplung erfolgt in Kapitel 2.3.4. Die mechanische Leistungsabgabe erfolgt über das Bohrfutter, welches eine integrierte Rückdreh Sperre beinhaltet. Die Rückdreh Sperre ist momen-tenbetätigt und blockiert den Antriebsstrang bei abtriebsseitiger Drehmomenteinleitung.“ (Matthiesen et al., 2019, S. 14)

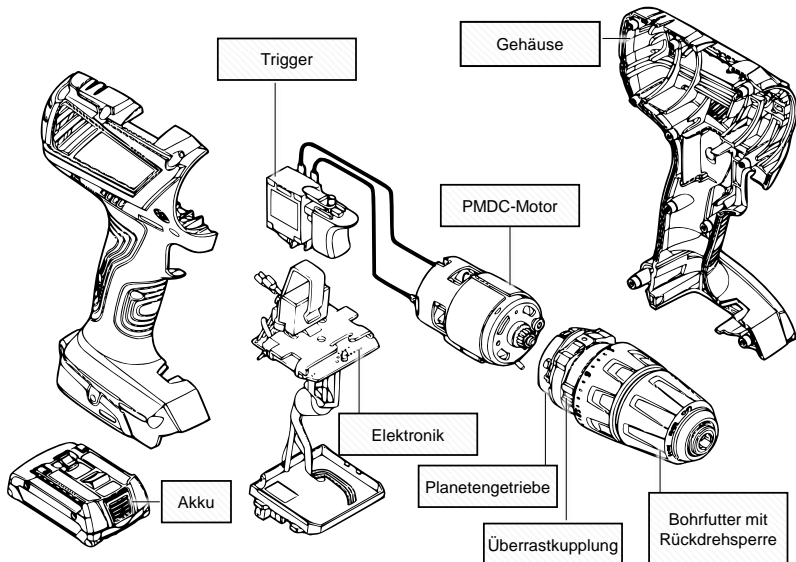


Abbildung 2.9: Komponenten des Akkuboehrschraubers (GSR 18-2-LI Plus des Elektrowerkzeugherstellers Robert Bosch GmbH, angepasste Darstellung aus Gwosch, 2019, S. 39)

2.3.4 Überlastkupplung im Akkuboehrschrauber

Um die Reaktionskräfte (beispielsweise Rückdrehmomente) für den Anwender auf ein sicheres Maß zu reduzieren, werden in Akkuboehrschraubern Sicherheits- oder

Überlastkupplungen⁴ eingesetzt. Im vorgestellten Akkubohrschrauber wird die Sicherheitsfunktion durch eine Überlastkupplung (Abbildung 2.11) realisiert. Die Kupplung ist in die Komponenten der dritten Planetenradstufe integriert.

Beim Erreichen eines bestimmten, vorher „am Gerät eingestellten“⁵ Drehmoments überlastet die Kupplung und unterbricht damit den Kraftfluss vom Motor zum Schrauberbit“ (Schweizer, 2003, S. 141). Die Drehmomenteinstellung erfolgt meist über eine Veränderung der Vorspannkraft der Kupplungs-Andruckfeder (Schweizer, 2003, S. 141). Die Komponenten und ein beispielhafter Drehmomentverlauf einer Überlastkupplung sind in Abbildung 2.10 dargestellt.

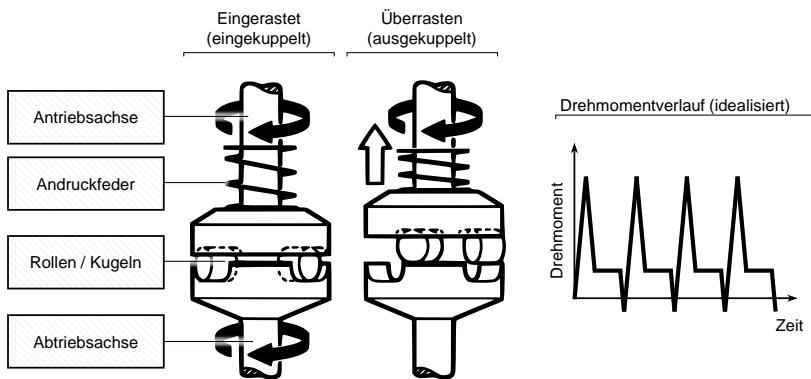


Abbildung 2.10: Komponenten einer Überlastkupplung und Drehmomentverlauf einer symmetrischen Überlastkupplung, (reproduzierte Darstellung Schweizer, 2003, 55 & 141)

Die Kupplung besteht aus Erhebungen (Rastung) auf einer Laufbahn, welche in die dritte Stufe des Planetengetriebes integriert ist. Über Federn werden die Rastkugeln⁶ auf die Laufbahn gedrückt. Die Rastkugeln und Federn sind im Gehäuse der Kupplung geführt und können dort das anliegende Drehmoment abstützen. Bei einem Anstieg (Zustand 2) des von außen anliegenden Drehmoments werden die Fe-

⁴ Je nach Fokus der Benennung werden Überlastkupplungen auch als Überrastkupplungen bezeichnet, um die Funktionsweise näher zu beschreiben.

⁵ Über einen Einstellring kann das Auslösemoment der Kupplung in definierten Stufen gewählt werden. Diese „Kupplungsstufen“ hängen von der Federkraft der Kupplung ab.

⁶ Im Allgemeinen werden die Rastkugeln auch als Sperrkörper bezeichnet.

dem zusätzlich komprimiert, dadurch bewegen sich die Rastkugeln entlang der Rastungen hoch. Sobald sich die Rastkugeln über die Rastungen bewegen (Zustand 3), kann kein Moment mehr abgestützt werden. Die Kupplung rutscht dann durch und begrenzt das maximal übertragbare Drehmoment auf einen definierten Wert. Über die Vorspannung der Federn kann dieser Wert eingestellt werden. Einstellbar ist die Vorspannung über Kupplungsstufen durch den Anwender über einen Drehring. Die Gestaltparameter des Kupplungsring, der Federn und der Rastkugeln definieren die Funktionseigenschaften der Kupplung. Das Verhalten des Gesamtsystems aus Überlastkupplung und Akkuboehrschrauber hängt auch von den Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Teilsystemen ab.

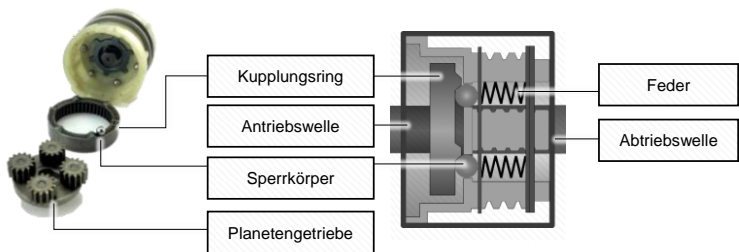


Abbildung 2.11: Mechanische Überlastkupplung, bestehend aus einem Kupplungsring mit Rasten. Durch die Federkraft werden die Rastkugeln gegen die Rastung am Kupplungsring gepresst, um ein Verdrehen zu verhindern. (Gwosch, 2019; Paland, 2019)

2.3.5 Testaktivitäten bei der Entwicklung von kompakten Antriebssträngen

Im Stand der Forschung existieren verschiedene Publikationen, die sich mit der Absicherung von Teilsystemen aus Elektrowerkzeugen auf Testumgebungen wie Prüfständen beschäftigen. In vielen Publikation finden sich Untersuchungen an Winkelschleifern, welche sich mit den Auswirkungen der Schwingungen auf den Anwender befassen. Im Stand der Forschung bekannte Untersuchungen an Akkuboehrschraubern befassen sich mit der Auslegung des Antriebsmotors sowie der Erfassung des Schraubvorgangs.

Bei der Entwicklung von Elektrowerkzeugen werden unterschiedliche Test- und Validierungswerkzeuge zur Eigenschaftsanalyse und Absicherung einzelner Entwicklungsstände eingesetzt. Cronjäger, Jahn und Riederer (1984) beschreiben einen

Versuchsstand zur reproduzierbaren Messung der Vibration schlagender handgeführter Maschinen.

Gwosch (2019) stellt Antriebsstrangprüfstände zur Ableitung von Konstruktionszielgrößen in der Produktentwicklung handgehaltener Power-Tools vor und zeigt in Prüfstandsuntersuchungen die Einsatzfähigkeit für die Absicherung von Elektrowerkzeugen.

Für die Auslegung und Untersuchung von Kupplungen in Akkuboehrschraubern sind vereinzelt Arbeiten im Stand der Forschung zu finden. Die Publikationen beschäftigen sich mit Kupplungen in einem breiteren Anwendungsbereich.

Dennig (2009) beschreibt die Absicherung von Werkzeugmaschinen durch schnell schaltende Bremsen und Kupplungen für Linearantriebe und zeigt die Entwicklung auf. Weiter sind Forschungsvorhaben von Gold, Schelenz und Koenen (1999) bekannt, in denen die Auslegung und Anwendung von Überlastkupplungen und die Auswirkungen des Schaltverhaltens auf den Antriebsstrang betrachtet wurde. Die Verallgemeinerung der Berechnungsmöglichkeiten erfolgten dann in einer weiteren Forschungsarbeit (Gold, Schelenz & Philipp, 2003).

Die aufgezeigten Untersuchungen zeigen die Relevanz für weitere Untersuchungen an Kupplungen, welche für Sicherheitsfunktionen genutzt werden. Wichtig ist dabei das die Kupplungen im Zusammenspiel mit angrenzenden Teilsystemen untersucht werden und die Wechselwirkungen berücksichtigt werden.

2.4 Skalierte Untersuchungen

Um das gemeinsame Testen von unterschiedlich belastbaren Komponenten zu ermöglichen, ist eine Anpassung der Leistungsgrößen an die gewünschten Prototypen notwendig. Ansätze zur Berücksichtigung von unterschiedlichen Größenstufen werden bereits in anderen Bereichen im Rahmen von Modellversuchen und Ähnlichkeitsuntersuchungen genutzt. Für diese Forschungsarbeit sind insbesondere Modellversuche, Ähnlichkeiten und die Dimensionsanalyse von Bedeutung.

Der Schiffbauingenieur William Froude verwendete im 19. Jahrhundert maßstabsgetreue Modelle, um das Verhalten von Schiffsprototypen in Wassertanks zu testen. Darüber hinaus bauten Wilbur und Orville Wright den ersten Windkanal, um verschiedene Konfigurationen maßstabsgetreuer Flugzeugflügel zu untersuchen. Dabei wurden Untersuchungen im Strömungskanal an kleiner skalierten Prototypen vorgenommen. (McMahon & Bonner, 1983)

Das Ziel dieser Untersuchungen im Windkanal ist es, mit kleineren Systemen vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, da ein größeres System im Windkanal nicht abgebildet werden kann. Diese Messungen im Windkanal an kleinen Modellen mussten dann auf das Original übertragen werden. Zur Übertragung der Modellmessungen auf die Großausführung wurde die Ähnlichkeitslehre/-mechanik genutzt. (McMahon & Bonner, 1983)

Strömungsprobleme werden auch heute noch in maßstabsgetreuen Dimensionen in Windkanälen untersucht (Herwig, 2016, S. 77). Beispiele für Modelluntersuchungen in Windkanälen werden in Kapitel 2.4.5 beschrieben.

2.4.1 Ähnlichkeitsmechanik

Aus der euklidischen Geometrie ist der Begriff der Ähnlichkeit bekannt. Demnach sind zwei Dreiecke zueinander ähnlich, wenn sie mindestens:

- in zwei Winkeln übereinstimmen
- und/oder die Verhältnisse aller Seiten übereinstimmen
- und/oder in einem Winkel und das Verhältnis der anliegenden Seiten übereinstimmen
- und/oder die Verhältnisse zweier Seiten und dem Gegenwinkel der größeren Seite übereinstimmen. (Merziger, 2014)

Abbildung 2.12 zeigt zwei einander ähnliche Formen, die größere Form wurde mit dem Skalierungsgrad s skaliert (Deimel, 2007).

In der Ähnlichkeitsmechanik wird der Begriff der Ähnlichkeit auf technische Systeme mit einer Vielzahl von physikalischen Größen übertragen. Unter Ähnlichkeit versteht man, wenn das Verhältnis von mindestens einer physikalischen Größe konstant, d.h. invariant bleibt.

Die Ähnlichkeitsmechanik hat die Aufgabe, Gesetze aufzustellen, nach denen am (in der Regel verkleinerten) Modell gewonnene Versuchsergebnisse auf die wirkliche Ausführung (Hauptausführung) übertragen werden können. Ziel der Ähnlichkeitsmechanik ist es, Skalierungsfaktoren oder Ähnlichkeitsmaßstäbe für alle (relevanten) physikalischen Größen eines Systems aufzustellen.

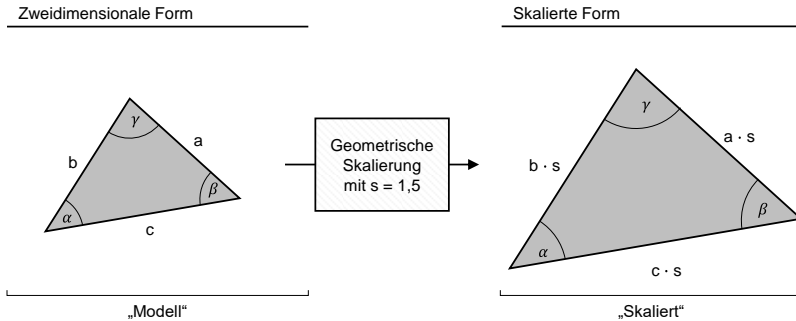


Abbildung 2.12: Geometrische Skalierung eines Dreiecks. Erweiterte Darstellung aus Deimel (2007, S. 4)

Die Ähnlichkeitstheorie wird in verschiedenen naturwissenschaftlichen Disziplinen genutzt, um physikalisch-technische Sachverhalte zu untersuchen und die Effekte auf skalierte Systeme zu übertragen, um anhand von experimentellen Versuchen mit skalierten Modellen Effekte und Eigenschaften eines unskalierten Systems zu erforschen. Beispielsweise zur Überprüfung einer Technologie in kleinerem Maßstab, ob diese ihre Funktionen erfüllt, oder um Sachverhalte zu übertragen.

Ähnlichkeitsmaßstäbe beschreiben das Verhältnis einer physikalischen Größe im Modell und dem skalierten Modell. Oft wird der Ähnlichkeitsmaßstab auch als Maßstabsfaktor bezeichnet und i.d.R. mit einem φ oder einem δ abgekürzt. Das Verhältnis der geometrischen Skalierung ist der Stufensprung (Längenmaßstab φL)

$$\varphi L = L_1 / L_0 \quad (1)$$

(mit L_1 Abmessung des 1. Glieds in der Baureihe (Folgeentwurf), L_0 Abmessung des Grundentwurfs). In der Literatur finden sich unterschiedliche Bezeichnungen, ebenso werden verschiedene Formelzeichen (φ oder δ) zur Beschreibung der Ähnlichkeitsmaßstäbe verwendet.

Über die reine geometrische Skalierung hinausgehend führt Mach (1917) die physikalische Ähnlichkeit ein. Die physikalische Ähnlichkeit besagt, dass physikalische Effekte in einem geometrisch ähnlichen System auch ähnlich ablaufen.

„Vorgänge sind physikalisch ähnlich, wenn Grundgrößen und abgeleitete Größen der beschreibenden Gleichungen in einem festen Verhältnis stehen.“ Conrad, Schiemann und Vömel (1977, S. 82)

In derselben Weise lässt sich eine zeitliche, Kraft-, elektrische, thermische und photometrische Ähnlichkeit angeben.

Einschränkung

Vollständige mechanische Ähnlichkeit liegt vor, wenn alle am physikalischen Prozess oder Vorgang beteiligten Größen, wie Wege, Zeiten, Kräfte, Spannungen, Geschwindigkeiten, Drücke, Arbeiten usw. entsprechend den physikalischen Gesetzen ähnlich übertragen werden. (Grote & Feldhusen, 2014)

Vollkommene mechanische Ähnlichkeit ist jedoch im Allgemeinen nicht möglich, da zur Übertragung nur die SI-Basiseinheiten m , kg , s und K bzw. deren Maßstabsfaktoren zur Verfügung stehen, ergänzt durch Stoffparameter, wie Dichte δ , Elastizitätsmodul E usw. Daraus folgt, dass nur eine beschränkte Anzahl physikalischer Grundgleichungen ähnlich übertragbar ist, eine vollständige Ähnlichkeit kann nicht immer erreicht werden.

Häufig lässt sich eine vollständige Ähnlichkeit wegen der großen Zahl der Einflussgrößen nicht erzielen. Man beschränkt sich dann (auch aus Ersparnisgründen) auf die Ähnlichkeit der bei einem Vorgang dominierenden Größen und verfügt über die restlichen frei (Lackmann & Villwock, 2014, S. 78–80). Daraus folgt, dass unvollkommene Ähnlichkeit⁷ immer erreicht werden kann. Welche Ähnlichkeit erzielt werden kann, hängt dabei von der Wahl der relevanten Größen ab.

Eine detaillierte Darstellung der Ähnlichkeitsmechanik als Teilgebiet der Physik im Zusammenhang mit der Dimensionslehre (Dimensionsanalyse) und der Modellwissenschaft hat Moritz Weber im Jahre 1930 aufgestellt. (Weber, 1930)

2.4.2 Ähnlichkeitsgesetze

Es gibt eine Vielzahl an grundlegenden Modellgesetzen. Eine Übersicht der im Maschinenbau existierenden Ähnlichkeitskennzahlen liefert beispielsweise Lackmann

⁷ unvollkommene Ähnlichkeiten werden in der Literatur nach Pahl, Beitz, Feldhusen und Grote (2007, S. 633) auch als Halbähnlichkeiten oder Teilähnlichkeiten bezeichnet.

und Villwock (2014, S. 78–80). Nachfolgend werden einige der Ähnlichkeitskennzahlen betrachtet.

Aus Sicht der skalierten Absicherung im XiL-Kontext ist insbesondere die technisch-physikalische Ähnlichkeit von Bedeutung. Das Konzept der Ähnlichkeit wird in dieser Arbeit nur für den technischen Bereich erläutert werden, da andere bekannte Begriffsverwendungen, bspw. aus der Philosophie, Psychologie und Linguistik für diese Arbeit nicht relevant sind.

Grundähnlichkeiten

Mit den Grundgrößen Länge, Zeit, Kraft, Elektrizitätsmenge bzw. Stromstärke, Temperatur und Lichtstärke lassen sich Grundähnlichkeiten (siehe Tabelle 2.1) definieren.

Tabelle 2.1: Grundähnlichkeiten nach Pahl, Beitz, Feldhusen und Grote (2007, S. 631)

| Ähnlichkeit | Grundgröße | Invariante |
|----------------|--------------------|-----------------------------------------------|
| geometrische | Länge | $\varphi_L = L_1/L_0$ |
| zeitliche | Zeit | $\varphi_t = t_1/t_0$ |
| Kraft- | Kraft | $\varphi_F = F_1/F_0$ |
| elektrische | Elektrizitätsmenge | $\varphi_Q = Q_1/Q_0$ |
| thermische | Temperatur | $\varphi_\vartheta = \vartheta_1/\vartheta_0$ |
| photometrische | Lichtstärke | $\varphi_B = B_1/B_0$ |

So ist eine geometrische Ähnlichkeit gegeben, wenn stets das Verhältnis aller jeweiligen Längen bei den Folgeentwürfen der Baureihe zum Grundentwurf konstant bleibt (siehe Abbildung 2.12).

Spezielle Ähnlichkeiten

Neben den Grundähnlichkeiten für zeitliche, Kraft-, elektrische, thermische und photometrische Ähnlichkeit existieren auch spezielle Ähnlichkeiten. Sind nun mehr als jeweils eine dieser Grundähnlichkeiten konstant, liegen spezielle Ähnlichkeiten vor, die eine besondere Aussage ermöglichen (siehe Tabelle 2.2).

So spricht man bei gleichzeitiger Invarianz der Länge und Zeit von kinematischer Ähnlichkeit. Dynamische Ähnlichkeit liegt dann vor, wenn sich alle Kräfte im selben Verhältnis ändern. Wird eine Strömung aus der Natur modelliert, so müssen alle Kräfte aus der Navier-Stokes-Gleichung im selben Verhältnis stehen (Druckkräfte, Schwerekräfte, Trägheitskräfte und Zähigkeitskräfte).

Tabelle 2.2: Spezielle Ähnlichkeitsbeziehungen nach Pahl et al. (2007, S. 632)

| Ählichkeit | Invariante | Kennzahl | Definition | Anschauliche Deutung |
|--------------|-----------------------------------|----------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| kinematische | φ_L, φ_t | | | |
| statische | φ_L, φ_F | Hooke | $Ho = \frac{F}{E \cdot L^2}$ | bezogene elastische Kraft |
| dynamische | $\varphi_L, \varphi_t, \varphi_F$ | Newton | $Ne = \frac{F}{\rho \cdot v^2 \cdot L^2}$ | bezogene Trägheitskraft |
| | | Cauchy* | $Ca = \frac{Ho}{Ne} = \frac{\rho \cdot v^2}{E}$ | Trägheitskraft/ elastische Kraft |
| | | Froude | $Fr = \frac{v^2}{g \cdot L}$ | Trägheitskraft/ Schwerkraft |
| | | NN** | $\frac{E}{\rho \cdot g \cdot L}$ | elastische Kraft/ Schwerkraft |
| thermische | φ_L, φ_v | Biot | $Bi = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$ | zu- bzw. abgeführte/ geleitete Wärmeenergie |
| | | Fourier | $Fo = \frac{\lambda \cdot t}{c \cdot \rho \cdot L^2}$ | geleitete/gespeicherte Wärmemenge |

* In einigen Veröffentlichungen wird $Ca = v \cdot \sqrt{\rho/E}$ angegeben. Dies ist dann zweckmäßig, wenn Ca als Geschwindigkeitsverhältnis gelten soll.

** Nicht benannt.

Weitere Beispiele können der Literatur (vgl. Lackmann & Villwock, 2014; Pahl et al., 2003; Pahl et al., 2007) entnommen werden.

2.4.3 Dimensionshomogenität und Buckingham Theorem

Dimension

Jede physikalische Größe setzt sich zusammen aus einem Zahlenwert und einer Dimension oder Einheit, wird also als Vielfaches einer willkürlich wählbaren Bezugsgröße ausgedrückt (beispielsweise als Vielfaches der Bezugslängen wie Meter, Fuß oder Zoll). Physikalische Größen werden entsprechend des Internationalen Einheitensystems (SI) (vgl. DIN 1313:1998-12, S. 4) in Basisgrößen mit ihren Dimensionen eingeteilt (siehe Tabelle 2.3).

Eine physikalische Beziehung selbst muss natürlich unabhängig sein von der Wahl dieser Bezugsgrößen, also unabhängig von den jeweiligen Dimensionseinheiten. Diese Bedingung für die Korrektheit und Vollständigkeit einer physikalischen Modellvorstellung wird als Dimensionshomogenität bezeichnet und stellt damit ein fundamentales Prinzip der Naturwissenschaft dar. Es muss gelten, dass das physikalische Modell der beliebigen Größen (x_1, \dots, x_n) sich in die Form

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \tag{2}$$

überführen lässt. Wichtig ist, dass die Dimensionshomogenität beachtet wird, so dass die linke und die rechte Seite der Gleichung dimensionslos werden.

Tabelle 2.3: Internationales Einheitensystem nach DIN 1313:1998-12, S. 4

| Basisgröße | Basiseinheit | Dimension | Symbol |
|------------|--------------|-----------------|----------------------|
| Kilogramm | <i>kg</i> | Masse | <i>M</i> |
| Meter | <i>m</i> | Länge | <i>L</i> |
| Sekunde | <i>s</i> | Zeit | <i>T</i> |
| Kelvin | <i>K</i> | Temperatur | Θ |
| Ampere | <i>A</i> | Stromstärke | <i>I</i> |
| Mol | <i>mol</i> | Stoffmenge | ν |
| Candela | <i>cd</i> | Lichtintensität | <i>I_L</i> |

Die Bedingung der Homogenität der Dimensionen muss auch dann erfüllt sein, wenn die physikalische Beziehung nicht explizit als Gleichung vorliegt. Auch für eine unbekannte Funktion ergibt sich die Forderung, dass diese dimensionsmäßig homogen sein muss.

Buckingham Theorem

Zur Reduktion der Komplexität von physikalischen Problemen kann das Buckingham Theorem verwendet werden. Mit diesem Theorem können physikalische Vorgänge auch ohne Kenntnis der exakten Gesetzmäßigkeiten beschreiben werden.

Es zeigt sich, dass die Beschreibung eines physikalischen Zusammenhangs, basierend auf dem Maßsystem, irrelevant für die Beschreibung des Phänomens selbst ist. Daraus folgt, dass eine dimensionslose Darstellung des Problems eine geringere Komplexität, also eine geringere notwendige Informationsmenge, aufweist und so die Zahl der Variablen sinkt. (Spurk, 1992)

Sind die mit Einheiten behafteten Einflussgrößen eines Vorgangs bekannt, so lassen sich aus ihnen Potenzprodukte in Form einheitenloser Kennzahlen bilden. Jede physikalisch richtige Größengleichung lässt sich als Funktion der Kennzahlen eines vollständigen Satzes darstellen (II-Theorem von Buckingham (1914)). Basierend auf dieser Erkenntnis wird die Dimensionsanalyse genutzt, um physikalische Vorgänge dimensionslos zu beschreiben.

Aus den vorhergehenden Beschreibungen wird ersichtlich, dass die Forderung der Dimensionsechtheit zu einer Reduzierung der Zahl der Variablen einer physikalischen Beziehung ausgenutzt werden kann. Die mathematischen Beweise wurden

von Vaschy (1892), Riabouchinsky (1911) und Buckingham (1914) aufgestellt. Görtler (1975) vereinte den damaligen Wissensstand und stellte diesen beweistechnisch dar.

Elementare Anwendung der Dimensionsanalyse zeigen Unger und Leyer (2015). An vielen fachspezifischen Beispielen wird die Dimensionsanalyse zur Beschreibung physikalischer Vorgänge genutzt, ohne vorab die exakten Gesetzmäßigkeiten zu kennen.

2.4.4 Vorgehen zur Ableitung von Ähnlichkeitsgesetzen

Grundsätzlich gibt es nach Deimel (2007, S. 9) zwei Möglichkeiten, Ähnlichkeitskennzahlen abzuleiten. Die Wahl der Methode hängt vom vorliegenden Modell, also der physikalisch-mathematischen Beschreibung des Sachverhaltes, ab. Nachfolgend werden die einzelnen Möglichkeiten vorgestellt.

Ähnlichkeitskennzahlen für explizite Sachverhalte

Wenn ein Sachverhalt explizit formuliert werden kann, liegen algebraische Gleichungen oder Differenzialgleichungen vor. Aufgrund der Dimensionshomogenität können mittels Äquivalenzumformungen die vorliegenden Gleichungen dimensionslos dargestellt werden. Die einzelnen Summanden bilden die Ähnlichkeitskennzahlen. (Deimel, 2007, S. 9)

Dimensionsanalyse abgeleitet aus einer Relevanzliste

Kann ein Problem nur prinzipiell beschrieben werden, können mit Hilfe einer Relevanzliste und einer Dimensionsanalyse die Ähnlichkeitszahlen abgeleitet werden. Die Dimensionsanalyse berechnet dimensionslose Produkte, die für das Problem gültig sind. Die Grundlagen sind beispielsweise in Weber (1919) dargestellt.

Eine Relevanzliste nach Herwig (2016, S. 66) ist eine Auflistung, die alle für das Systemverhalten relevanten Parameter beinhaltet. Sie basiert auf der Modellierung des physikalisch-technischen Sachverhalts. Ausschlaggebend für die Aussagekraft der Ähnlichkeitskennzahlen ist, dass alle Parameter der zu bewertenden Systemeffekte berücksichtigt werden. Ist die Relevanzliste unvollständig, können keine Aussagen über die von den fehlenden Parametern verursachten Effekte getroffen werden. (Herwig, 2016)

Pawlowski (1971) sieht den Vorteil der Dimensionsanalyse bei sehr komplexen Problemstellungen, die entweder mathematisch nicht vollständig beschrieben sind oder nur numerisch mit hohem Aufwand gelöst werden können. Vorteilhaft ist, dass

lediglich die am physikalisch-technischen Sachverhalt teilhabenden Parameter bekannt sein müssen. Dies erklärt auch den etablierten Einsatz von Dimensionsanalysen im Bereich der Fluidodynamik, da in der Vergangenheit numerische Probleme nur mit einem sehr hohen Aufwand gelöst werden konnten.

Eine von Koschorrek (2007) entwickelte Methodik unterstützt gezielt mit Hilfe dimensionsloser Kennzahlen die Konzeptfindung. Koschorrek zeigt dabei die Vor- und Nachteile einer frühen Einbindung von dimensionslosen Kennzahlen in den Produktentstehungsprozess und beschreibt eine übergreifende Vorgehensweise. Dieses Vorgehen zeigt, wie Ähnlichkeitskennzahlen systematisch und ganzheitlich in Produktentstehungsprozessen eingesetzt werden können. (Koschorrek, 2007)

Die Skalierung von Modellen wird überwiegend mit einer Dimensionsanalyse durchgeführt, aus relevanten Einflussgrößen werden dazu dimensionslose Kennzahlen auf Basis der Dimensionshomogenität physikalischer Zusammenhänge abgeleitet. Das Vorgehen basiert auf dem Gauß-Algorithmus und ist in der Literatur extensiv beschrieben (siehe Spurk, 1992, S. 33; Stichlmair, 1990, S. 30). Für die systematische Ableitung von Ähnlichkeitskennzahlen mittels einer Dimensionsanalyse kann die von Pawlowski entwickelte Kalkültechnik (Pawlowski, 1971) Einsatz finden.

Abbildung 2.13 zeigt ein allgemeines Vorgehen nach Lotz (2017, S. 22):

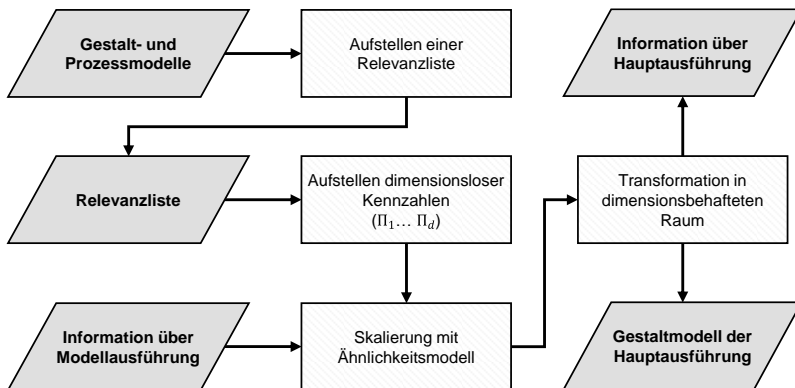


Abbildung 2.13: Vorgehen bei der Skalierung ausgehend von einer Modellausführung mittels Dimensionsanalyse. Darstellung nach Lotz (2017, S. 22)

Anwendungen auf physikalische Probleme (vgl. Pawlowski, 1971, S. 99; Sedov, 1993, S. 24; Stichlmair, 1990, S. 82) und maschinenbauliche Anwendungen (vgl.

Hilgert, 2005, S. 62) sind ebenfalls in der Literatur zu finden. Durch die vermehrte Nutzung der Baureihenentwicklung für technische Systeme, wird die Ähnlichkeitsanalyse häufiger auch für mechanische und mechatronische Probleme genutzt. (Herwig, 2016)

2.4.5 Modellversuche im Windkanal und Skalierte Untersuchungen

Ein 2016 veröffentlichtes Review-Paper (siehe Coutinho et al., 2016) fasst den aktuellen Stand bezüglich Ähnlichkeitskennzahlen und deren Verwendung zusammen. Nachfolgend wird auf einige Untersuchungen durch Nutzung der Ähnlichkeit eingegangen. Weitere Beispiele finden sich in zahlreichen Veröffentlichungen (siehe Deimel, 2007; Koschorrek, 2007; Lackmann & Villwock, 2014; Moog, 1985; Pahl & Zhang, 1984; Pawlowski, 1971; Unger & Leyer, 2015; Zohuri, 2017).

Modellversuche im Windkanal

Die Nutzung der Ähnlichkeitsmechanik wird in der Modelltechnik mit großem Erfolg genutzt werden. Strömungsprobleme werden auch heute noch in maßstabsgetreuen Dimensionen in Windkanälen untersucht. (Herwig, 2016, S. 77)

Früher konnten Systeme wie Flugzeuge und Schiffe in frühen Entwicklungsphasen nicht in Originalgröße physisch getestet werden. Auch eine simulative Untersuchung war noch nicht möglich. Häufig wurden deshalb verkleinerte Flugzeuge in Windkanal erprobt und damit Erkenntnisse über das System in Originalgröße abgeleitet. Im Windkanal können nur wenige Objekte in der Originalgröße untersucht werden. Beispielsweise können Autos in ausreichend großen Windkanälen untersucht werden, da hierfür relativ niedrige Luftgeschwindigkeiten ausreichen. Für größere Objekte werden sehr hohe Luftgeschwindigkeiten benötigt und die verfügbaren Windkanäle sind dann in ihrer Größe begrenzt.

Häufig sind Untersuchungen im Windkanal nur mit verkleinerten Systemen möglich. Für Flugzeuge, Schiffe und Gebäude kommen dazu verkleinerte Modelle zum Einsatz. Ohne verkleinerte Systeme werden entsprechend große Prüfstände benötigt. Weitere Herausforderungen ergeben sich durch die hohen Strömungsgeschwindigkeiten die beispielsweise bei Flugzeugen in Originalgröße im Windkanal benötigt werden. (Herwig, 2016)

Untersuchungen im Windkanal dienen beispielsweise dazu, den Luftwiderstand, den dynamischen Auftrieb oder Verformungen durch Aeroelastizität zu untersuchen.

Neben Simulationen dient der Windkanal zur frühen Absicherung der Flugeigenschaften und zur Ermittlung der Auftriebskraft. Ziel ist es mit einem verkleinerten Flugzeugmodell die Auftriebskraft in Versuchen in Windkanal zu ermitteln. Für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten gibt es spezialisierte Windkanäle. Um mit den Ergebnissen an einem Modell anschließend auf die Strömungseigenschaften des Original schließen zu können, ist es wichtig, dass in beiden Fällen strömungsmechanische Ähnlichkeit herrscht. Repräsentative Ähnlichkeitszahlen in der Strömungsmechanik sind: Die Froude-Zahl, die Reynolds-Zahl und die Mach-Zahl. (Lackmann & Villwock, 2014, B65)

Die Form der Strömung sowie das Turbulenzverhalten um einen Körper hängt von seiner Reynolds-Zahl ab. Dabei ist ρ die Dichte des Fluids, v die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids gegenüber dem Körper und d die charakteristische Länge des Körpers. (Nitsche & Brunn, 2006, S. 41; Pahl et al., 2007, S. 632)

Die Reynolds-Zahl ist definiert als: $Re = \frac{\rho v d}{\eta} = \frac{v d}{\nu}$

Bei gleicher Reynolds-Zahl ist das Turbulenzverhalten geometrisch ähnlicher Körper gleich. Wichtig bei Untersuchungen im Windkanal ist, dass die Reynoldszahl der Umströmung im Original entspricht. Die Anpassung der Reynoldszahl im Windkanal kann durch eine höhere Dichte des Mediums, oder eine höhere Geschwindigkeit erreicht werden.

Betrachtet werden in den Experimenten dabei die Auftriebskräfte oder die Bestimmung des Luftwiderstands. Die Ergebnisse zum Verhalten eines verkleinerten Modells im Windkanal können auf Verhalten des Original in der Umwelt verrechnet werden. Oft lässt sich keine vollständige Ähnlichkeit zwischen Modell und Original erzielen. In der Bewertung kann dann nicht alle Effekte berücksichtigt werden (Herwig, 2016, S. 80). Die Verrechnung auf das System in Original-Größe kann dabei auch im Nachgang an das Experiment erfolgen. Es erfolgt dabei die Skalierung des gesamten Modells, es liegen also alle Teilsysteme in einer veränderten Skalierung vor.

In der heutigen Zeit findet die Ähnlichkeitstheorie fast ausschließlich im Bereich der Strömungslehre (Herwig, 2016; Zierep, 1992), Luftfahrt und Schifffahrt (Weber, 1940) ihre praktische Anwendung. Weiter wurde die Ähnlichkeitstheorie bei der Entwicklung von Prototypen (Weber, 1919) und der Untersuchungen miniaturisierter Druckbehälter auf ihre Berstdrücke (Schrandt, Schulz, Beckert & Koppa, 2017) eingesetzt.

Skalierte Versuche in der Produktentwicklung

Mit der Einführung der Baureihenentwicklung von Systemen hält die Ähnlichkeitsanalyse mehr und mehr Einzug in die Mechanik (Herwig, 2016). In der Baureihenentwicklung werden Methoden der Ähnlichkeitstheorie und Ähnlichkeitskennzahlen meist sehr anwendungsorientiert genutzt.

Technische Modelle, die rein geometrisch ähnlich vergrößert werden (sog. Storchschnabelkonstruktionen, vgl. Pahl et al., 2003, S. 630) sind i.d.R. nicht zielführend. Ziel in einer Baureihenentwicklung ist, neben einer geometrischen Ähnlichkeit weitere Eigenschaften zu erfüllen. Dabei werden technische Systeme bei gleichem Material, gleicher Werkstoffausnutzung und gleicher Technologie skaliert, um die Entwicklungskosten für eine Produktfamilie so gering wie möglich zu halten. (Feldhusen & Grote, 2013)

Im Bereich der Konzeptfindung werden Ähnlichkeitsgesetze vereinzelt verwendet, um Konzeptvariationen zu validieren. Hier werden gezielt vollständige Sätze von Ähnlichkeitskennzahlen mit Methoden der Dimensionsanalyse abgeleitet. Hartogh und Viotor (2017) verwendete Ansätze der Dimensionsanalyse zur Bewertung von Designlösungen. Koschorrek (2007) nutzt seine vorgestellte Methodik, um mit Hilfe dimensionsloser Kennzahlen die Konzeptfindung, am Beispiel eines PKW-Schwellerprofils, zu unterstützen.

Ein weiteres Einsatzgebiet ist die systematische Optimierung und Bewertung von Konstruktionslösungen (siehe Deimel, 2007). Hier wird die dimensionslose Darstellung genutzt, um auf Grundlage der Graphentheorie, Neuronale Netzwerke für die Auswertung und Optimierung von Konstruktionen zu verwenden (Deimel, 2007; Rudolph, 1995).

Lehmann (1959) und Dietz (1983) nutzten die Grundlagen der Ähnlichkeitsmechanik für die Anwendung beim Entwerfen von Werkzeugmaschinen der mechanischen Umformtechnik. Zusätzlich wurde die Ähnlichkeitstheorie von Cho, Wood und Crawford (1998) in Kombination mit dem Rapid Prototyping verwendet.

Darüber hinaus wurden maßstabsgetreue Modelle von Straßenfahrzeugen in den Experimenten von Lapamong et al. (2009) eingesetzt. Pahl & Zhang (1984) bewerten darüber hinaus die dynamische und thermische Ähnlichkeit von Kupplungen in der Serienentwicklung. Skalierung wurde auch im Bereich mechatronischer Probleme eingesetzt (vgl. Cem, Brandt, Heckhoff & Schramm, 2007; Esteban, Salgado, Iturraspe & Isasa, 2017; Petersheim & Brennan, 2009; Zhu & Teppo, 2003).

2.4.6 Zwischenfazit

Die Ansätze zur Ähnlichkeit und die vielfältige Anwendung der Ähnlichkeit in unterschiedlichen Bereichen zeigen nach dem aktuellen Stand der Forschung deren Stellenwert.

Häufig werden Windkanäle für Untersuchungen von verkleinerten Modellen genutzt, um damit trotz des verkleinerten Modells Aussagen über den Luftwiderstand oder die Auftriebskräfte des Originals zu gewinnen. Einsatz finden solche Windkanäle bei Flugzeugen, Schiffen, Gebäuden mit verkleinerten Modellen. Für kleinere Objekte wie Straßenfahrzeuge gibt es passende Windkanäle.

Dennoch bleiben die Vorzüge dieses Verfahrens erstaunlicherweise auch heute im XiL-Kontext für die Untersuchung eines skalierten Modells noch ungenutzt. Für Antriebstrangentwicklungen werden mit Windkanälen vergleichbare Untersuchungen nicht genutzt. Eine Anpassung der Wechselwirkungen an skalierte Modelle erfolgt kaum. Die Wechselwirkungen der miteinander interagierenden Teilsysteme sind vor allem bei der Entwicklung von Antriebsträngen sind zu berücksichtigen. Wichtig ist dabei ein kontinuierlicher Austausch der Leistungsgrößen zwischen den physischen und virtuellen Teilsystemen über Koppelsysteme. Der Austausch der Leistungsgrößen muss dabei in einem geschlossenen Signalkreislauf erfolgen.

Die erfolgreiche Anwendung der Ähnlichkeiten erfordert große Sorgfalt und physikalisches Verständnis für das jeweils betrachtete Problem (Kobus, 1974). Eine Gefahr in der Verwendung der Ähnlichkeit besteht darin, dass zusätzliche Skalierungseffekte auftreten, wenn Hardware einer Größe durch Hardware einer anderen Größe simuliert wird. (Herwig, 2016, S. 80)

Häufig lässt sich eine vollständige Ähnlichkeit wegen der großen Zahl der Einflussgrößen nicht erzielen. Man beschränkt sich dann (auch aus Ersparnisgründen) auf die Ähnlichkeit der bei einem Vorgang dominierenden Größen (Grote & Feldhusen, 2014, B65).

Im Stand der Forschung zu Ähnlichkeiten existieren mehrere Verfahren zur Ableitung der dimensionslosen Kennzahlen, die situationsangepasst eingesetzt werden. Für viele unterschiedliche Komponenten und Vorgänge existieren in der Literatur bereits Beispiele zur Anwendung der Ähnlichkeiten und dimensionslosen Kennzahlen.

Der Einsatz von Ähnlichkeitsmethoden zur Einbindung von frühen Prototypen in die interagierenden Teilsysteme anderer Skalierung wird heute bei Untersuchungen von Antriebstrangsystemen auf XiL-Prüfständen noch nicht genutzt.

2.5 Fazit zum Stand der Forschung und Forschungsbedarf

Ausgehend von der Relevanz der Absicherung in der Produktentwicklung wurden aktuelle Ansätze und Möglichkeiten der Validierung vorgestellt. Ergänzt wurde die Aufbereitung zum Stand der Forschung durch Ansätze zur Skalierung und zu den Grundlagen von Elektrowerkzeugen.

Neben der Absicherung der Produkthanforderungen dient auch die Eigenschaftsanalyse dem Aufbau von Systemwissen. Die Test- und Validierungsaktivitäten nach dem aktuellen Stand der Forschung zeigen mit den vielfältigen Ausprägungen deren Stellenwert in der Produktentwicklung. Die Entwicklung erfolgt dabei unter Nutzung von Referenzprodukten und Baureihen und Baukästen.

Der X-in-the-Loop-Ansatz ist in unterschiedlichen Aktivitäten zur Absicherung etabliert und ermöglicht die adäquate Einbindung des Gesamtsystems im Test und Prüfstandsuntersuchungen. Damit kann das Gesamtsystemverhalten mit den Wechselwirkungen zwischen den interagierenden Komponenten in Tests abgesichert werden.

Koppelsysteme ermöglichen dabei die Anbindung der zu testenden Komponente an das Restsystem. Das Restsystem kann dabei als virtuelles Modell oder als physische Hardware vorliegen. Prüfstände aus dem Stand der Forschung erfordern funktionsfähige Prototypen, welche typischerweise erst nach circa 30-40 % der Entwicklungszeit vorliegen.

Die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen den interagierenden Teilsystemen findet in Test- und Validierungsaktivitäten im Entwicklungsprozess oft erst spät statt, da hierfür Hardwareprototypen für das gesamte Produkt benötigt werden. Bei sicherheitskritischen Komponenten kann eine späte Absicherung teure Iterationen auslösen. Die Wechselwirkungen sind vor allem bei Antriebsträngen wie sie auch in Elektrowerkzeugen genutzt werden von besonderer Bedeutung.

Dem Stand der Forschung ist zu entnehmen, dass es vielfältige Ausprägungen von Modellversuchen oder skalierten Untersuchungen gibt. Derartige Untersuchungen reichen weit zurück. Auch heute noch werden Modellversuche mit skalierten Flugzeugen in Windkanälen durchgeführt, um früh Erkenntnisse über das System zu erlangen. Dabei wird häufig ein verkleinertes Modell in einer skalierten Umgebung untersucht. Eine Anpassung von Leistungsgrößen zwischen unterschiedliche skalierten Teilsystemen erfolgt nicht.

Die bei Modellversuchen eingesetzten Methoden und Ansätze sind je nach Zweck und vorliegenden Randbedingungen sehr unterschiedlich. Ein Einsatz dieser Ansätze in der skalierten Absicherung von Antriebssträngen auf XiL-Prüfständen erfolgte bisher nicht. Um die Wechselwirkungen der miteinander interagierenden Teilsysteme zu berücksichtigen ist ein kontinuierlicher Austausch der Leistungsgrößen zwischen den physischen und virtuellen Teilsystemen über Koppelsysteme notwendig.

Zusammenfassend zeigt sich in Abbildung 2.14, dass Skalierungsansätze für die frühen Absicherung von Antriebssystemen auf XiL-Prüfständen noch nicht genutzt werden. Forschungsbedarf ergibt sich hinsichtlich der Ansätze, um das gemeinsame Testen von unterschiedlich skalierten Komponenten eines rotatorischen Antriebsstrangs auf einem Prüfstand zu ermöglichen. Es fehlen Testumgebungen und dazu passende Methoden, um früh in der Entwicklung Antriebsstrang-Teilsysteme unterschiedlicher Größenstufe gemeinsam hinsichtlich der Funktionserfüllung zu untersuchen. Eine Kombination von Koppelsystemen in XiL-Prüfständen und Ansätzen der Skalierung kann bei rotatorischen Antriebssystemen Potenzial für eine vorzuzogene Absicherung bieten.

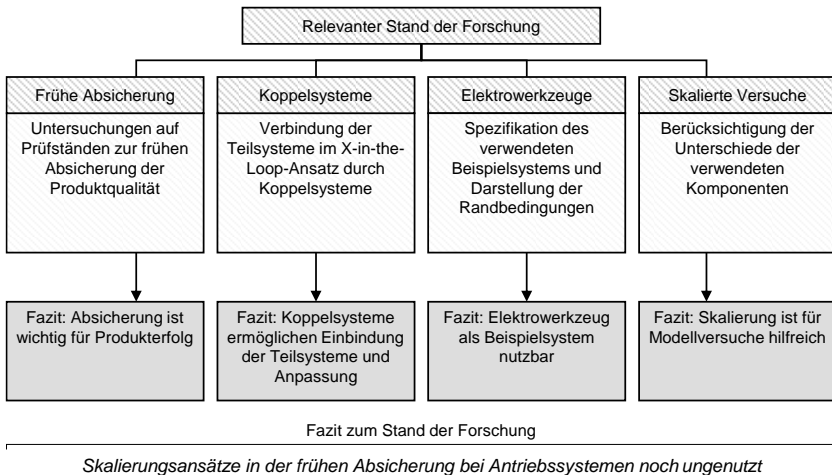


Abbildung 2.14: Fazit zum Stand der Forschung

3 Motivation und Zielsetzung

In diesem Kapitel wird aus dem Stand der Forschung die Motivation abgeleitet. Aus dem Stand der Forschung werden die Herausforderungen der frühen Absicherung dargestellt und notwendige Unterstützung der Absicherung mit skalierten Prototypen in frühen Phasen der Produktentwicklung vorgestellt. Basierend auf den aufgezeigten Herausforderungen wird die Zielsetzung der vorliegenden Forschungsarbeit erläutert.

3.1 Motivation

Eine häufige Herausforderung in der Produktentwicklung ist das frühzeitige Erlangen von Erkenntnissen über das Systemverhalten, um diese in die weiteren Entwicklungsaktivitäten einfließen zu lassen. Um Wechselwirkungen zwischen den Komponenten berücksichtigen zu können, wird ein möglichst fertiges Produkt oder passendes virtuelles Modell benötigt.

Die Berücksichtigung von Wechselwirkungen stellt gerade bei der Abstimmung von Antriebsstrangkomponenten hinsichtlich Sicherheitsaspekten ein wichtiges Ziel der Absicherung dar. Die Berücksichtigung dieser System-Wechselwirkungen erfolgt häufig in den Test- und Validierungsaktivitäten im Entwicklungsprozess erst wenn alle Systemeigenschaften bekannt sind oder Hardwareprototypen des zu entwickelnden Produkts vorliegen. Zusätzliche Herausforderungen ergeben sich, wenn die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bauteilen und Teilsystemen in der Absicherung abgebildet werden müssen.

Die Entwicklung von neuen Produkten erfolgt häufig unter Nutzung von Baureihen (vgl. Krause & Gebhardt, 2018, S. 144) und Baukästen, um die Anzahl an Varianten in der Produktentwicklung und die resultierenden Unsicherheiten zu reduzieren. Um das Risiko zu minimieren, erfolgt die Entwicklung von Produkten durch die Kombination von erfolgreichen bestehenden Designs mit neuen, zu entwickelnden Komponenten.

Herausforderungen ergeben sich in der Absicherung durch die Kombination von bestehenden Designs mit neuen Komponenten. Häufig sind Untersuchungen zur Absicherung bereits in den frühen Entwicklungsphasen gewünscht, in denen zwar Referenzprodukte, jedoch noch keine funktionsfähigen Hardwareprototypen der

aktuellen Entwicklungsgeneration vorliegen (Gwosch, 2019). Für Untersuchungen auf Prüfständen ist die Einbindung von frühen Hardwareprototypen oder Referenzprodukten notwendig.

Das BMWi verdeutlicht in seinem Aufruf die Relevanz der Forschung an Methoden und Maßnahmen zur Unterstützung von Frontloading für deutsche Unternehmen. Von großer Bedeutung für die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie ist es, späte, langwierige und mit hohem wirtschaftlichem Impact verbundene Iterationen im Entwicklungsprozess durch den Einsatz von neuen Validierungsmethoden zu reduzieren. Zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen ist weitere Unterstützung des Frontloading im Entwicklungsprozess notwendig. Dieser Aspekt steht als ein Kernthema im Forschungsaufruf der Luftfahrtforschung. Daraus abgeleitet sind Validierungsansätze, welche diese Herausforderung adressieren, im Fokus der gegenwärtigen Forschung. (Greinke, 2014)

Zur Unterstützung des Frontloading in der Produktentwicklung fehlen Testumgebungen, in denen die bereits früh vorliegenden Prototypen aus Referenzprodukten im bestehenden Gesamtsystem getestet werden können, noch bevor vollständig funktionsfähige Versuchsträger der gewünschten Größenstufe vorliegen. Eine vorgezogene funktionale Absicherung für Teilsysteme aus Antriebssträngen, welche in unterschiedlichen Größenstufen vorliegen, findet bisher nicht statt.

Um das gemeinsame Testen von unterschiedlich skalierten Teilsystemen zu ermöglichen, ist die Anpassung der mechanischen Leistung zwischen den gekoppelten Teilsystemen erforderlich. In einem mechanisch gekoppelten System ist die unabhängige Anpassung von Drehmoment und Drehzahl für ein einzelnes Teilsystem aufgrund der Energieerhaltung nicht möglich. Für die Analyse des Systemverhaltens im Antriebsstrang müssen Wechselwirkungen trotz unterschiedlich skalierten Prototypen im Gesamtsystem abgebildet werden.

Notwendig sind Testumgebungen für Antriebsstränge, die eine Anpassung des Leistungsflusses erlauben und eine Einbindung des zu skalierten Systems in das Gesamtsystem unterstützen.

3.2 Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag

Um Entwicklungsrisiken zu begrenzen wird häufig in Vorentwicklungsphasen, in denen noch keine vollständig funktionsfähigen Versuchs- bzw. Technologieträger zur Verfügung stehen, eine frühe funktionale Absicherung mit Hardwarekomponen-

ten gewünscht. Um die aufgezeigten Herausforderungen zu bewältigen soll ein Ansatz zur Einbindung von skalierten Prototypen in das Gesamtsystem veranschaulicht und in Testumgebungen untersucht werden.

Für diese Forschungsarbeit ergibt sich folgende Zielsetzung:

Ziel der Forschungsarbeit ist die Erprobung einer Testumgebung anhand dreier Untersuchungsbeispiele und daraus die Ableitung einer Validierungsmethode zur frühen funktionalen Absicherung von Antriebssträngen.

Um die Zielsetzung zu erreichen wird der veranschaulichte Ansatz (siehe Kapitel 4.3) am Beispiel einer Testumgebung einer Sicherheitskupplung umgesetzt und in drei Beispieluntersuchungen bewertet.

Durch die Kopplung von unterschiedlichen skalierten Teilsystemen und dem zeitgleichen Betrieb in einem Antriebsstrangprüfstand soll eine vorgezogene Absicherung unterstützt werden. Die aus dem Ansatz abgeleitete Testumgebung soll den Einsatz von skalierten Prototypen aus Referenzsystemen für die vorgezogene Validierung in XiL-Plattformen ermöglichen und so das Frontloading in der Produktentwicklung unterstützen.

Die Integration der mechanischen Prototypen in bestehende (virtuell oder physisch vorhandene) Referenzprodukte erfolgt durch eine Skalierung des Leistungsflusses, um eine wirkungsäquivalente Einbindung trotz skalierte Baugröße zu ermöglichen. Zur Anpassung der Leistungsgrößen werden Skalierungsmodelle entwickelt und in Koppelsysteme eingebunden. Innerhalb der Skalierungsmodelle erfolgt die Verrechnung der Leistungsgrößen durch Skalierungsfaktoren. Die Skalierung ermöglicht in der Untersuchung die simulative Ergänzung der nicht im Versuchsträger vorhandenen Eigenschaften.

Die Einsatzmöglichkeiten des Ansatzes zu skalierten Untersuchungen sollen in der Produktentwicklung aufgezeigt und in Beispieluntersuchungen evaluiert werden. Anhand von drei Experimenten an einem Antriebsstrangprüfstand sollen Skalierungsfaktoren für die Anpassung der rotatorischen Leistungsgrößen zwischen miteinander verbundenen Systemen abgeleitet und anhand von Beispieluntersuchungen überprüft werden.

Die Zielsetzung dieser Forschungsarbeit beinhaltet die Entwicklung und Bereitstellung der Testumgebungen und Testmethoden, um Antriebsstrang-Teilsysteme unterschiedlicher Größenstufe gemeinsam in einem Antriebsstrangprüfstand hinsichtlich der Funktionserfüllung zu untersuchen. Die Zielsetzung schließt auch die

Beschreibung einer Validierungsmethode mit ein. Dazu erfolgt aus den drei Untersuchungsbeispiel eine Zusammenführung der methodischen Vorgehensweise zur Beschreibung der Validierungsmethode.

Elektrowerkzeug als Beispielsystem

Die Umsetzung des Ansatzes wird beispielhaft an einer Überlastkupplung eines Akubohrschraubers gezeigt. Es wird die Einbindung skalierten Komponenten in das Gesamtsystem über Koppelsysteme und Skalierungsmodelle an einem entwickelten Antriebsstrangprüfstand veranschaulicht. Die noch nicht im Versuchsträger vorhandenen Eigenschaften der zu entwickelnden Hardware werden simulativ ergänzt. Ziel beim Einsatz der Skalierungsmodelle in Antriebsstrangprüfständen ist der Aufbau von Systemverständnis, indem Versuche und Experimente reproduzierbar und unter Berücksichtigung der relevanten Wechselwirkungen früh im Entwicklungsprozess durchgeführt werden können.

3.2.1 Wissenschaftlicher Beitrag

Die Bewertung des Ansatzes in drei Beispieluntersuchungen, die Ableitung der notwendigen Skalierungsmodelle und die Zusammenführung einer Vorgehensweise zur Leistungsskalierung an den Schnittstellen der skalierten Komponente bilden den wissenschaftlichen Kern dieser Forschungsarbeit. Die Entwicklung von Skalierungsfaktoren ermöglicht eine Erweiterung von Antriebsstrangprüfständen, um eine vorgezogene Absicherung zu ermöglichen und Frontloading zu unterstützen.

Der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Mit dieser Arbeit ist es möglich, für skalierte Antriebsstrangkomponenten durch die Einbindung in das Gesamtsystem über Koppelsysteme und Skalierungsmodelle eine vorgezogene Absicherung der Konstruktion an einem Antriebsstrangprüfstand zu ermöglichen, bevor alle Teilsysteme in der richtigen Größenstufe vorliegen. Das Frontloading in der Produktentwicklung wird durch diese vorgezogene Absicherung unterstützt.

4 Forschungsdesign

Aus dem Stand der Forschung wurde in Kapitel 3 die Zielsetzung dieser Arbeit begründet. In diesem Kapitel werden aus der Zielsetzung die zu beantwortende Forschungsfrage abgeleitet und das Vorgehen zur Beantwortung erläutert. Die Forschungsfrage adressiert die Testumgebung und die notwendigen Methoden, um skalierte Untersuchungen zu ermöglichen.

4.1 Forschungsfragen

Für eine vorgezogene Absicherung stellt die Einbindung von Teilsystemen unterschiedlicher Größenstufen in das Gesamtsystem auf dem Prüfstand eine Herausforderung dar. Möglichkeiten, eine Absicherung zu verbessern und Erkenntnisse früher zu gewinnen, um damit Entwicklungsrisiken zu minimieren, stehen im Fokus dieser Arbeit.

Aus dem Stand der Forschung ist bekannt, dass Testumgebungen auf Basis des XiL-Ansatzes für Untersuchungen eines Teilsystems durch Einbindung in das Gesamtsystem geeignet sind. Der XiL-Ansatz unterstützt dabei die Abbildung von Wechselwirkungen mit den interagierenden Teilsystemen. Frühes Testen im Gesamtsystem reduziert die Risiken von späten Iterationen. Häufig sind jedoch nicht alle notwendigen Teilsysteme in der richtigen Größenstufe für die Absicherung verfügbar.

Die übergeordnete Forschungsfrage (FF) zur Erreichung der Zielsetzung lautet:

Wie muss ein Antriebsstrangprüfstand auf Basis des X-in-the-Loop-Ansatzes gestaltet sein, um die Einbindung von Antriebsstrangkomponenten unterschiedlicher Größenstufen zu unterstützen und eine vorgezogene Absicherung von Antriebsstrangkomponenten zu ermöglichen?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird ein Ansatz zur Kopplung von unterschiedlich skalierten Teilsystemen und dem zeitgleichen Betrieb in einem Antriebsstrangprüfstand genutzt. Ausgehend vom identifizierten Forschungsbedarf und der übergeordneten Forschungsfrage werden drei Teilforschungsfragen (TF) formuliert. Die drei Teilforschungsfragen dienen der Operationalisierung der Erprobung. Durch

drei Untersuchungsbeispiele werden die Teilforschungsfragen im Rahmen dieser Arbeit beantwortet:

Teilforschungsfragen

- TF 1: Wie kann die Anpassung der rotatorischen Leistung in einem XiL-Prüfstand erfolgen und welche mechanischen Parameter werden für die Ableitung der Leistungsskalierung benötigt?*
- TF 2: Welche Einflüsse der Teilsysteme müssen in den Skalierungsfaktoren berücksichtigt werden, um eine Anpassung der mechanischen Leistungsgrößen an unterschiedliche Größenstufen innerhalb des Antriebsstrangs zu ermöglichen?*
- TF 3: Wie gut können durch skalierte Versuche mit einer Leistungsskalierung Bauteilvarianten trotz unterschiedlicher Größenstufen hinsichtlich der Funktionserfüllung untersucht werden?*

Die erste Teilforschungsfrage (Kapitel 5) adressiert die Anwendung des Ansatzes an einem ersten Untersuchungsbeispiel zur Skalierung bezüglich eines Parameters. Dazu erfolgt die Anpassung der Leistung am Beispiel der skalierten Federkraft in einem rotatorischen XiL-Prüfstand. Ergebnis dieser Teilforschungsfrage ist eine Anpassung der rotatorischen Leistung in einem XiL-Prüfstand durch Skalierungsfaktoren in den Koppelsystemen und Verrechnungsgrößen der mechanischen Parameter für die Ableitung der Leistungsskalierung.

Die zweite Teilforschungsfrage (Kapitel 6) adressiert an einem weiteren Beispiel die Skalierung hinsichtlich der Größenunterschiede der Teilsysteme. Dazu werden die Größenunterschiede der betrachteten Komponenten analysiert und in Skalierungsfaktoren umgesetzt. Ergebnis dieser Teilforschungsfrage sind Möglichkeiten, um weitere Einflüsse, wie Größenunterschiede, in der Skalierung zu berücksichtigen und beispielspezifische Erkenntnisse zur Skalierung einer Überlastkupplung in rotatorischen Antriebssträngen.

Die dritte Teilforschungsfrage (Kapitel 7) adressiert den Einsatz der Skalierung zur Absicherung von Konstruktionsentscheidungen. Dazu werden Geometrievarianten unterschiedlicher Größenstufen hinsichtlich der Funktionserfüllung auf einem Antriebsstrangprüfstand untersucht. Ergebnis dieser Forschungsfrage ist eine Bewertung des Ansatzes zur Leistungsskalierung in XiL-Prüfständen und Überprüfung für Untersuchungen von Geometrievarianten. Anhand der Untersuchung wird überprüft, ob derartige Prüfstandsuntersuchungen mit skalierten Prototypen hilfreich für das Frontloading sind und einen Mehrwert hinsichtlich der früheren Absicherung bieten.

Mit dem Ergebnis der drei Teilforschungsfragen kann die übergeordnete Forschungsfrage beantwortet und eine Validierungsmethode beschrieben werden.

Als Ergebnis ergeben sich die Bewertung des Ansatzes durch drei Untersuchungsbeispiele (siehe Kapitel 5-7) für einen Antriebsstrang, die entwickelten Skalierungsmodelle am Beispielsystem Akkubohrschrauber und abgeleitete Beiträge zur Validierungsmethode (siehe Kapitel 8).

4.2 Forschungsvorgehen

Um die Teilforschungsfragen zu beantworten, wird als Grundlage das in Abbildung 4.1 Vorgehen zur skalierten Absicherung in der Produktentwicklung herangezogen.

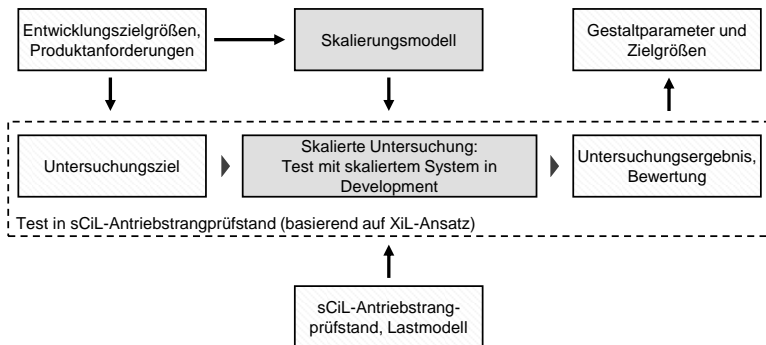


Abbildung 4.1: Vorgehen zur skalierten Absicherung in der Produktentwicklung, durch Einbindung von Teilsystemen anderer Größenstufen über Skalierungsmodelle und Koppelsysteme. (erweitert aus Gwosch, 2019)

Zur skalierten Absicherung von Konstruktionsentscheidungen und Bewertung von Bauteilvarianten werden Untersuchungen in einem XiL-Antriebsstrangprüfstand durchgeführt. Basierend auf den Entwicklungszielgrößen und Produktanforderungen wird ein spezifisches Untersuchungsziel abgeleitet. Die Untersuchungen erfolgen mit einem Antriebsstrangprüfstand, der auf dem X-in-the-Loop-Ansatz basiert und die Einbindung von Teilsystemen anderer Größenstufen ermöglicht. Ergänzt wird der Versuchsaufbau durch Skalierungsmodelle, um die Funktionsunterschiede der skalierten Prototypen zu berücksichtigen. Aus den Untersuchungsergebnissen

und einer Bewertung der Funktionsweise können Gestaltparameter abgeleitet werden, um eine vorgezogene Absicherung zu ermöglichen. Und das Frontloading zu unterstützen.

Aus dem Vorgehen in Abbildung 4.1 und den aufgestellten Teilforschungsfragen leitet sich das in Abbildung 4.2 dargestellte Forschungsvorgehen ab. Das Forschungsvorgehen ist in drei Teile gegliedert, welche im Wesentlichen die drei Teilforschungsfragen behandeln. Die Untersuchungen erfolgen auf dem scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstand¹. Als Beispiel wird eine Überlastkupplung eines Akkuboehrschraubers verwendet.

| | Ziel | Vorgehen | Ergebnis |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TF 1 | <ul style="list-style-type: none"> - Vorstudie zur Anpassung der rotatorischen Leistung - Entwicklung der Skalierung zur Anpassung an unterschiedliche Eigenschaften | <ul style="list-style-type: none"> - Ableitung der Skalierung basierend auf Modelleigenschaften - Experiment am XiL-Prüfstand zur Verifikation | <ul style="list-style-type: none"> - Nachweis der Skalierung am Beispiel Kupplung - Abgeleitete mechanische Parameter zur Skalierung der Kupplung - Erkenntnisse zum Ansatz |
| TF 2 | <ul style="list-style-type: none"> - Berücksichtigung weiterer Einflüsse in Skalierung - Entwicklung der Skalierung zur Anpassung an unterschiedliche Größenstufen | <ul style="list-style-type: none"> - Modellbildung Antriebsstrang und skaliertes Teilsystem - Unterschiedliche Größenstufen in Skalierung berücksichtigen - Experiment am Prüfstand zur Verifikation | <ul style="list-style-type: none"> - Erweiterung der Skalierung zur Nutzung eines Teilsystems anderer Größenstufe - simulative Betrachtung und exp. Nachweis |
| TF 3 | <ul style="list-style-type: none"> - Anwendung der Skalierung zur Absicherung von Konstruktionsentscheidungen. - Bewertung von zwei Bauteilvarianten in skalierten Versuchen | <ul style="list-style-type: none"> - Variantenuntersuchung in skalierten Experiment - Experimenteller Abgleich der Bauteilvarianten mit veränderter Gestalt | <ul style="list-style-type: none"> - Verhalten der skalierten Entwicklungsvarianten sind auf Folgeprodukt übertragbar - Skalierung ermöglicht vorgezogene Absicherung bei Entwicklungsentscheidungen |

Abbildung 4.2: Forschungsvorgehen zur Beantwortung der aufgestellten Teilforschungsfragen, bestehend aus den Zielen, dem gewählten Vorgehen und der erwarteten Ergebnisse.

Zur Beantwortung der ersten Teilforschungsfrage wird der Lösungsansatz (siehe Abbildung 4.3) zur Skalierung der Leistung in rotatorischen XiL-Antriebssträngen angewandt, um unterschiedlich skalierte Teilsysteme gemeinsam zu testen. Durch Skalierungsfaktoren werden abweichende Eigenschaften der Kupplung bezüglich

¹ scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstand wird in der weiteren Arbeit als sCiL-Prüfstand abgekürzt. Dabei handelt es sich um einen Entwicklungsprüfstand für Antriebsstrangteilsysteme, der auf dem IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz basiert

der Federkraft berücksichtigt. Es erfolgt eine experimentelle Überprüfung des Skalierungsmodells zur Anpassung der Federeigenschaften der Kupplung auf einem XiL-Prüfstand.

Zur Beantwortung der zweiten Teilforschungsfrage wird in einem weiteren Beispiel ein Skalierungsmodell zur Anpassungen der Leistung an unterschiedliche Baugrößen der betrachteten Komponenten umgesetzt und überprüft. Dazu werden die nicht physisch verfügbaren Eigenschaften in den skalierten Untersuchungen berücksichtigt. In Prüfstandsuntersuchungen wird die Skalierung überprüft und dadurch beispielepezifische Erkenntnisse erzeugt.

Zur Beantwortung der dritten Teilforschungsfrage werden Bauteilvarianten trotz unterschiedlicher Größenstufen durch skalierte Versuche mit einer Leistungsskalierung hinsichtlich der Funktionserfüllung untersucht. Die Bauteilvarianten unterschiedlicher Größenstufen werden dazu hinsichtlich der Funktionserfüllung auf einem Antriebsstrangprüfstand verglichen. Es erfolgt ein experimenteller Vergleich der Bauteilvarianten auf einem Antriebsstrangprüfstand.

Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen wird eine Validierungsmethode (Kapitel 8) beschrieben und Möglichkeiten zur Integration in den Produktentwicklungsprozess vorgeschlagen. Mit der Bewertung der drei Beispieluntersuchungen und der abgeleiteten Validierungsmethode kann anschließend die übergeordnete Forschungsfrage beantwortet werden.

4.3 Lösungsansatz der skalierten Absicherung

Nachfolgend wird der Ansatz für skalierte Untersuchungen in einer XiL-Umgebung vorgestellt. Ziel ist in diesen Untersuchungen die Einbindung von skalierten Komponenten in das Gesamtsystem durch die Nutzung von Referenzprodukten, um eine Absicherung zu ermöglichen, bevor Hardwarekomponenten vorliegen.

Um die skalierten Komponenten einzubinden, ist eine Anpassung der übertragenen Leistung notwendig. Die Grundlage zur Anpassung der Leistung zwischen miteinander verbundenen Teilsystemen basiert auf dem Ansatz der virtuellen Kopplung (Nickel et al., 2018) und dem Konzept der virtuellen Welle (Andert et al., 2016).

Unter der virtuellen Kopplung versteht man die Entkopplung von mechanisch verbundenen Teilsystemen in einem Antriebsstrangprüfstand und deren Verbindung

durch Koppelsysteme. Zur Einbindung der skalierten Prototypen in das Gesamtsystem und eine Untersuchung in XiL-Prüfständen kann der folgende Lösungsansatz (siehe Abbildung 4.3) als Grundlage dienen.

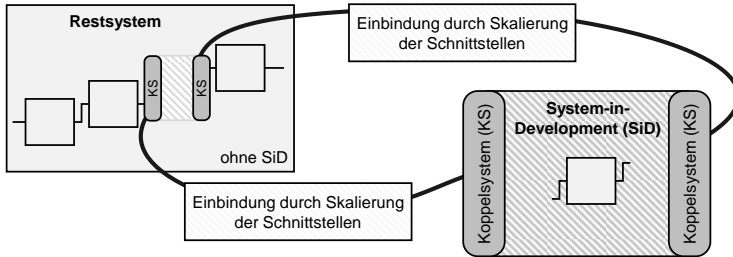


Abbildung 4.3: Lösungsansatz zur Einbindung von skalierten Prototypen in das Gesamtsystem. Das System-in-Development wird über Koppelsysteme in das Restsystem (enthält nicht das SiD) eingebunden.

Der Lösungsansatz beschreibt den Aufbau von XiL-Prüfständen für die vorgezogene Absicherung mit Hilfe von skalierten Prototypen (System-in-Development) durch Vorgängersystemen² oder Referenzsystemen. Die XiL-Plattform besteht aus den in Abbildung 4.3 dargestellten Teilsystemen:

- System-in-Development (SiD): ist das zu entwickelnde Teilsystem, dessen Funktionsfähigkeit überprüft werden soll.
- Restsystem, das die angrenzenden Teilsysteme des zu entwickelnden Systems (SiD) abbildet. Es liegt physisch vor und bildet das Restsystemmodell. Im Restsystem ist das SiD nicht verfügbar. Das Restsystem wird benötigt, um die Wechselwirkungen mit dem SiD abzubilden und dieses in das Gesamtsystem einzubinden.
- Koppelsysteme (KS) verbinden das Restsystem und das System-in-Development miteinander über Sensor-Aktor-Systeme. Sie übersetzen mit Hilfe von Skalierungsfaktoren physische Leistungsgrößen in virtuelle Systemgrößen und umgekehrt.

Der Lösungsansatz kann mit folgender Struktur für systemspezifische Prüfstände (siehe Abbildung 4.4) überführt werden.

² Vorgängersysteme beschreiben in diesem Kontext Referenzprodukte also bestehende Produkte wie Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukte.

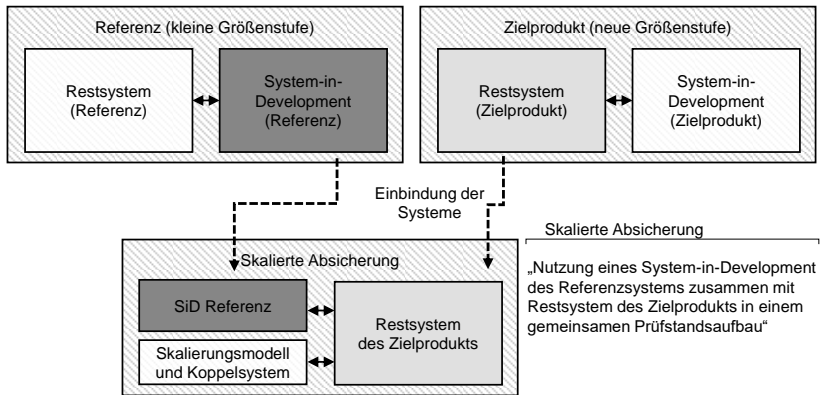


Abbildung 4.4: Struktur der skalierten Absicherung.

Für skalierte Untersuchungen wird als System-in-Development ein vorliegendes Referenzsystem in das Restsystem einer anderen Größenstufe eingebunden werden.

Als System-in-Development können skalierte Teilsysteme oder andere Teilsysteme aus bestehenden Baureihen verwendet werden. Das System-in-Development wird über Koppelsysteme und ein Skalierungsmodell in das Restsystem eingebunden.

4.3.1 Aufbau und Architektur der Untersuchungsumgebung

Zur Umsetzung in systemspezifische Prüfstände kann die folgende Struktur (Abbildung 4.4) genutzt werden. Das System-in-Development (SiD) ist nur über Koppelsysteme über die virtuelle Umgebung mit dem Restsystem verbunden. Diese Koppelsysteme ermöglichen die Anpassung der rotatorischen Leistungsgrößen durch das Skalierungsmodell. Die Koppelsysteme bestehen aus Sensor-Aktor-Systemen. Restsysteme, die als virtuelle Modelle vorliegen, können ebenso über Koppelsysteme eingebunden werden.

Je nach Untersuchungsziel kann die skalierte Komponente (SiD) auch von anderen Restsystemen (physisch oder virtuell) umgeben sein. Wichtig sind die Koppelsysteme der virtuellen Kopplung, um die Integration der Skalierung zu realisieren. Eine beispielhafte XiL-Architektur für skalierte Untersuchungen ist in Abbildung 4.5 gezeigt.

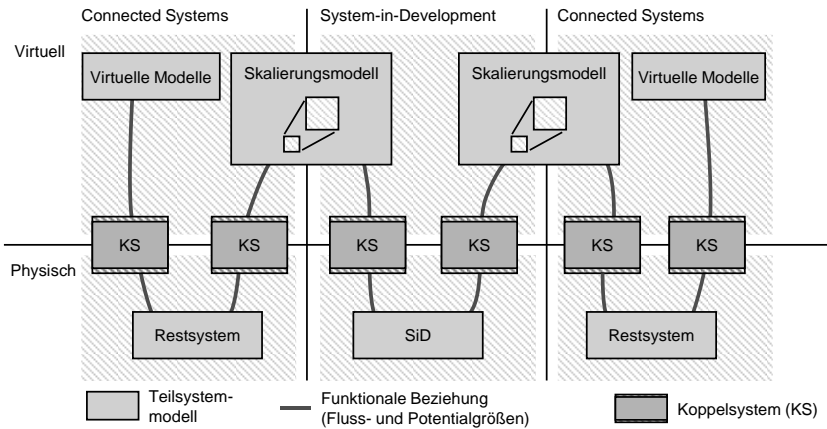


Abbildung 4.5: Beispielhafte XiL-Architektur für skalierte Absicherung

4.3.2 Koppelsysteme und virtuelle Kopplung

Koppelsysteme sind für die Einbindung der skalierten Prototypen in den restlichen Antriebsstrang notwendig. Die physischen Teilsysteme sind durch Koppelsysteme über die virtuell-physische Domäne verbunden. Die Koppelsysteme bestehen aus Sensor-Aktor-Systemen, welche die Systemgrößen von virtuellen zu physischen Größen übersetzen und umgekehrt.

Über die Koppelsysteme (siehe Abbildung 4.6) sind Skalierungsmodelle integriert, welche die Leistungsskalierung zwischen dem zu untersuchenden Teilsystem (System-in-Development) und den interagierenden Teilsystemen (Connected Systems) ermöglichen. Die Fluss- und Potentialgrößen werden zwischen den Koppelsystemen kontinuierlich in Echtzeit ausgetauscht und durch die Skalierungsmodelle verrechnet.

Die Einbindung der Skalierung über die virtuelle Kopplung ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

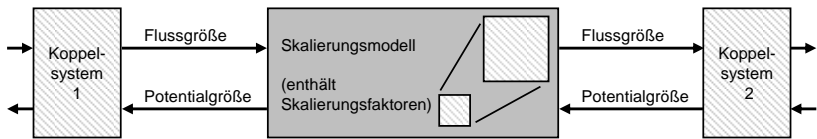


Abbildung 4.6: Einbindung der Skalierung über die virtuelle Kopplung zur Anpassung der mechanischen Größen. Die Koppelsysteme bestehen aus Sensor-Aktor-Systemen. (Steck, Gwosch & Matthiesen, 2020)

Die „mechanische Kopplung“ wird durch die Koppelsysteme, bestehend aus Sensor-Aktor-Systemen und der dazugehörigen Regelungstechnik, ersetzt. Durch die virtuelle Kopplung wird die unabhängige Anpassung der Leistung zu beiden Seiten der Koppelsysteme möglich. Die Leistungsskalierung, als Bestandteil der virtuellen Kopplung, passt die Leistungsgrößen so an, dass mechanische Teilsysteme mit unterschiedlichen Leistungsklassen gemeinsam getestet werden können (siehe Abbildung 4.6). Die Skalierung der Leistung basiert auf der Ähnlichkeitsmechanik.

Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Regelung der Aktoren dar. Ziel ist es, durch die Auswahl der Sensor-Aktor-Systeme eine Echtzeitfähigkeit der virtuellen Kopplung zu ermöglichen. Eine Bewertung der virtuellen Kopplung kann über die in Gwosch, Steck und Matthiesen (2019) gezeigten Kriterien erfolgen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird anhand von drei Untersuchungsbeispielen die Einbindung von Komponenten unterschiedlicher Leistungsfähigkeit in das Gesamtsystem vorgestellt und bewertet. Dazu werden die Leistungsgrößen in den Koppelsystemen über Skalierungsfaktoren verrechnet.

5 Skalierung der Leistungsgrößen einer Überlastkupplung am Beispiel der Federkraft

In diesem Kapitel wird eine beispielhafte Anpassung der rotatorischen Leistung in einem XiL-Prüfstand zur Anpassung des Systemverhaltens für einen skalierten Modellparameter gezeigt. Der in Kapitel 4.3 gezeigte Lösungsansatz wird an einem Beispiel angewandt, um die Unterschiede bezüglich eines Modellparameters zu skalieren. Es werden hierbei die Einsatzmöglichkeiten der Untersuchungen mit skalierten Prototypen im Gesamtsystem bewertet.

Sollen unterschiedlich skalierte Teilsysteme unter Berücksichtigung des verbleibenden Systems gleichzeitig auf einem Prüfstand getestet werden, ist eine Anpassung der rotatorischen Größen in Echtzeit zwischen den miteinander verbundenen Systemen notwendig. Die Anpassung der mechanischen Größen an die Belastbarkeit der skalierten Komponente ist notwendig. Der Einsatz von XiL-Prüfständen unterstützt die frühe Absicherung von Antriebssystemen.

Die Auswahl des Untersuchungsbeispiels orientiert sich an aktuellen Herausforderungen in der Produktentwicklung von Überlastkupplungen für Akkuboehrschrauber. Ziel ist es, die Kupplung weiterzuentwickeln und eine vorgezogene Absicherung zu ermöglichen. Die Kupplung der nächsten Produktgeneration liegt in der Entwicklung in frühen Phasen oft noch nicht für eine frühe funktionale Absicherung vor. Für die gewünschte Absicherung können nur andere verfügbare Referenzprodukte genutzt werden.

Überprüft wird mit dieser Untersuchung, ob durch die Nutzung eines Skalierungsmodells in XiL-Versuchen die Unterschiede zwischen einer skalierten Kupplung und einer unskalierten Kupplung ausgeglichen werden können, um die Funktionsweise der zukünftigen Kupplung (Folgeentwurf der nächsten Produktgeneration) vorherzusagen. (siehe Abbildung 5.1).

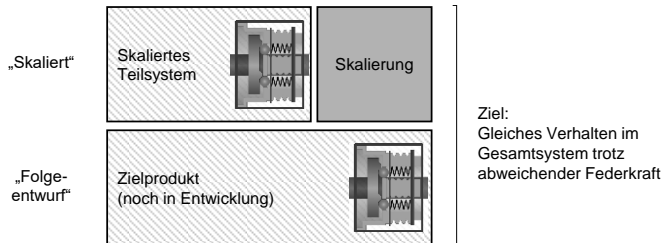


Abbildung 5.1: Übersicht der Untersuchung zur 1. Teilforschungsfrage Vorhersage des Folgeentwurfs durch skalierte Untersuchung. Referenzprodukt und Zielprodukt unterscheiden sich hinsichtlich einer Systemeigenschaft. Ziel ist es, im Gesamtsystem ein vergleichbares Verhalten zum Folgeentwurf zu realisieren.

Die Anpassung durch die Skalierung erfolgt in dieser Untersuchung hinsichtlich veränderter Eigenschaften mit direkten Auswirkungen auf das Funktionsverhalten. Die Leistungsskalierung beeinflusst dabei die rotatorischen Größen in einem Antriebsstrangprüfstand. Geänderte Materialparameter werden nicht betrachtet.

In diesem Kapitel wird die Teilforschungsfrage 1 (TF 1) beantwortet:

Wie kann die Anpassung der rotatorischen Leistung in einem XiL-Prüfstand erfolgen und welche mechanischen Parameter werden für die Ableitung der Leistungsskalierung benötigt?

Dieses Kapitel basiert auf den nachfolgenden Veröffentlichungen, in denen Inhalte dieses Kapitels durch den Autor im Rahmen einer Mitautorenschaft publiziert sind:

- „Scaling of Rotational Quantities for Simultaneous Testing of Powertrain Subsystems with Different Scaling on a X-in-the-Loop Test Bench“ (Steck et al., 2020)
- „Digitaler Entwicklungsprozess - Entwicklung einer Validierungsmethode zur funktionalen Überprüfung von skalierten Versuchsmustern in einer HiL-Plattform“ (Matthiesen et al., 2019)

Abbildungen und Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung oder in übersetzter Form aus den Veröffentlichungen übernommen. Sie werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.

5.1 Zielsetzung und Hypothese

In dieser Untersuchung wird ein Skalierungsmodell für die Anpassung von rotatorischen Leistungsgrößen zwischen miteinander verbundenen Systemen abgeleitet und verifiziert, um eine skalierte Komponentenprüfung unter Berücksichtigung des restlichen Systems zu ermöglichen.

Am Beispiel einer Überlastkupplung aus einem Akkubohrschrauber (siehe Kapitel 2.3.4 und Beschreibung in Kapitel 5.2.1) werden die übertragenen Leistungsgrößen verrechnet und auf unterschiedliche Federvorspannungen skaliert. Die getesteten Überlastkupplungen unterscheiden sich hinsichtlich der Federvorspannung. Die Integration der skalierten Komponenten erfolgt über Koppelsysteme in einem XiL-Prüfstand (siehe Abbildung 5.2). Ziel der Skalierung ist es, die übertragene Leistung so anzupassen, dass aus funktionaler Sicht das gleiche Systemverhalten auch dann erreicht wird, wenn ein Teilsystem eine skalierte Leistungsfähigkeit aufweist.

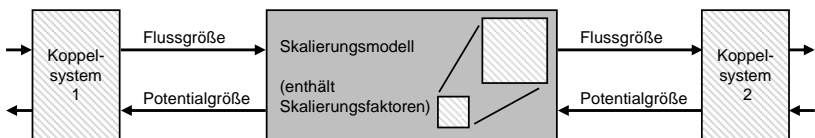


Abbildung 5.2: Virtuelle Kopplung von mechanischen Teilsystemen. Über Koppelsysteme (Sensor-Aktor-Systeme) können mechanische Größen übertragen und verrechnet werden. Die virtuelle Kopplung ermöglicht die Modifikation der mechanischen Größen. (Angepasste Darstellung aus Gwosch et al., 2019)

Lücke und Fragestellung

Die folgende Untersuchung adressiert die Fragestellung, wie eine Anpassung der rotatorischen Leistungsgrößen in der Skalierung zum Ausgleich der unterschiedlichen Kupplungseigenschaften für skalierte Versuche erfolgen kann. Darüber hinaus wird die Herleitung von Skalierungsfaktoren für die Anpassung von rotatorischen Leistungsgrößen zwischen interagierenden Systemen aufgezeigt, um eine skalierte Bauteilabsicherung unter Berücksichtigung des verbleibenden Systems zu ermöglichen.

Es wird folgende Hypothese formuliert:

Skalierungsmodelle ermöglichen die Untersuchung der Auslösecharakteristik an einem skalierten Prototyp. Durch die Anpassung der Leistungsgrößen in den Koppelsystemen lassen sich vergleichbare Ergebnisse für das zu entwickelnde Produkt ableiten.

Ein wesentliches Ziel liegt in der Ableitung der Skalierungsfaktoren, welche den Randbedingungen und Restriktionen eines Hardware-in-the-Loop Prüfstands gerecht werden und eine Anpassung des Systemverhaltens ermöglichen. Die Skalierung wird mit einer skalierten Überlastkupplung verifiziert.

Es werden Skalierungsfaktoren abgeleitet, um eine skalierte Komponente in einen unskalierten Antriebsstrang zu integrieren. Die Skalierungsfaktoren ermöglichen in den Koppelsystemen (siehe Abbildung 5.2) die Anpassung der übertragenen Leistungsgrößen an Teilsysteme mit skalierten Kupplungseigenschaften.

5.2 Untersuchungsmethode und Versuchsaufbau

In diesem Unterkapitel werden der Versuchsaufbau und die Untersuchungsmethode zur Beantwortung der Teilforschungsfrage beschrieben. Zunächst werden die Überlastkupplung als Beispielsystem und die Untersuchungsumgebung aufgezeigt. Anschließend wird die Herleitung der Skalierungsfaktoren für das Demonstrationssystem vorgestellt. Außerdem werden der Versuchsaufbau und das Vorgehen zur Verifikation der Skalierung beschrieben.

5.2.1 Überlastkupplung als Beispielsystem

Für die Versuche wird eine Kupplung (siehe Abbildung 5.3-a) aus einem Akkubohrschrauber (siehe Kapitel 2.3.3) mit zwei verschiedenen Federkräften untersucht. Im Antriebsstrang des Akkuschaubers realisiert eine mechanische Überlastkupplung (siehe Abbildung 5.7) die Sicherheitsfunktion, um das übertragene Drehmoment auf einen definierten Wert zu begrenzen (vgl. Kapitel 2.3.4).

Über den Einstellring der lassen sich unterschiedliche Federkräfte (wie die Vorspannkraft siehe Abbildung 5.3-c) auswählen, dadurch löst die Kupplung bei unterschiedlichen Auslösemomenten entsprechend der Kupplungsstufen (CL) aus. Das Auslösemoment der Kupplung kann so in Stufen eingestellt werden.

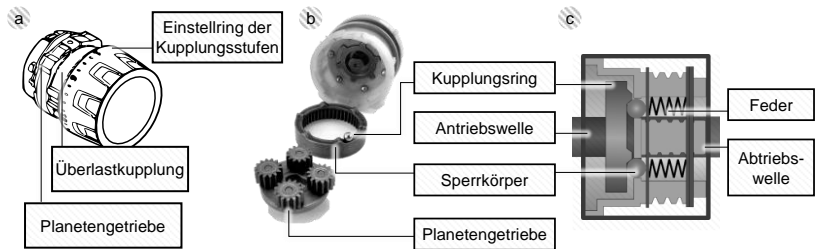


Abbildung 5.3: Beispielsystem für die Untersuchung zu TF 1 bestehend aus Kupplung und Planetengetriebe (siehe a.). Darstellung und Benennung der Komponenten (siehe b. und c.). Über den Einstellring lässt sich die Federkraft anpassen, das Auslösemoment kann so entsprechend der Kupplungsstufen (CL) eingestellt werden.

In dieser Untersuchung wird der Einfluss unterschiedlicher Federkraft einer Kupplung eines Akkuboehrschraubers durch die Anpassung der Rotationsgrößen zwischen zusammenschalteten Systemen betrachtet. Die folgende Untersuchung fokussiert sich auf die Skalierung der kritischen Funktion der Kupplung, zur Begrenzung des maximalen Drehmoments. Für die Versuche wird das komplette Teilsystem der Überlastkupplung im Prüfstand genutzt.

Die Kupplung wird als Beispiel für die Herleitung der Skalierung verwendet. Ziel des Beispiels ist es, durch eine Skalierung der übertragbaren Leistungsgrößen ein ähnliches Verhalten des Antriebsstrangs bei unterschiedlichen Federkraft zu erreichen. In dieser Untersuchung wird, basierend auf der kritischen Funktion, die Skalierung der Kupplungsstufen und Federkraft betrachtet. Verglichen wird dazu die Funktionserfüllung bezüglich einzelner charakteristischer Kennwerte im Drehmomentverlauf.

Theoretische Betrachtung der Funktion der Überlastkupplung

Zur Beschreibung der Funktion der Kupplung wurde in Matthiesen, Gwosch, Mangold und Grauberger et al. (2017) der C&C²-Ansatz verwendet. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.4 als Sequenzmodell zusammenfassend dargestellt.

Wird die Kupplung unterhalb des maximal übertragbaren Drehmoments betrieben, überträgt die Kupplung die Leistung von der Antriebsseite auf die Abtriebsseite (siehe Abbildung 5.5). Übersteigt das anliegende Drehmoment der Kupplung das Kupplungsmoment, dann kommt es zum Überlasten. Das Abtriebsdrehmoment fällt

stark ab. Dabei kann es auch zu negativen Drehmomenten kommen, die durch die abfallende Flanke der Erhebung begründet sind. Anschließend kann eine Drehmomentschwingung entstehen, die sich aus der Schwingungsfähigkeit des Systems aufgrund der Anregung durch den Drehmomentabfall (siehe Abbildung 5.5) ergibt.

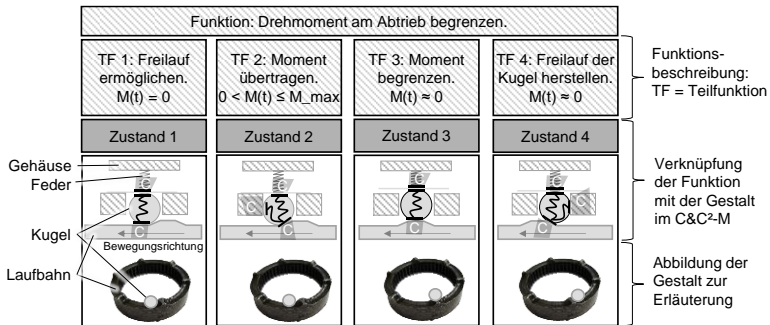


Abbildung 5.4: Sequenzmodell der Kupplungsauslösung (Angepasste Darstellung aus Matthiesen, Gwosch, Mangold, Grauberger et al., 2017)

Für den Zustand 4 in Abbildung 5.4 ergibt sich ein mittleres Reibmoment, welches durch die Wirkflächenpaare zwischen Laufbahn und Rastkugeln bestimmt wird. Bei Anliegen einer Antriebsbewegung ergibt sich im weiteren zeitlichen Verlauf ein erneutes Ansteigen des Drehmoments, was durch erneutes Anliegen der Rastkugel an den Rastungen resultiert.

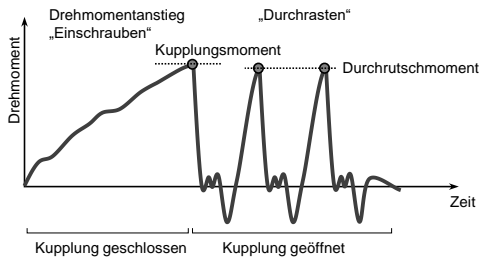


Abbildung 5.5: Theoretische Betrachtung der Funktionsweise der Überlastkupplung im Akkubohrschrauber. (Angepasste Darstellung aus Gwosch, 2019; Schweizer, 2003, S. 55)

Das erneute Durchrutschen erfolgt, wenn das Abtriebsdrehmoment weiterhin größer als das maximal übertragbare Drehmoment ist. Dabei kann das Durchrutschmoment aufgrund der Dynamik im Antriebsstrang vom Kupplungsmoment abweichen.

5.2.2 Untersuchungsumgebung

Die Untersuchung findet am sCiL-Prüfstand mit dem in Abbildung 5.6 dargestellten Untersuchungssetup statt. Der scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstand¹ (siehe Abbildung 5.7) ist ein Entwicklungsprüfstand, der auf dem IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz basiert.

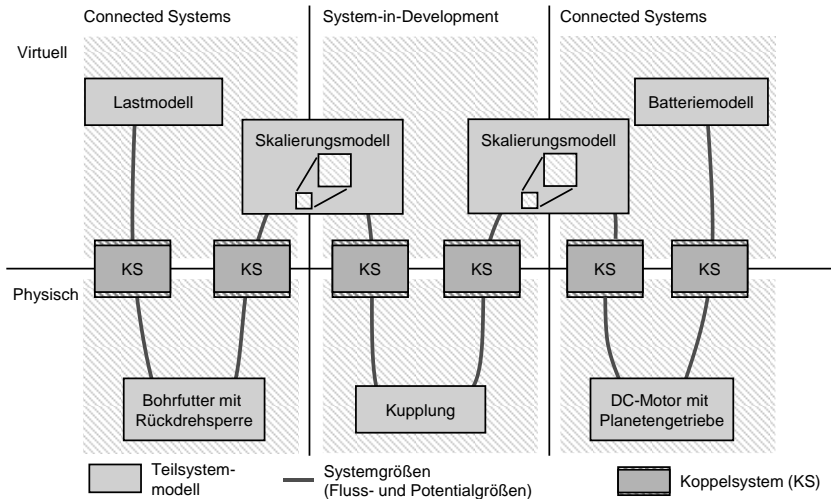


Abbildung 5.6: Einbindung der Skalierungsmodelle in die virtuelle Kopplung. Die Skalierungsmodelle ermöglichen die Anpassung der Leistungsgrößen und damit die Kopplung unterschiedlich skalierten Subsysteme. (Steck et al., 2020)

Dieser XiL-Prüfstand (siehe Abbildung 5.7) ermöglicht physikalische Tests mit interagierenden Komponenten, die durch Simulation nur schwer reproduzierbar sind. Als

¹ scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstand wird als sCiL-Prüfstand abgekürzt.

System-in-Development (SiD) wird eine Kupplung eines Akkubohrschraubers verwendet. Die virtuelle Kopplung verbindet die miteinander verbundenen Teilsysteme, um das gleichzeitige Testen von Antriebsstrangteilsystemen mit unterschiedlicher Skalierung zu ermöglichen.

Die Einbindung der Skalierungsmodelle erfolgt innerhalb der virtuellen Kopplung (vgl. Abbildung 5.6) zwischen den betrachteten Teilsystemen. Die Koppelsysteme sind mit Sensor-Aktor-Systemen und einem zentralen oder dezentralen Steuerungssystem realisiert. Dabei ist es wichtig, die Echtzeitfähigkeit und Kausalität der Signalübertragung zu berücksichtigen. Die virtuelle Kopplung des sCiL-Prüfstand wurde implementiert und verifiziert (siehe Gwosch et al., 2019).

Der sCiL-Prüfstand enthält die mechanischen Komponenten des Antriebsstrangs eines Akkuschaubers: ein Spannfutter mit Rückdreh Sperre, eine Überlastkupplung, ein dreistufiges Planetengetriebe und einen Antriebsmotor (Abbildung 5.7).

Die Umsetzung des in Abbildung 5.6 vorgestellten Konzepts ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Diese Untersuchung wird am sCiL-Prüfstand (Abbildung 5.7) für den Einsatz einer Überlastkupplung gezeigt.

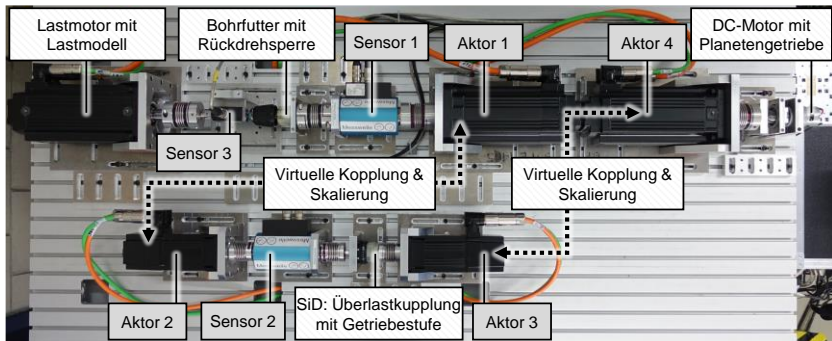


Abbildung 5.7: sCiL-Prüfstand zur Durchführung der Verifikation der skalierten Untersuchung. Der sCiL-Prüfstand enthält die mechanischen Komponenten des Antriebsstrangs eines Akkubohrschraubers. Die virtuelle Kopplung ist zwischen Aktuator 1 und Aktuator 2 sowie zwischen Aktuator 3 und Aktuator 4 im Antriebsstrang integriert. (Angepasste Darstellung aus Gwosch et al., 2019)

Im unteren Teil der Abbildung 5.7 ist die Überlastkupplung eines Akkuschraubers über zwei Sensor-Aktor-Systeme (virtuelle Kopplung) mit den übrigen physikalischen Teilsystemen verbunden. Die Entkopplung der mechanisch verbundenen Subsysteme erfolgt nach dem vorgestellten Ansatz (siehe Abbildung 4.3). Die virtuelle Kopplung der Komponenten wird an den entstehenden Schnittstellen mit Sensor-Aktor-Systemen und der Integration der Skalierung realisiert.

Ein Lastmodell stellt die mechanische Belastung der Applikation auf dem Prüfstand dar. Ein Lastmodell ermöglicht konstante Prüfbedingungen und verhindert somit Störungen durch unterschiedliche Belastungen. Da unbekannte Einflüsse angenommen werden, sind Simulationen der übrigen Systeme schwierig. Um bestehende Einflüsse anderer Systeme zu berücksichtigen, werden diese als physikalische Systeme auf dem Prüfstand eingebunden. Das hier verwendete Lastmodell wird in Steck, Gwosch und Matthiesen (2019) vorgestellt und verifiziert.

5.2.3 Vorgehen zur Ableitung der Skalierung mittels Dimensionsanalyse

Das Vorgehen zur Ableitung der Skalierung wird nachfolgend beschreiben. Für die Ableitung der Skalierung wird eine Modellbildung und anschließende Dimensionsanalyse unter Verwendung der Ähnlichkeitstheorie durchgeführt (Steck et al., 2020). Die Anwendung am Beispiel dieser Forschungsfrage erfolgt darauf aufbauend in Kapitel 5.3.2.

Basierend auf einer Systemanalyse liefert die Modellbildung die Grundlage für eine anschließende Dimensionsanalyse. Zusätzlich werden bei der Ableitung die Randbedingungen des Prüfstandes berücksichtigt. Dimensionslose Kennzahlen werden aus relevanten Parametern (nach Kapitel 2.4.4) abgeleitet. Die gewählte Vorgehensweise ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

Zunächst ist es notwendig, den Zweck der Skalierung zu definieren. In diesem Beispiel erfolgt die Skalierung hinsichtlich der Vorspannkraft zu Bewertung des Auslösemoments einer Überlastkupplung. Im folgenden Schritt wird ein Modell für die kritische Funktion des Bauteils abgeleitet, das die Grundlage für den skalierten Test darstellt. Hierfür kann eine physikalische Modellierung verwendet werden. Die relevanten Parameter werden in einer Relevanzliste (siehe Kapitel 2.4.4) nach Koschorrek (2007) zusammengefasst.

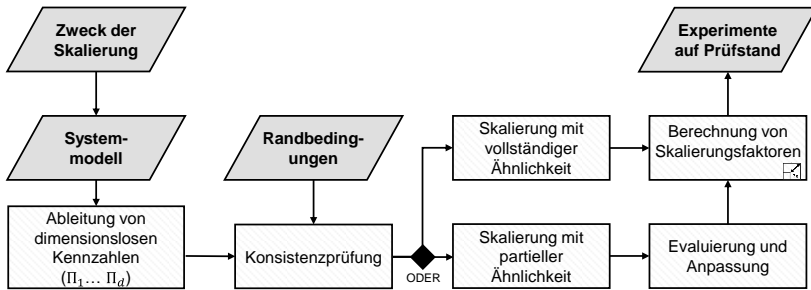


Abbildung 5.8: Vorgehen zur Ableitung der Skalierung, ausgehend von einem Systemmodell mittels Dimensionsanalyse und Berücksichtigung der Randbedingungen von Modell und Prüfstand. (Steck et al., 2020)

Anschließend werden mit Hilfe einer Dimensionsanalyse (siehe Kapitel 2.4.4) dimensionslose Kennzahlen abgeleitet. Es wurde das von Lotz (2017) beschriebene Vorgehen zur Ableitung von Skalierungsfaktoren genutzt und für diese Untersuchungen kontextspezifisch angewandt. Anschließend werden die Dimensionen der relevanten Kenngrößen in Form eines Gleichungssystems zusammengestellt. Tan (2011) und Görtler (1975) bieten Unterstützung bei der Dimensionsanalyse. Nach Möglichkeit sollten alle dimensionslosen Kennzahlen im unskalierten und skalierten System den gleichen Wert haben ($\delta\pi = 1$), sodass eine vollständige Ähnlichkeit der Systeme besteht. Wenn alle geometrischen Parameter gleich skaliert sind, liegt im Allgemeinen eine vollständige Skalierung vor. Nach dem Lösen des Gleichungssystems werden die ermittelten Kennzahlen auf Konsistenz geprüft. Hierbei sind die Randbedingungen der Untersuchungsumgebung und das Untersuchungsziel zu berücksichtigen. Im Falle von Abweichungen können nicht alle dimensionslosen Kennzahlen berücksichtigt werden. Oft ist es aufgrund von Abweichungen oder Randbedingungen, wie Echtzeitfähigkeit, nicht möglich, eine vollständige Ähnlichkeit zu erreichen, sodass nur eine teilweise Ähnlichkeit besteht. Für nicht berücksichtigte Effekte können Berechnungen und zusätzliche Untersuchungen herangezogen werden.

Je nach Zweck der Skalierung werden alle dimensionslosen Kennzahlen so transformiert, dass sie nur von einer einzigen Größe abhängen, die den Unterschied zwischen dem skalierten und dem unskalierten System beschreibt. Die Transformation der dimensionslosen Kennzahlen führt auch zu Skalierungsfaktoren für die übrigen Parameter. Die Skalierungsfaktoren der Leistungsgrößen werden in die virtuelle Kopplung (Abbildung 5.6) des Prüfstands integriert. Die Skalierungsfaktoren werden

für die Verrechnung der Leistungsgrößen (Fluss- und Potentialgrößen) am Prüfstand in Echtzeit verwendet. Die verrechneten mechanischen Größen werden über die Aktoren der Koppelsysteme auf die Teilsysteme aufgebracht.

Ziel der Skalierung in diesem Untersuchungsbeispiel ist es, die übertragene Leistung in Echtzeit anzupassen, um auch bei der Zusammenschaltung von Teilsystemen mit unterschiedlicher Skalierung das gleiche Verhalten zu erreichen. Die Skalierung muss die Anforderung erfüllen, dass das maximal übertragbare Drehmoment trotz unterschiedlicher Federkraft und Kupplungsstufen auf einen vergleichbaren Wert begrenzt wird. Die Prüfung der Skalierung erfolgt durch Experimente mit der betrachteten Überlastkupplung auf dem sCiL-Prüfstand.

5.2.4 Versuchsdurchführung

Um die Skalierung zu verifizieren, werden Tests mit skalierten und unskalierten Federkraft auf dem sCiL-Prüfstand (Abbildung 5.7) durchgeführt. Dazu wird die Überlastkupplung bei verschiedenen Kupplungsstufen (CL) untersucht. Zur Bewertung der Auslösecharakteristik werden Kennwerte im Drehmomentverlauf der Ausgangswelle betrachtet. Die Bewertung erfolgt im Hinblick auf das Phänomen des Ausrastens bei maximalem Kupplungsmoment.

Zur Überprüfung der eingangs formulierten Hypothese (siehe Kapitel 5.1) werden drei Versuchsreihen (siehe Abbildung 5.9) durchgeführt und hinsichtlich der Auslösecharakteristik verglichen:

- 1) Referenzversuch mit reduzierter Federkraft bei Kupplungsstufe 3 (CL 3)
- 2) Skalierter Versuch mit Kupplungsstufe 3 (CL 3 S)
- 3) Versuch mit Kupplungsstufe 5 (CL 5) als Folgeentwurf der nächsten Produktgeneration

Die Versuchsreihen unterscheiden sich hinsichtlich der eingestellten Kupplungsstufe, welche für eine definierte Federkraft steht, und durch die genutzte Skalierung.

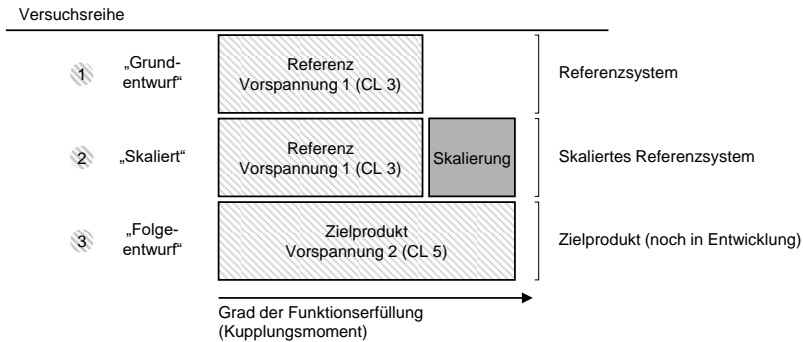


Abbildung 5.9: Versuchsreihen zur Überprüfung der Hypothesen und Benennung der verwendeten Komponenten. Die Versuche unterscheiden sich hinsichtlich der Kupplungsstufe (CL)

Zunächst werden in der ersten Versuchsreihe Messungen mit der unskalierten Original-Kupplung (Referenz) durchgeführt. Das Verhalten der Kupplung wird analysiert und hinsichtlich des maximal übertragbaren Drehmoments bewertet. Anschließend werden die Skalierungsfaktoren abgeleitet, um den Unterschied zwischen vorliegender Referenz und dem geplanten Produkt hinsichtlich der Federvorspannkraft zu berücksichtigen. Dabei fließen die Anforderungen an das geplante Produkt des Folgeentwurfs hinsichtlich der gewünschten Federvorspannkraft mit ein.

In der zweiten Versuchsreihe wird der Unterschied der Federkraft in einem Skalierungsmodell berücksichtigt, um das Verhalten der Ziel-Kupplungsstufe (Folgeentwurf) abzuschätzen. In der dritten Versuchsreihe erfolgen zur Verifikation der Skalierung Messungen mit dem Folgeentwurf und den gewünschten Eigenschaften. Bei den Versuchen wird immer nur ein Parameter gleichzeitig variiert. Dadurch besteht die Möglichkeit, die resultierenden Effekte der veränderten Kupplungsstufe zuzuordnen.

5.2.5 Auswertung der Versuche zur Skalierung am Beispiel der Federkraft

Zur Überprüfung der Skalierung wird der zeitliche Verlauf des Drehmoments an Messwelle 1 und 2 ermittelt und ausgewertet (siehe Abbildung 5.10).

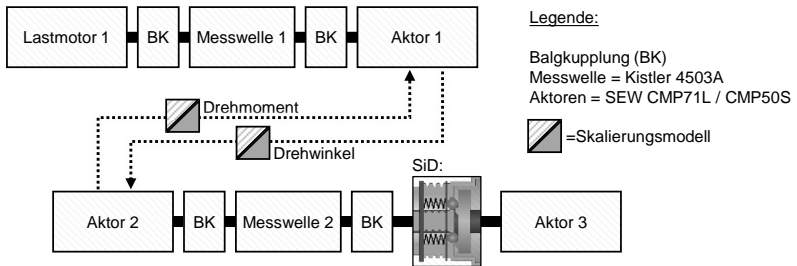


Abbildung 5.10: Verifikations-Testaufbau zur Bewertung der Skalierung in der virtuellen Kopplung. Die Skalierung der Rotationsgrößen im Antriebsstrang kann über Messwelle 1 und Messwelle 2 ausgewertet werden. (Angepasste Darstellung aus Gwosch et al., 2019)

Um die Skalierung innerhalb der virtuellen Kupplung zu verifizieren, werden die Zeitsignale des Drehmoments verglichen. Die Überprüfung der Skalierung erfolgt anhand der gefilterten² Zeitsignale des Drehmoments zwischen Lastseite und Antriebsstrang (Messwelle 1).

Zur Überwachung der Kupplung (SiD) wird das gefilterte Drehmoment auf der Abtriebsseite der Überlastkupplung (Messwelle 2) ausgewertet. Diese Messstelle erlaubt die Beurteilung, ob sich die Kupplung hinsichtlich ihrer Funktionalität verändert und ob die Prüfbedingungen noch erfüllt sind.

Zur Bewertung der verschiedenen Kupplungsstufen hinsichtlich des maximalen Drehmoments wird das Kupplungsdrehmoment der ersten Ausrückung betrachtet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.10 schematisch dargestellt. Die Versuchswiederholung beträgt je Variante 30.

5.3 Ergebnis zur Modellbildung der Kupplung und Ableitung der Skalierungsfaktoren

Zunächst wird das Modell der Kupplung vorgestellt. Darauf aufbauend werden die Skalierungsfaktoren hergeleitet. Zur Modellbildung wurde der C&C2-Ansatz (Albers & Matthiesen, 2002; Matthiesen, Grauberger, Sturm & Steck, 2018) verwendet. Die Ableitung der Skalierungsfaktoren erfolgt mit dem zuvor aufgezeigten Vorgehen

² Die Filterung erfolgt mit einem Tiefpassfilter 5. Ordnung (100 Hz Grenzfrequenz).

(siehe Abbildung 5.8). Anschließend werden in Kapitel 5.4 die Ergebnisse des Verifikationsexperiments vorgestellt und die Funktionalität bewertet.

5.3.1 Mathematische Beschreibung der Kupplung

Ziel der Modellentwicklung ist es, die Grundlage für skalierte Versuche mit unterschiedlichen Kupplungsstufen (CL, siehe Abbildung 5.3 und Kapitel 5.2.1) zur gleichzeitigen Prüfung von Antriebsstrang-Subsystemen mit unterschiedlicher Skalierung zu schaffen.

Die Modellierung der Kupplung liefert folgende Zusammenhänge: In Abhängigkeit von der maximalen Federkraft ergibt sich das maximale Drehmoment der Kupplung. Die Gesamtkraft der Feder wird wie folgt berechnet, für die Verschiebung/Auslenkung wird der Parameter l verwendet, Federrate wird als Parameter c verwendet:

$$F_{max} = F_D + F_0 = c\Delta l + F_0 = \Delta l c + c l_0 = c(\Delta l + l_0) \quad (3)$$

Da die Federrate nicht verändert wird, beeinflusst nur die Stauchung der Feder die resultierende Federkraft. Die Abbildung 5.11 zeigt die Längenänderung, die zu einer veränderten Federkraft führt.

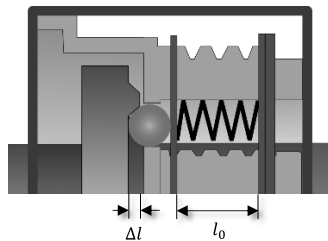


Abbildung 5.11: Kupplung mit der in der Skalierung berücksichtigten Längenänderungen (Steck et al., 2020)

Beide Kraftanteile werden bei der Skalierung berücksichtigt, da sie die maximale Federkraft beeinflussen:

$$F_{max} = F_D + F_0 \quad (4)$$

Aufgrund der Modellierung werden die relevanten Parameter in der nachfolgenden Modellierung berücksichtigt. Interne Parameter, wie geometrische Abmessungen

und mechanische Eigenschaften der Bauteile der Kupplung, beeinflussen die Funktion und werden daher als relevant betrachtet. Um die gleichzeitige Prüfung von Antriebsstrangsubsystemen mit unterschiedlicher Skalierung zu ermöglichen, ist die Skalierung der rotatorischen Systemgrößen notwendig.

Es werden folgende Größen als relevant angesehen:

- Geometrische Abmessungen l
- Masse des Systems m
- Zeit t
- Drehmoment M
- Federkraft F
- Federsteifigkeit c
- Torsionssteifigkeit c_t
- Winkelgeschwindigkeit $\dot{\phi}$
- Winkelbeschleunigung $\ddot{\phi}$
- Rotationsträgheit J

Die Auswahl der relevanten Parameter wurde in einer Veröffentlichung³ für die Modellbildung genutzt und bestätigt. Durch Vergleiche mit Messdaten aus Experimenten konnte eine hinreichende Übereinstimmung des modellierten und realen Kupplungsverhaltens gezeigt werden. Die relevanten Parameter haben somit Einfluss auf das Verhalten und sind dadurch für die weitere Ableitung der Skalierung durch die Dimensionsanalyse zu berücksichtigen.

5.3.2 Skalierungsfaktoren

Nach der Modellierung wurden die relevanten Parameter aus der Relevanzliste durch eine Dimensionsanalyse analysiert. Die Dimensionen der relevanten Parameter sind nach dem {MLT}-System der Grundgrößen Masse (M), Länge (L), Zeit (T) geordnet (Unger & Leyer, 2015). Physikalische Größen werden nach dem Internationalen Einheitensystem (SI) in Grundgrößen ausgedrückt, die mit ihren Dimensionen klassifiziert sind. Als Hauptgrößen des Systems werden die Parameter Drehmoment M , Winkelgeschwindigkeit $\dot{\phi}$ und Abmessung l verwendet, da sie die Differenz des skalierten und unskalierten Systems und der physikalischen Größen in der virtuellen Kopplung darstellen. Die nachfolgende Tabelle 5.1 zeigt das Ergeb-

³ Die Modellbildung (vgl. Paland (2019), Co-betreute Abschlussarbeit) wurde in der Veröffentlichung (Steck, Paland, Gwosch und Matthiesen (2021)) mit Messdaten aus Experimenten bestätigt.

nis der Dimensionsanalyse. Dargestellt sind die Dimensionen der betrachteten Parameter. Auch wenn die physikalischen Beziehungen nicht explizit als Gleichung muss die Bedingung der Homogenität der Dimensionen (siehe Kapitel 0) erfüllt sein.

Tabelle 5.1: Ergebnis der Dimensionsanalyse. Angegeben sind die Dimensionen der betrachteten Parameter. Es wurde ein $\{MLT\}$ -System mit den Grundgrößen Masse (M), Länge (L), Zeit (T) verwendet. Als Hauptgrößen des Systems werden die Parameter Drehmoment M , Winkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ und Abmessung l verwendet, da sie die Differenz des skalierten und unskalierten Systems und der physikalischen Größen in der virtuellen Kopplung darstellen. (Steck et al., 2020)

| Parameter | Dimension | | | F | t | φ | $\dot{\varphi}$ | J | m | c | c_t |
|-----------|-----------|----|---|-----|-----|-----------|-----------------|-----|-----|-----|-------|
| Masse (M) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Länge (L) | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| Zeit (T) | -2 | -1 | 0 | -2 | 1 | 0 | -2 | 0 | 0 | -2 | -2 |

Die dimensionslosen Kennzahlen werden auf der Basis der dimensionslosen Größen und deren Beziehungen berechnet. Das Gleichungssystem in Tabelle 5.1 wurde mit Hilfe des Gauß-Algorithmus gelöst. Um die Skalierungsgesetze auf einem XiL-Prüfstand nutzen zu können, müssen folgende Randbedingungen berücksichtigt werden. Beispielsweise ist es wichtig, die Signale innerhalb der virtuellen Kopplung in Echtzeit zu übertragen. Um die Interaktionen bidirektional zu übertragen, wird die Bedingung gestellt, dass die Kausalität durch die Skalierung gegeben ist. Darüber hinaus sind alle beteiligten Subsysteme ohne Zeitveränderung miteinander verbunden.

Für die weitere Berechnung wird das Verhältnis der Federkräfte des Systems mit einem zusätzlichen Parameter beschrieben, um die Unterschiede zwischen dem skalierten und den unskalierten System zu beschreiben:

$$\delta F = \frac{F_s}{F_u} = s \tag{5}$$

In dieser Studie wird nur die Federkraft variiert. Die Vorspannkraft (F_0) hängt von der gewählten Kupplungsstufe (CL) ab. $\delta l_{preload}$ beschreibt das Verhältnis zwischen der Länge, die für die Vorspannung des skalierten und den unskalierten Systems verantwortlich ist.

$$\delta l_{preload} = \frac{l_{0,unscaled}}{l_{0,scaled}} \quad (6)$$

Die aus der Erhebung der Mitnehmer resultierende Federkraft bleibt unverändert, da die Geometrie der Erhebung unverändert bleibt. Höhe der Erhebung:

$$\Delta l = l_{Erhebung} = 1,5 \text{ mm} \quad (7)$$

Die Gesamtkraft ändert sich entsprechend der Verschiebungsänderung, da die Steifigkeit in allen Versuchen identisch ist.

$$F_{max} = \frac{F_{m,unscaled}}{F_{m,scaled}} = \delta l = \delta(l_{Vorspannung} + l_{Erhebung}) \quad (8)$$

Das Material und die geometrischen Abmessungen der Kupplung werden nicht verändert. Aufgrund der Eigenschaften des sCiL-Prüfstands, der Eigenschaften des Prototyps und des Zwecks der Skalierung sind die folgenden Randbedingungen relevant:

- Die Federkraft wird mit dem Faktor s skaliert. So wird das Verhältnis zwischen der Kraft (δF) des skalierten und des unskalierten Systems mit $\delta F = \frac{F_S}{F_U} = s$ beschrieben. (9)
- Die Federkraft ist abhängig von der Vorspannkraft und der Federkraft durch die Höhenlage, mit $\delta F = \delta(l_{Vorspannung} + l_{Erhebung})$ (10)
- Eine Zeitskalierung ist nicht zulässig. Dies ist notwendig, um die Interaktionen zwischen den Teilsystemen abbilden zu können. Daher wird ein Verhältnis zwischen der Zeit des skalierten und des unskalierten Systems so definiert, dass es keine Skalierung gibt ($\delta t = 1$).
- Es soll das gleiche Material verwendet werden, d.h. es gibt auch keine Skalierung für das Material: $\delta \rho = 1$
- Die geometrischen Abmessungen bleiben unverändert $\delta l = 1$.

Die Überprüfung der Kennzahlen zeigt eine Diskrepanz hinsichtlich der Verrechnung der rotatorischen Trägheit. Um diese Diskrepanz zu berücksichtigen, wird zwischen externem Drehmoment und dem Trägheitsmoment unterschieden. Das externe Drehmoment wird mit dem Faktor s ($\delta M = s$) skaliert, während das Massenträgheitsmoment aufgrund der Randbedingungen konstanter Geometrie unverändert bleibt. Dies führt zu $\delta M_T = 1$. Daraus ergibt sich eine partielle Ähnlichkeit. Abschließend ergeben sich folgende Skalierungsfaktoren (Tabelle 5.2):

Tabelle 5.2: Zusammenfassung der Skalierungsfaktoren der betrachteten Parameter, sowie die zugehörigen Dimensionen (Steck et al., 2020)

| Parameter | Masse (M) | Länge (L) | Zeit (T) | Skalierungsfaktoren |
|--------------------------------------------------|-----------|-----------|----------|-----------------------|
| Zeit (δt) | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Länge (δl) | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Winkelgeschwindigkeit ($\delta \dot{\varphi}$) | 0 | 0 | -1 | 1 |
| Masse (δm) | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Externe Kräfte (δF_e) | 1 | 1 | -2 | s |
| Interne Kräfte (δF_i) | 1 | 1 | -2 | 1 |
| Anliegendes Drehmoment (δM) | 1 | 2 | -2 | s |
| Trägheitsmoment (δM_T) | 1 | 2 | -2 | 1 |
| Steifigkeit (δc) | 1 | 0 | -2 | $s \leftrightarrow 1$ |
| Massenträgheit (δJ) | 1 | 2 | 0 | 1 |

Die Skalierungsfaktoren (angegeben in Tabelle 5.2) sind in Abhängigkeit der Modellunterschiede der Federkraft angegeben. Die Federkraft unterscheidet sich zwischen skaliertem und unskaliertem System. Das Verhältnis wird mit dem Faktor $\delta F_e = s$ beschrieben.

Für die Berechnung der Leistungsgrößen (Fluss- und Potentialgrößen) am Prüfstand werden die Skalierungsfaktoren $\delta M = s$ und $\delta \dot{\varphi} = 1$ verwendet:

– Skalierung des Drehmoments: $\delta M = s$ (11)

Skalierung des anliegenden Drehmoments ist identisch zur Skalierung der externen Federkräfte).

– Skalierung der Winkelgeschwindigkeit: $\delta \dot{\varphi} = 1$ (12)

Die Berechnung der Leistungsgrößen erfolgt entsprechend der Skalierungsfaktoren (siehe Formel 11 und Formel 12) innerhalb des Regelungssystems in Echtzeit. Zur Umsetzung werden die Skalierungsfaktoren in die virtuelle Kopplung integriert (Abbildung 5.12). Die verrechneten mechanischen Größen werden dann auf die interagierenden Teilsysteme in den Koppelsystemen angewendet.

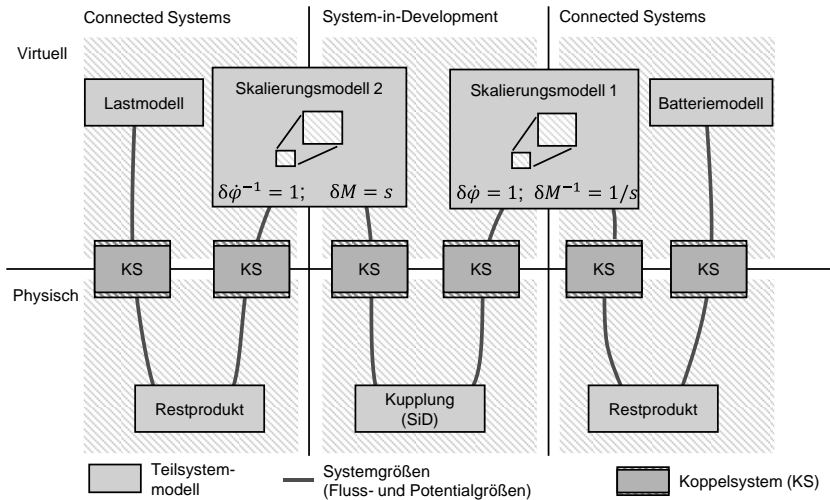


Abbildung 5.12: Integration der Skalierungsfaktoren in die virtuelle Kopplung. Die Skalierung erlaubt die gleichzeitige Anpassung rotatorischer Größen und ermöglicht so die Zusammenschaltung unterschiedlich skalierte Teilsysteme. Es werden die Skalierungsfaktoren $\delta M = s$ und $\delta\dot{\varphi} = 1$ verwendet.

5.4 Verifikation des Skalierungsmodells am sCiL-Prüfstand

Die Verifikation des Skalierungsmodells (siehe Abbildung 5.12, sowie Formel 11 und Formel 12) erfolgt durch Versuche am sCiL-Prüfstand, welcher in Abbildung 5.7 dargestellt ist. Um die Skalierung zu verifizieren, werden drei Versuchsreihen mit jeweils 30 Wiederholungen mit skalierten und unskalierten Kupplungsstufen durchgeführt. Die Auswertung basiert auf dem Zeitverlauf und charakteristischen Werten der Tests. Die Auswertung erfolgt anhand des Zeitverlaufs und der charakteristischen Punkte im Drehmoment der skalierten Versuche.

Die zeitlichen Verläufe des Drehmoments für die beiden Messstellen Sensor 1 und Sensor 2 sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Die unskalierten Versuche werden als

Linien, die skalierten Versuche als gestrichelte Linien dargestellt. Die Kennwerte der Auswertung sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Ohne die Skalierung sind die maximalen Drehmomente der Kupplungsauslösung an beiden Messstellen (Sensor 1 und Sensor 2, siehe Abbildung 5.13) ähnlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Leistung nicht angepasst wird. Geringe Unterschiede ergeben sich durch den Einfluss der verwendeten Motoren und der implementierten Steuerung.

Tabelle 5.3: Maximales Drehmoment der Kupplungsauslösung für zwei verschiedene Kupplungsstufen im Vergleich zum skalierten Kupplungsdrehmoment. Sensor 1 ist auf der Lastseite und Sensor 2 auf der Kupplungsseite des Skalierungsmodells. (Steck et al., 2020)

| | Kupplungsmoment Sensor 1 (Last): | Kupplungsmoment Sensor 2 (SiD): |
|---------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Referenz CL 3 | 0,937 Nm | 0,948 Nm |
| Referenz CL 5 | 1,247 Nm | 1,353 Nm |
| Skaliert CL 3 | 1,354 Nm | 0,899 Nm |

Im skalierten Test wird die übertragene Leistung angepasst, um die Differenz zwischen Kupplungsstufe 3 und Kupplungsstufe 5 auszugleichen. Da keine Veränderung an der Geometrie der Kupplung (Referenz CL 3) vorgenommen wurde, löst die Kupplung weiterhin mit ca. 0,899 Nm aus (dargestellt an Sensor 2). Dieser Wert entspricht dem in Abbildung 5.13 dargestellten Messwert aus den ursprünglichen unskalierten Versuchen.

Am Messpunkt (Sensor 1) ist eine angepasste Leistung zu sehen. Das Kupplungsmoment wurde auf das Niveau der großen Kupplungsebene skaliert. Abbildung 5.14 zeigt den Boxplot mit Kupplungsmomenten im Vergleich der Kupplungsstufen und der Skalierung.

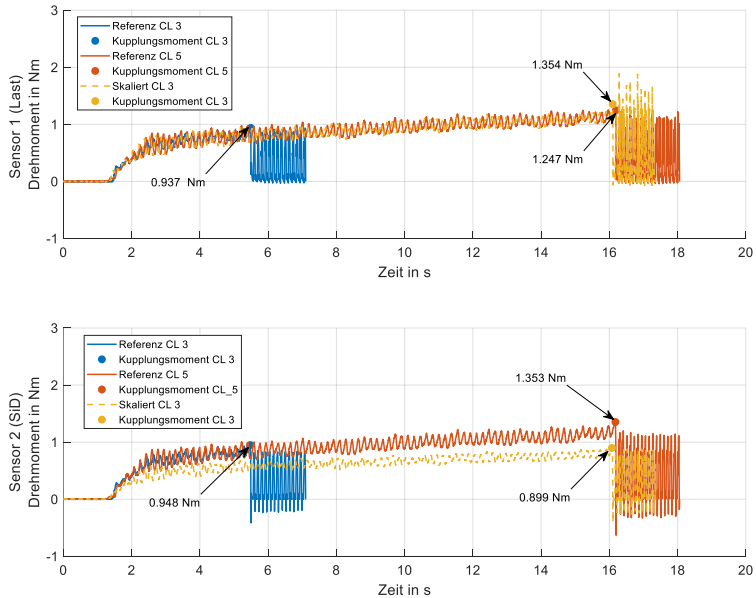


Abbildung 5.13: Drehmomentkurven der Kupplungsauslösung für zwei verschiedene Kupplungsstufen (Referenz CL_3 und Referenz CL_5) im Vergleich zur skalierten Kupplung (skaliert CL_3, dargestellt mit gestrichelter Linie). Sensor 1 erfasst das Drehmoment zwischen Last und Antriebsstrang. Zusätzlich erfasst Sensor 2 das Drehmoment an der Abtriebswelle der Kupplung. (Steck et al., 2020)

Ohne die Skalierung sind die maximalen Drehmomente bei Kupplungsauslösung an beiden Messstellen (Sensor 1 und Sensor 2, Abbildung 5.13) nahezu gleich. Ohne eine Skalierung werden die Leistungsgrößen in den Koppelsystemen nicht verrechnet und direkt weitergegeben. Kleine Unterschiede ergeben sich aus dem Einfluss der verwendeten Motoren und der implementierten Regelung. Der Einfluss der Koppelsysteme auf das Systemverhalten wird als gering bewertet, eine Bewertung wurde in Gwosch et al. (2019) veröffentlicht.

Abbildung 5.14 zeigt einen Box-Plot mit den Kupplungsmomenten an Sensorposition 1 und 2 für die Kupplungsstufen 3 und 5 sowie der Kupplungsstufe 3 mit Skalierung. Als Datenbasis dienen jeweils 30 Versuchswiederholungen. Abbildung 5.13 zeigt, dass im unskalierten Fall für die beiden Messstellen das Kupplungsmoment ähnlich große Werte annimmt, wobei an Sensorposition 2 tendenziell etwas höhere

Kupplungsmomente gemessen werden. Die auftretenden Abweichungen können durch den Einfluss der Motorregelung erklärt werden (vgl. Gwosch, 2019; Gwosch et al., 2019).

Bei der Untersuchung mit skaliertem Kupplung wird die übertragene Leistung durch die Skalierung verrechnet, um die Differenz zwischen Kupplungsstufe 3 und Kupplungsstufe 5 auszugleichen. Da an der Kupplung (Referenz CL 3) keine geometrische Änderung erfolgte, löst die Kupplung weiterhin bei ca. 0,948 Nm (gemessen an Sensor 2) aus. Dieser Wert entspricht dem in Abbildung 5.13 dargestellten Messwert aus den unskalierten Versuchen. An der Messstelle Sensor 1 ist die Leistungs-skalierung im Drehmomentverlauf sichtbar. Das Auslösemoment der Kupplung wurde durch die Skalierung auf das Niveau der großen Kupplungsstufe skaliert.

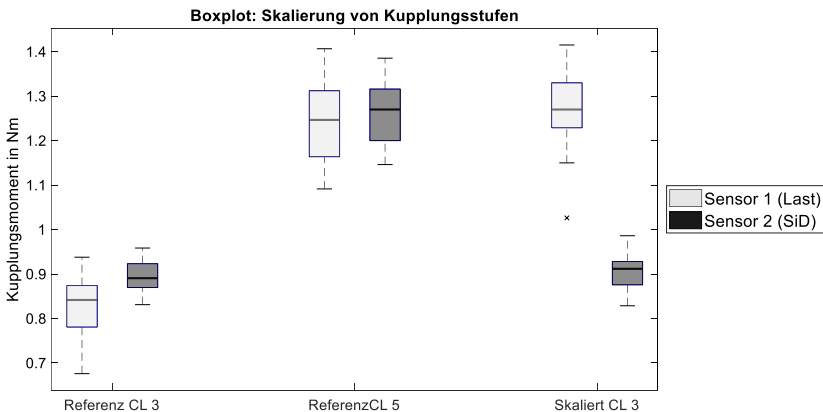


Abbildung 5.14: Box-Plot der Kupplungsdrehmomente im unskalierten (CL 3 und CL 5) und skalierten Versuch (Skaliert CL3) zur Bewertung der Skalierungsfaktoren. Die Box-Plots zeigen die maximalen Kupplungsmomente an beiden Sensoren (Last und SID) der Skalierung. Jeder Box-Plot enthält die Ergebnisse von 30 Tests. In der skalierten Testreihe (Skaliert CL3) ist das Kupplungsmoment (Sensor 1) durch die Skalierung verrechnet und mit den Kupplungsmomenten der Referenzversuche mit CL 5 vergleichbar. (Steck et al., 2020)

Zusätzlich wurde in Versuchen eine weitere Skalierungsstufe getestet. Die Kupplungsstufe 3 wurde auf die Kupplungsstufe 7 skaliert, wobei die zu erreichende Kupplungsstufe in Klammern, z.B. CL_3(7), steht. Die Ergebnisse der maximalen Kupplungsmomente sind in Abbildung 5.15 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Drehmoment an unterschiedliche Kupplungsstufen angepasst werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Anpassung der rotatorischen Leistungsgrößen zum Ausgleich der unterschiedlichen Kupplungseigenschaften für skalierte Versuche erfolgen kann. Ein Skalierungsmodell kann in der virtuellen Kopplung die rotatorischen Leistungsgrößen (Drehmoment und Drehzahl) an die Unterschiede der Teilsysteme anpassen. Die in diesem Kapitel formulierte Hypothese konnte damit bestätigt werden.

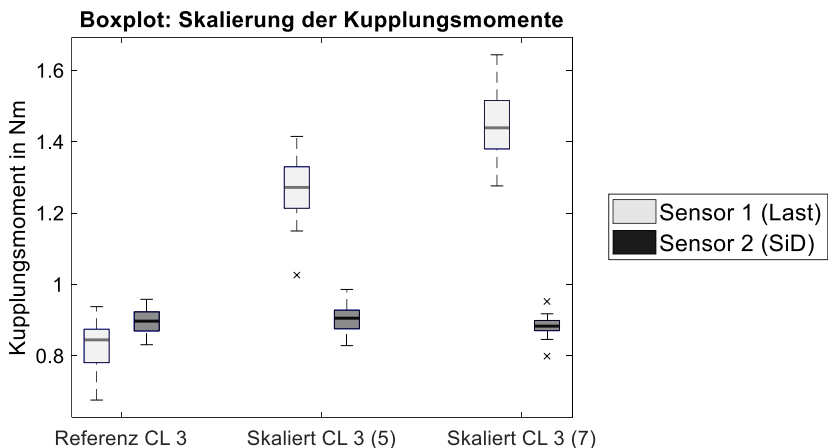


Abbildung 5.15: Box-Plot der Kupplungsdrehmomente von unskaliertem (Referenz CL 3) und skaliertem Fall (Skaliertes CL 3(5)) und (Skaliertes CL 3(7)). Die Box-Plots zeigen die maximalen Kupplungsmomente auf beiden Seiten (Last und SiD) der Skalierung. In den skalierten Testfällen Referenz CL 3(5) und Referenz CL 3(7) ist die Anpassung der Leistungsgrößen durch die Skalierung an der Differenz der Drehmomente zu erkennen.

5.5 Diskussion der Skalierung bezüglich der Federvorspannkraft

In diesem Kapitel wurde ein Skalierungsmodell von Rotationsgrößen abgeleitet, die es ermöglicht, eine Überlastkupplung mit unterschiedlicher Skalierung der Federkraft auf einem XiL-Prüfstand gleichzeitig mit Teilsystem anderer Skalierung zu testen. Dies wurde am Beispiel von unterschiedlichen Skalierungen einer Überlastkupplung aus einem Akkubohrschrauber gezeigt. Als Hauptgrößen des Systems werden die Parameter Drehmoment M , Winkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ und Abmessung l verwendet, da sie die Differenz des skalierten und unskalierten Systems und die physikalischen Leistungsgrößen in der virtuellen Kopplung darstellen. Zur Ableitung der Leistungsskalierung sind die relevanten Parameter der physikalischen Vorgänge notwendig, diese werden für die Dimensionsanalyse benötigt. Für die ermittelten Hauptvariablen werden dann Skalierungsfaktoren abgeleitet.

Die Randbedingungen des XiL-Prüfstandes und die Bedingungen des Systems ermöglichen keine vollständige Übereinstimmung der Skalierungsfaktoren. So hat beispielsweise die Randbedingung der Echtzeitfähigkeit einen Einfluss auf die Skalierung, da sie eine zeitliche Anpassung nicht zulässt. In Untersuchungen, in denen nur Systeme mit identischer Skalierung betrachtet werden, ist die Echtzeitfähigkeit von untergeordneter Relevanz. Wichtig ist, dass die Wechselwirkungen zwischen Systemen unterschiedlicher Skalierung berücksichtigt werden.

Da in dieser Untersuchung die interagierenden Teilsysteme die Funktionsweise und das Verhalten der Kupplung beeinflussen können, sind die Wechselwirkungen als relevant zu betrachten. Aufgrund der Wechselwirkungen ist es notwendig, dass alle beteiligten Teilsysteme kausal zusammenarbeiten und Signale in Echtzeit ausgetauscht und skaliert werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die rotatorischen Leistungsgrößen mit Hilfe der aus einer Ähnlichkeitsanalyse gewonnenen Skalierungsfaktoren verrechnet werden können. Die Skalierung ermöglicht die Anpassung an das Verhalten der hohen Kupplungsstufe, obwohl am sCiL-Antriebsstrangprüfstand eine niedrigere Kupplungsstufe eingestellt wurde. Die Hypothese kann damit bestätigt werden.

Bei geänderten Randbedingungen ist eine Überprüfung der Dimensionsanalyse und der Bewertungsgrößen notwendig. Wichtig ist es dabei, die dimensionslosen Kennzahlen auf Widersprüche zu überprüfen. Liegen Widersprüche vor, kann nur eine partielle Ähnlichkeit erreicht werden. Die Auswirkungen einer partiellen Ähnlichkeit auf das Untersuchungsergebnis sind durch weitere Untersuchungen zu bewerten.

Der Einfluss einer veränderten Massenträgheit der skalierten Kupplung wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Bei größeren Systemen, höheren Massenträgheiten oder größeren Skalierungsstufen kann der Einfluss der Massenträgheit relevant werden und eine Berücksichtigung erforderlich machen. Somit werden zusätzliche Untersuchungen zur Bewertung des Einflusses der Massenträgheit notwendig.

Die Skalierung der rotatorischen Größen einer Überlastkupplung eröffnet neue Anwendungsmöglichkeiten zur Prüfung von Teilsysteme mit unterschiedlicher Skalierung. Die Skalierung der mechanischen Größen kann unterstützen, wenn in frühen Phasen der Produktentwicklung skalierte Prototypen zur Verfügung stehen und diese im Gesamtsystem mit unterschiedlicher Skalierung getestet werden sollen.

5.6 Fazit und Beantwortung der Forschungsfrage

Die Untersuchung bezüglich unterschiedlicher Kupplungsstufen eines Akkubohrschraubers zeigt die Einsatzmöglichkeit des Antriebsstrangprüfstandes für die vorgezogene Absicherung von Überlastkupplungen.

Durch die Einbindung von verfügbaren Referenzsystemen, in diesem Fall aus vorangegangenen Produktgenerationen, kann die Funktionsweise einer zukünftigen Kupplung (Folgeentwurf der nächsten Produktgeneration) mit veränderter Federeigenschaften abgeschätzt werden, bevor dafür Prototypen oder Komponenten verfügbar sind. Die Untersuchungen ermöglichen eine Bewertung der Funktionsfähigkeit und Abschätzung der Produkteignung durch die Nutzung von frühen Referenzprodukten und der Anpassung durch ein Skalierungsmodell.

Die Ergebnisse in Abbildung 5.13 lassen eine frühe Bewertung der Teilsysteme zu, wenn die gezeigte Bewertungsgröße für die systemspezifische Fragestellung geeignet ist. Die Ergebnisse können für die Definition weitere Entwicklungsziele bezüglich der Überlastkupplung des zukünftigen Produkts genutzt werden. Durch die Skalierung können in frühen Entwicklungs- und Konzeptphasen, in denen noch keine Prototypen der Überlastkupplung eines zu entwickelnden Akkubohrschraubers vorliegen, bereits Abschätzungen der Funktionsweise ermöglicht werden.

Anpassung der rotatorischen Leistung durch Koppelsysteme

Wichtig für derartige Untersuchungen sind Koppelsysteme mit geringem Einfluss auf das Systemverhalten. Über diese Koppelsysteme erfolgt die Einbindung der Skalierung in XiL-Prüfstände. So ist es wichtig, dass die Signale in Echtzeit ausgetauscht und skaliert werden können. Die Verzögerung der Signale bestimmt, welche

Effekte über die Koppelsysteme noch übertragen werden können. Basierend auf Voruntersuchungen oder aus dem Untersuchungsziel abgeleitet können die Anforderungen an die Koppelsysteme definiert werden. Die als relevant erachteten Effekte im Antriebsstrang sollen durch die Koppelsysteme übertragen werden. Eine Bewertung der Koppelsysteme kann über die Auswertung in einem isolierten Test erfolgen.

Bei spezifischen Analysen kann es durch die Relevanzliste und den Anwendungsfall auch zu Randbedingungen und Einschränkungen kommen, so dass nur eine Leistungsgröße skaliert wird, um eine Anpassung zu ermöglichen. Je nach Untersuchungsziel ist nur eine gekoppelte Anpassung der Leistungsgrößen Drehmoment und Drehzahl möglich

Die Ergebnisse zeigen, dass die rotatorischen Leistungsgrößen mit Hilfe von Skalierungsfaktoren, die aus einer Ähnlichkeitsanalyse gewonnen werden, verrechnet werden können. Die Skalierung erlaubt die Anpassung an das Verhalten der höheren Kupplungsstufe, obwohl am sCiL-Antriebsstrangprüfstand eine niedrigere Kupplungsstufe eingestellt wurde. Die erreichte partielle Ähnlichkeit und die abgeleiteten Skalierungsfaktoren zeigen dennoch, dass das Kupplungsmoment mit einer skalierten Kupplung nachgebildet werden konnte.

Ableitung der Leistungsskalierung

Basierend auf dieser Untersuchung kann ein Vorgehen (siehe auch Kapitel 8.3), bestehend aus den folgenden Schritten zur Ableitung der Leistungsskalierung, für weitere Systeme und Untersuchungsziele als Basis dienen:

Vorgehen zur Ableitung der Leistungsskalierung:

- *Systemverständnis aufbauen und Messungen im Referenzsystem*
- *Modellbildung und Erstellung der Relevanzliste*
- *Dimensionsanalyse und Skalierungsfaktoren ableiten*
- *Einbindung der Skalierungsfaktoren in Koppelsysteme*

Notwendig für die Ableitung der Skalierung ist eine ausgereifte Modellvorstellung, die alle relevanten Parameter des Untersuchungsziels berücksichtigt. Relevante Parameter basieren auf dem Systemverständnis der betrachteten Komponenten und experimentellen Untersuchungen im Referenzsystem sowie den Anforderungen an die Komponente, die sich aktuell im Fokus und in der Entwicklung befindet.

Basierend auf diesen Modellunterschieden können mit Hilfe der Ähnlichkeitsmechanik und der Dimensionsanalyse die Skalierungsfaktoren abgeleitet werden.

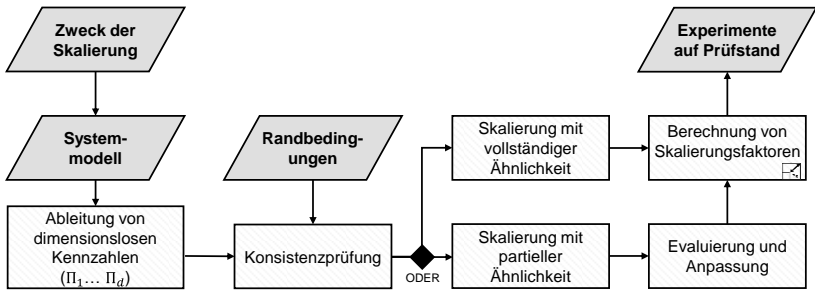


Abbildung 5.16: Vorgehen zur Ableitung der Skalierung, ausgehend von einem Systemmodell und Berücksichtigung der Randbedingungen (Steck et al., 2020).

Die mechanischen Parameter M , φ und l werden als Hauptvariablen des Systems verwendet, da sie die Modellunterschiede des skalierten und unskalierten Systems und die physikalischen Größen in der virtuellen Kupplung darstellen. Die rotatorischen Leistungsgrößen werden in Abhängigkeit der Skalierungsfaktoren verrechnet. Werden die Modellunterschiede mit einer anderen Variablen oder einem anderen Parameter beschrieben, ist dieser in der Dimensionsanalyse auch als Hauptvariable zu berücksichtigen. Die Modellunterschiede können beispielsweise auch über die Unterschiede hinsichtlich der Baugröße, der Trägheit oder anderer mechanischer Eigenschaften mit Einfluss auf die Funktionsweise beschrieben werden. Für abweichende Untersuchungsziele sind dann andere Skalierungsfaktoren nach dem in Abbildung 5.16 gezeigten Vorgehen in Abhängigkeit der relevanten Parameter zu bestimmen.

Im Rahmen dieser Untersuchung konnte eine Einsatzmöglichkeit des scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstands exemplarisch für eine vorgezogene Absicherung von Entwicklungsentscheidungen bei Überlastkupplungen aufgezeigt werden.

Mit der in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchung des abgeleiteten Vorgehens konnte die erste Teilforschungsfrage

Wie kann die Anpassung der rotatorischen Leistung in einem XiL-Prüfstand erfolgen und welche mechanischen Parameter werden für die Ableitung der Leistungsskalierung benötigt?

beantwortet werden.

6 Skalierung der Leistungsgrößen am Beispiel der Baugröße einer Überlastkupplung

In diesem Kapitel erfolgt die Erweiterung der Berechnungsvorschriften der Skalierung, um eine Anpassung der mechanischen Leistungsgrößen an unterschiedliche Größenstufen innerhalb des Antriebsstrangs zu ermöglichen. Dazu erfolgt eine Skalierung der Leistungsgrößen an Teilsystemen mit abweichender Baugröße und Übersetzungsverhältnis in einem XiL-Prüfstand.

Hierbei werden die Einsatzmöglichkeiten der Untersuchungen mit skalierten Prototypen aufgezeigt, beispielsweise zur skalierten Absicherung von Produkten einer Baureihe, die sich aktuell in der Entwicklung befinden und in einer anderen Baugröße vorliegen. Diese skalierten Prototypen aus anderen Baureihen verwenden oft das gleiche Funktionsprinzip, unterscheiden sich aber in Größe und Abmessungen.

Das Untersuchungsbeispiel orientiert sich an bestehenden Herausforderungen der Produktentwicklung. Für die vorgezogene Absicherung eines in der Entwicklung befindlichen Teilsystems als SiD können nur verfügbare verkleinerte Referenzprodukte genutzt werden. Diese Referenzprodukte entstammen beispielsweise aus bestehenden Produkten anderer Baureihen oder aus verfügbaren Komponenten von Baukästen. Jedoch unterscheiden sich in diesem Beispiel die Referenzprodukte in der Baugröße und im Übersetzungsverhältnis zum geplanten Folgeprodukt, das sich aktuell in der Entwicklung befindet.

In diesem Kapitel wird die Skalierung bezüglich zwei Parametern untersucht. Dazu wird der Einfluss der Baugröße und des Übersetzungsverhältnisses auf die Anpassung von Rotationsgrößen zwischen miteinander verbundenen Systemen analysiert und durch virtuelle Modelle kompensiert, um skalierte Komponententests unter Berücksichtigung des restlichen Systems zu ermöglichen (siehe Abbildung 6.1).

Die Anpassung der zwei abweichenden Parameter durch die Skalierung erfolgt in dieser Untersuchung hinsichtlich veränderter Eigenschaften der Baugröße und des Übersetzungsverhältnisses. Die Einflüsse der zwei abweichenden Eigenschaften werden zusätzlich in der Leistungsskalierung berücksichtigt, um skalierte Komponententests unter Berücksichtigung des restlichen Systems zu ermöglichen.

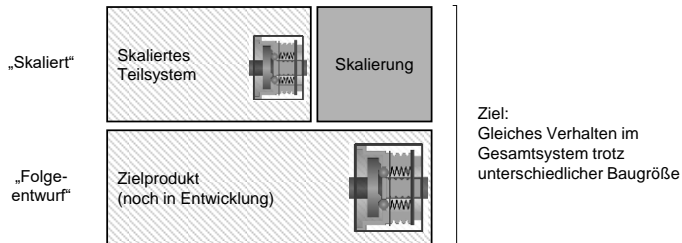


Abbildung 6.1: Übersicht der Untersuchung zu TF 2. Referenzprodukt und Zielprodukt unterscheiden sich hinsichtlich der Baugröße und des Übersetzungsverhältnisses. Ziel ist es im Gesamtsystem ein vergleichbares Verhalten zum Folgeentwurf zu realisieren.

Die Teilsysteme unterscheiden sich nicht hinsichtlich des Materials oder der verwendeten Fertigungsverfahren. Betrachtet wird die Einbindung der Teilsysteme mit zwei abweichenden Eigenschaften in interagierende Systeme anderer Skalierung.

In diesem Kapitel wird die Teilforschungsfrage 2 (TF 2) beantwortet:

Welche Einflüsse der Teilsysteme müssen in den Skalierungsfaktoren berücksichtigt werden, um eine Anpassung der mechanischen Leistungsgrößen an unterschiedliche Größenstufen innerhalb des Antriebsstrangs zu ermöglichen?

Dieses Kapitel basiert auf den nachfolgenden Veröffentlichungen, in denen Inhalte dieses Kapitels durch den Autor im Rahmen einer Mitautorenschaft publiziert sind:

- Steck, M., Gwosch, T. & Matthesen, S. (2021): „Compensation of mass-based effects in component scaling on a hardware-in-the-loop test bench by virtual inertia“ (siehe Steck, Gwosch & Matthesen, 2021)
- Matthesen, S., Gwosch, T. & Steck, M. (2019). „Digitaler Entwicklungsprozess - Entwicklung einer Validierungsmethode zur funktionalen Überprüfung von skalierten Versuchsmustern in einer HiL-Plattform. Schlussbericht zum Forschungsprojekt EFFPRO_4.0“ (siehe Matthesen et al., 2019)

Abbildungen und Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung oder in übersetzter Form aus den Veröffentlichungen übernommen. Sie werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.

6.1 Zielsetzung und Hypothese

In dieser Untersuchung wird der Einfluss einer abweichenden Baugröße und Übersetzungsverhältnis auf die Anpassung von Leistungsgrößen zwischen miteinander verbundenen Systemen analysiert und durch Skalierungsfaktoren kompensiert, um skalierte Komponententests zu ermöglichen. Die Integration der skalierten Komponenten mit abweichenden Eigenschaften erfolgt über Koppelsysteme in einem XiL-Prüfstand.

In Kapitel 5 wurde eine Skalierung von Rotationsgrößen verwendet, um das gleichzeitige Testen von Antriebsstrang-Subsystemen mit unterschiedlicher Skalierung auf einem XiL-Prüfstand zu ermöglichen. Dies wurde am Beispiel der unterschiedlichen Skalierung der Federvorspannung einer Überlastkupplung aus einem Antriebsstrang gezeigt. Die Ergebnisse der Teilforschungsfrage 1 (siehe auch Steck et al. (2020)) zeigen, dass die rotatorischen Leistungsgrößen mit Hilfe von Skalierungsgesetzen, die aus einer Ähnlichkeitsanalyse gewonnen wurden, verrechnet werden können. Die Skalierung ermöglicht eine Anpassung und Vorhersage des Verhaltens an das zukünftige Produkt, obwohl auf dem sCiL-Antriebsstrangprüfstand abweichende Teilsysteme verwendet wurden. In Kapitel 5 und Teilforschungsfrage 1 wurden einzelne Eigenschaften berücksichtigt, eine Anpassung der Baugröße für gemeinsame Untersuchungen erfolgte in der Untersuchung in Kapitel 5 nicht.

Lücke und Fragestellung

Die folgende Untersuchung adressiert die Fragestellung, wie eine Anpassung der rotatorischen Leistungsgrößen in der Skalierung zum Ausgleich der unterschiedlichen Baugröße und des Übersetzungsverhältnisses für skalierte Versuche erfolgen kann.

Wenn diese Unterschiede in den Prüfstandsuntersuchungen durch die Skalierung nicht berücksichtigt werden, kann das Systemverhalten für Varianten größerer Baugröße nicht abgesichert werden. Eine Erweiterung der Skalierung und Berücksichtigung der Einflüsse der Größe und des Übersetzungsverhältnisses ist notwendig, um skalierte Bauteilversuche unter Einbindung des restlichen Systems zu ermöglichen. Es ist derzeit unklar, wie die zwei Parameter, Baugröße und geänderte Übersetzungsverhältnisse, in der Skalierung von Rotationsgrößen in XiL-Prüfständen berücksichtigt werden müssen. Ziel der skalierten Untersuchung ist es, aus funktionaler Sicht das gleiche Systemverhalten auch dann zu erreichen, wenn ein Subsystem aufgrund anderer Größenstufe ein anderes Verhalten aufweist.

In dieser Untersuchung wird der Einfluss von geänderter Baugröße und Übersetzungsverhältnis auf die Anpassung von Rotationsgrößen zwischen zusammenschalteten Systemen analysiert und durch virtuelle Modelle kompensiert, um skalierte Komponententests unter Berücksichtigung des verbleibenden Systems zu ermöglichen.

Es wird daher folgende Hypothese formuliert:

Die Skalierung mehrerer Parameter auf dem sCiL-Prüfstand ermöglicht das gleichzeitige Testen von Antriebsstrang-Subsystemen mit unterschiedlicher Baugröße und abweichendem Übersetzungsverhältnis.

Am Beispiel einer drehmomentbegrenzenden Kupplung aus einem Akkubohrschrauber (siehe Kapitel 2.3.3) wird der Einfluss der Baugröße und des Übersetzungsverhältnisses auf die Skalierung in Prüfstandsversuchen analysiert und durch die Anpassung der Skalierung berücksichtigt. Die betrachteten Komponenten unterscheiden sich hinsichtlich der Baugröße und der Übersetzungsverhältnisse im Planetenradgetriebe. In der Untersuchung erfolgt eine Anpassung der Systemgrößen, welche die Funktionserfüllung des zu entwickelnden Systems beeinflussen. Als Beispielsysteme werden Teilsysteme der Kupplung von zwei Akkubohrschraubern des Herstellers Bosch verwendet.

Der Einfluss der Trägheit wird in einer weiterführenden Untersuchung untersucht. Dazu werden mit einem vergleichbaren Antriebsstrang Untersuchungen mit variierender Trägheit durchgeführt. Die Ergebnisse gehen über den Rahmen dieser Arbeit hinaus und werden daher nur zusammenfassend in Kapitel 6.5 aufzeigt.

6.2 Untersuchungsmethode und Versuchsaufbau

In diesem Unterkapitel werden der Versuchsaufbau und die Untersuchungsmethode beschrieben, um den Einfluss der Größenunterschiede in der Skalierung zu untersuchen. Zunächst werden das Beispielsystem und die verwendeten Modelle beschrieben. Anschließend wird die Versuchsreihe zur Verifikation der erweiterten Skalierung in XiL-Untersuchungen einer Überlastkupplung beschrieben.

6.2.1 Überlastkupplung als Beispielsystem

In dieser Untersuchung werden zwei Kupplungen aus Akkuboehrschraubern (siehe Kapitel 2.3.3) auf dem sCiL-Prüfstand genutzt, um den Einfluss von Größenunterschieden auf die Anpassung von Rotationsgrößen zwischen zusammengesetzten Systemen zu analysieren und zu berücksichtigen.

Es handelt sich dabei um einen Akkuboehrschrauber in der 10,8 Volt-Variante¹ und einen Akkuboehrschrauber der 18 Volt-Ausführung² (siehe Kapitel 2.3.3). Beide Varianten der Kupplung nutzen das gleiche Funktionsprinzip, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich Baugröße und Übersetzungsverhältnis. Unterscheiden lassen sich die beiden Varianten hinsichtlich der Akkuspannung. Für die Versuche wird das komplette Teilsystem (siehe Abbildung 6.2-a) der Überlastkupplung genutzt. Als Entwicklungsziel wird eine Anpassung der Baugröße gewählt, damit soll als Ziel ein Kupplungsmoment von 1 Nm erreicht werden.

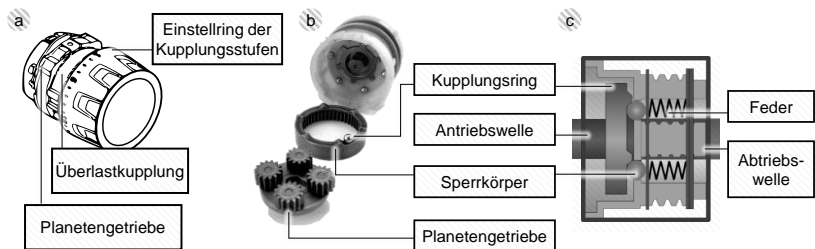


Abbildung 6.2: Beispielsystem für die Untersuchung zu TF 2 bestehend aus Kupplung und Planetengetriebe (siehe a.). Darstellung und Benennung der Komponenten (siehe b. und c.)

Die Kupplung besteht als Teilsystem aus einem Planetenradgetriebe und einer Überlastkupplung, die in das Hohlrad integriert ist (siehe Abbildung 6.2-b). Alle Komponenten sind in einem Gehäuse aus Kunststoff untergebracht.

¹ Akkuboehrschrauber GSR 10 8 Li des Elektrowerkzeugherstellers Robert Bosch GmbH (Robert Bosch Power Tools GmbH (2016))

² Akkuboehrschrauber GSR 18-2 Li des Elektrowerkzeugherstellers Robert Bosch GmbH (Robert Bosch Power Tools GmbH (2014).)

Besonderheiten in der Funktionsweise des Teilsystems ergeben sich durch das Zusammenspiel der Überlastkupplung mit dem Planetengetriebe, welche in das Hohlrad integriert ist. Bezüglich der Zustände der Kupplung ergeben sich zwei unterschiedliche Leistungsflüsse innerhalb des Planetengetriebes (siehe Abbildung 6.3):

- Zustand 1 (Kupplung geschlossen):
Hohlrad fest → Abtrieb durch Planetenträger → Leistungsübertragung an Abtrieb
- Zustand 2 (Kupplung geöffnet):
Kupplung in Hohlrad rastet aus → Hohlrad ist nicht mehr abgestützt, → Leistungsübertragung unterbrochen.

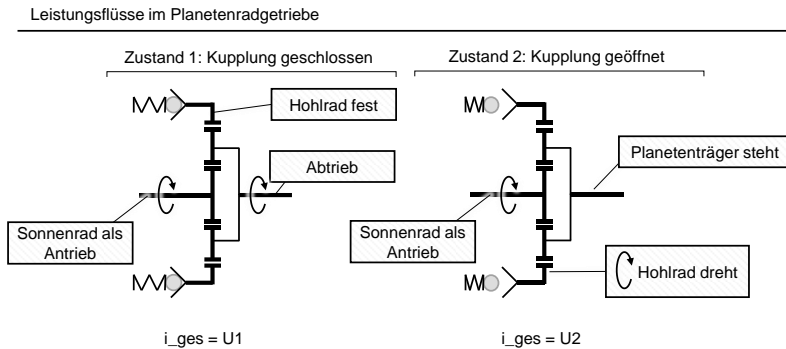


Abbildung 6.3: Unterschiedliche Zustände im Planetengetriebe je nach äußeren Belastungen und Verhalten der Kupplung, welche am Hohlrad angreift.

Die Systemunterschiede der beiden betrachteten Kupplungen mit Planetenradgetriebe sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

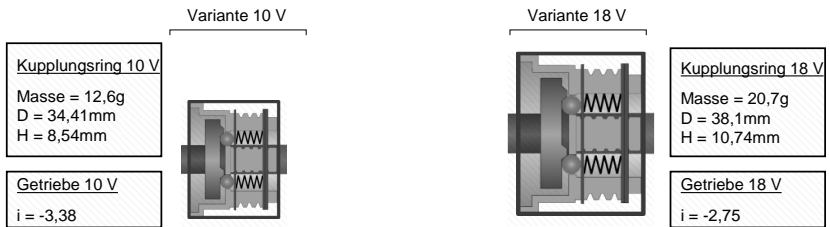


Abbildung 6.4: Systemeigenschaften der Kupplung mit Planetenradgetriebe der 10 V und 18 V Variante. Die Masse, Durchmesser und Höhe des Kupplungsring sind für beide Varianten angegeben.

Ziel der Untersuchung ist, durch die Skalierung der übertragbaren Leistungsgrößen ein vergleichbares Verhalten³ des Antriebsstrangs unterschiedlicher Größenstufen der Teilsysteme zu erreichen. Ziel ist eine gute Übereinstimmung des Auslösemoments im Drehmomentverlauf der Überlastkupplung. Die Untersuchung findet am scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstand (sCiL-Prüfstand) mit dem in Abbildung 5.6 dargestellten Untersuchungssetup statt.

6.2.2 Prüfstand und virtuelle Kopplung

Die Teilsysteme der unterschiedlichen Kupplungen können auf dem sCiL-Prüfstand in anders skalierte interagierende Systeme eingebunden werden. Durch die virtuelle Kopplung werden die übrigen Subsysteme als physikalische oder virtuelle Modelle (als Connected Systems) eingebunden. Die Fluss- und Potentialgrößen werden kontinuierlich zwischen den Teilsystemen in Echtzeit ausgetauscht. Die virtuelle Kopplung ermöglicht den gleichzeitigen Betrieb von mechanisch entkoppelten Antriebsstrangkomponenten und deren Kopplung durch das Regelungssystem⁴ des Prüfstandes.

Der allgemeine Aufbau dieser virtuellen Kopplung ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Die Einbindung der Skalierungsfaktoren erfolgt innerhalb des Skalierungsmodells in der virtuellen Kopplung (vgl. Abbildung 6.5) zwischen den betrachteten Teilsystemen. Diese Untersuchung wird exemplarisch am sCiL-Prüfstand durchgeführt.

³ Ziel ist eine gute Übereinstimmung für einzelne charakteristische Kennwerte im Drehmomentverlauf.

⁴ Der Einfluss der Koppelsysteme auf das Systemverhalten wird als gering bewertet, eine Bewertung wurde in Gwosch, Steck und Matthiesen (2019) veröffentlicht.

Die Umsetzung des vorgestellten Konzepts (aus Abbildung 6.5) findet sich in Abbildung 6.6. Die Untersuchung wird im Vergleich zur Untersuchung in Kapitel 5 mit einem reduzierten Aufbau durchgeführt, das Restsystem auf der Lastseite ist auf ein Lastmodell reduziert. Um eine Bewertung der virtuellen Kopplung und der Skalierung zu ermöglichen wurden nicht notwendige physische Teilsysteme in dieser Untersuchung reduziert oder durch vereinfachte Systeme und Modelle ersetzt.

Der sCiL-Prüfstand enthält die mechanischen Komponenten der Überlastkupplung eines Akkuboehrschraubers, zusätzlich sind als interagierende Systeme eine physische Welle und ein virtuelles Lastmodell über die Koppelsysteme eingebunden. Die Anzahl an Teilsystemen wurde für diese Untersuchung reduziert, um störende Effekte in dieser skalierten Untersuchung zu reduzieren. Je nach Untersuchungsziel können weitere Teilsysteme eingebunden werden. Im Vergleich zur Untersuchungs-umgebung in Kapitel 5, sind hier weitere Teilsysteme durch virtuelle Modelle ersetzt.

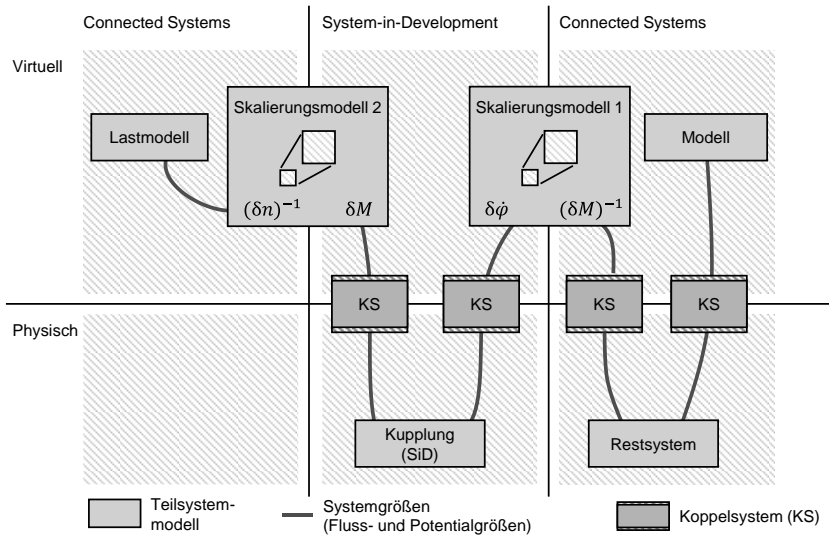


Abbildung 6.5: Einbindung der Skalierung in die virtuelle Kopplung. Die Skalierung ermöglicht die gleichzeitige Anpassung von Fluss- und Potentialgrößen und damit die Kopplung unterschiedlich skalierten Subsysteme. (Steck et al., 2020)

Im unteren Teil von Abbildung 6.6 ist die Überlastkupplung eines Akkuschraubers über zwei Sensor-Aktor-Systeme (virtuelle Kopplung) mit den übrigen Teilsystemen verbunden. Auf der Antriebsseite der Kupplung befindet sich ein skaliertes physisches Teilsystem, das als mechanische Welle ausgeführt ist. An der Abtriebsseite befindet sich ein virtuelles Lastmodell. Insgesamt sind 4 Motoren der Koppelsysteme physisch vorhanden. Zusätzlich sind zwei Messnaben im Prüfstand integriert, um die rotatorischen Leitungsgrößen vor und nach der virtuellen Kopplung auf der Antriebsseite auszuwerten. Eine detailliertere Beschreibung der verwendeten Hardware findet sich im Anhang und in der Literatur (Gwosch, 2019; Gwosch et al., 2019; Steck et al., 2020).

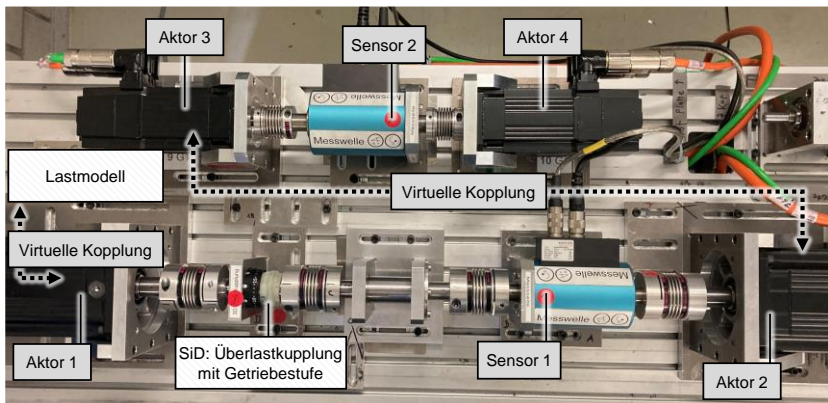


Abbildung 6.6: sCiL-Prüfstand zur Durchführung der Verifikation der skalierten Untersuchung. Der sCiL-Prüfstand enthält die mechanischen Komponenten des Antriebsstrangs eines Akkubohrschraubers. Die virtuelle Kopplung ist zwischen Aktor 2 und Aktor 3 sowie zwischen Aktor 1 und virtuellem Lastmodell im Antriebsstrang integriert.

Zur Darstellung des mechanischen Drehmoments aus der Umgebung wird am Prüfstand ein Lastmodell⁵ verwendet. Abhängig von der Winkelposition erzeugt das Lastmodell ein Gegenmoment, das mit zunehmender Bewegung ebenfalls zunimmt.

⁵ Das Lastmodell (vgl. Steck, Gwosch und Matthiesen (2019)) verwendet hier einen konstanten Lastfaktor als Zusammenhang zwischen Drehwinkel und Lastmoment

Das verwendete Lastmodell ermöglicht konstante Prüfbedingungen und verhindert somit Störungen. Als Vorgaben werden eine Drehmomentrampe und eine Drehzahl-erhöhung auf eine konstante Drehzahl verwendet.

Um die Funktionsfähigkeit der Skalierung zur Berücksichtigung der Größenunterschiede zu bewerten, werden Tests mit skalierten und unskalierten Teilsystemen auf dem sCiL-Prüfstand durchgeführt. Zur Bewertung der Auslösecharakteristik werden Kennwerte im Drehmomentverlauf betrachtet. Die Bewertung erfolgt im Hinblick auf das Ausrasten der Kupplung bei maximalem Kupplungsmoment, sowie die Bewertung der Auslösefrequenz. Die Auslösefrequenz ist durch die sich wiederholenden Drehmomentanstiege für eine Anregung des restlichen Systems verantwortlich. Über die Auslösefrequenz wird die Anpassung der Drehzahl durch die Skalierung an abweichende Übersetzungsverhältnisse bewertet.

6.2.3 Vorgehen zur Ableitung der Skalierung

Zur Ableitung der Skalierung wird das in Abbildung 5.8 vorgestellte Vorgehen genutzt. Basierend auf den Modellunterschieden (Abbildung 6.4) werden die relevanten Parameter bestimmt und für die Dimensionsanalyse genutzt. Zur Ableitung der Skalierungsfaktoren wird die in Abbildung 5.16 vorgestellte Vorgehensweise genutzt und an einem Beispiel mit zwei zu skalierenden Parametern betrachtet.

Basierend auf einer Skalierung der Baugröße erfolgt eine Anpassung der Momente, zusätzlich werden die Drehzahlen skaliert, um die Übersetzungsverhältnisse auszugleichen. Dabei werden die beiden Zustände der Kupplung (geöffnet und geschlossen) berücksichtigt, um bei den auftretenden Kupplungsauslösungen eine vergleichbare Anregung des Systems zu realisieren.

6.2.4 Versuchsdurchführung

Die Verifikation der Skalierung erfolgt auf dem sCiL-Prüfstand. Zur Beantwortung der Forschungsfrage werden drei Versuchsreihen (siehe Abbildung 6.7) durchgeführt und hinsichtlich der Auslösecharakteristik verglichen:

- 1) Nicht skaliertes Bauteil in nicht skaliertes Umgebung (Referenzversuche in der Größenstufe 10 V)
- 2) Unskaliertes Bauteil in leistungsskaliertes Umgebung (Skaliertes Versuch in skaliertes Größenstufe 10 V)
- 3) Größenskaliertes Bauteil in skaliertes Umgebung (Versuch mit Folgeentwurf in der Größenstufe 18 V)

Die Versuchsreihen unterscheiden sich hinsichtlich der Eigenschaften der Kupplung mit Planetengetriebe und durch die genutzte Skalierung.

Zunächst werden in der ersten Versuchsreihe Messungen mit der unskalierten Original-Kupplung (10 V-Referenz) durchgeführt. Anschließend werden die Skalierungsfaktoren abgeleitet, um den Unterschied zwischen vorliegender Referenz und dem Folgeentwurf zu berücksichtigen.

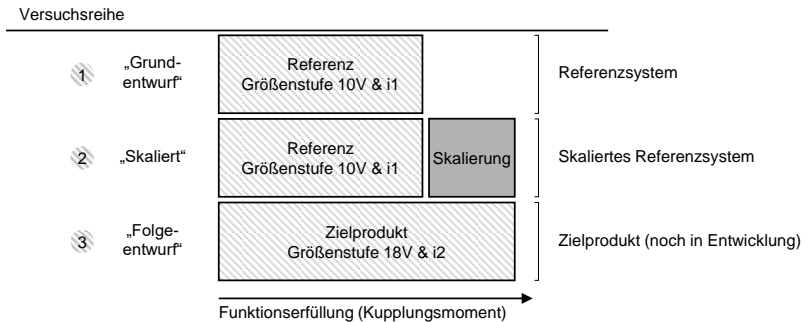


Abbildung 6.7: Versuchsreihen zur Überprüfung der Hypothesen und Benennung der verwendeten Komponenten.

In der zweiten Versuchsreihe wird der Unterschied der Baugröße und des Übersetzungsverhältnisses in einem Skalierungsmodell berücksichtigt, um das Verhalten der Ziel-Kupplungsstufe (Folgeentwurf) abzuschätzen.

In der dritten Versuchsreihe erfolgen Messungen zum Abgleich mit dem Folgeentwurf und den gewünschten Eigenschaften. Insgesamt werden für jede Versuchsreihe 21 Versuche durchgeführt.

6.2.5 Auswertung

Zur Überprüfung der Skalierung werden die zeitlichen Verläufe des Drehmoments an Messwelle 1 und 2 aufgenommen und ausgewertet (siehe Abbildung 5.10). Um die Skalierung innerhalb der virtuellen Kupplung zu verifizieren, werden die Zeitsignale des Drehmoments verglichen.

Die Überprüfung der Skalierung erfolgt anhand der Zeitsignale des Drehmoments zwischen Last und Antriebsstrang (Sensor 1). Zur Bewertung der verschiedenen

Kupplungsstufen, hinsichtlich des maximalen Drehmoments wird das Kupplungsdrehmoment der ersten Ausrückung betrachtet.

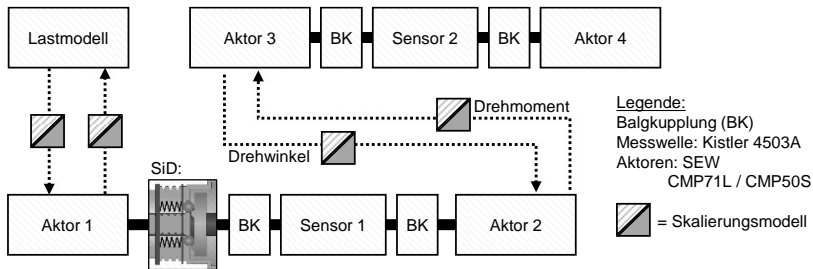


Abbildung 6.8: Verifikations-Testaufbau zur Bewertung der Skalierung in der virtuellen Kupplung. Die Skalierung der Rotationsgrößen im Antriebsstrang kann über Sensor 1 und Sensor 2 ausgewertet werden. (Angepasste Darstellung aus Steck et al., 2022)

Zusätzlich erfolgt die Auswertung der Auslösefrequenz der sich wiederholenden Drehmomentanstiege, um die Anregung durch die Kupplungsauslösungen für das Gesamtsystem vergleichen zu können. Die Auslösefrequenz ist ein Maß für die Übereinstimmung der Drehzahlen während der Kupplungsauslösung. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

6.3 Ergebnis zur Skalierung bezüglich der Baugröße

Zunächst wird der theoretische Einfluss der veränderten Übersetzungsverhältnisse auf die Funktion dargestellt und die Auswirkung einer veränderten Baugröße und der abweichenden Übersetzungsverhältnisse aufgezeigt. Dann wird die Skalierung erweitert, um unterschiedliche Größenstufen in der virtuellen Kupplung zu berücksichtigen. Anschließend werden in Kapitel 6.3.3 die Ergebnisse des Verifikationsexperiments vorgestellt und die Funktionalität bewertet. Zunächst wird die Funktionsweise der Überlastkupplung vorgestellt und die Auswirkungen veränderter Eigenschaften auf die Funktion dargelegt.

6.3.1 Modellunterschiede der Kupplung

Ziel der Untersuchung ist es, die Modellunterschiede zwischen skalierte Kupplung und Folgentwurf in der Skalierung zu berücksichtigen, um die Grundlage für skalierte Versuche mit unterschiedlichen Kupplungsgrößen zur gleichzeitigen Prüfung von Antriebsstrang-Subsystemen mit unterschiedlicher Skalierung zu schaffen.

Die Modellierung der Kupplung liefert folgende Zusammenhänge und Modellunterschiede. Ein Unterschied ergibt sich aufgrund veränderter Durchmesser der Kupplung. Über den veränderten Kupplungsdurchmesser (Hebelarm der Federkraft) kann proportional mehr Drehmoment übertragen werden. In Abhängigkeit von der maximalen Federkraft ergibt sich das maximale Drehmoment der Kupplung. Auf die Federkraft der Kupplung haben die Geometrie und die Federkraft einen Einfluss. Die beiden Größenstufen der Kupplung verwenden Federn mit übereinstimmender Federrate.

Beide Kupplungen verwenden Rastkugeln mit dem identischen Durchmesser als Sperrkörper. Die Vorspannung der Federn lässt sich durch einen Drehring an das gewünschte maximale Moment anpassen. Die Geometrie der Kupplung unterscheidet sich hinsichtlich der Kupplungshöhe. Die Zusammenhänge zur Bestimmung des maximalen Drehmoments der Überlastkupplung wurden in Abbildung 5.11 gezeigt.

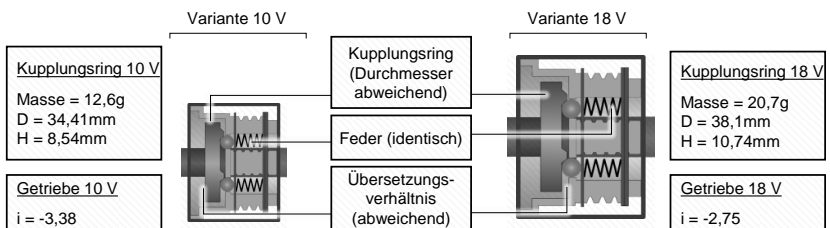


Abbildung 6.9: Unterschiede der betrachteten Teilsystemvarianten. Die Unterschiede zeigen sich hinsichtlich der Baugröße der Kupplung und der Übersetzung des Planetengetriebes. Die Federkennlinien sind bei beiden Varianten identisch. Unterschiede im Verhalten ergeben sich noch durch veränderte Vorspannung der Kupplung (Kupplungsstufen sind über Ring einstellbar).

Abgeleitet aus der Modellbildung (siehe Steck, Paland, Gwosch & Matthiesen, 2021) werden für die Ableitung der Skalierung die nachfolgenden Parameter berücksich-

tigt. Interne Parameter, wie geometrische Abmessungen und mechanische Eigenschaften des Kupplungsringes beeinflussen die Funktionalität und werden daher als relevant betrachtet.

Es werden folgende Größen als relevant angesehen:

- Geometrische Abmessungen l
- Drehmoment M
- Masse m
- Zeit t
- Federkraft F
- Winkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$
- Winkelbeschleunigung $\ddot{\varphi}$
- Rotationsträgheit J

Ziel der Skalierung ist es in dieser Untersuchung, zwei zu skalierende Parameter für die Anpassung der Leistungsgrößen zu berücksichtigen, um die gleichzeitige Prüfung von Antriebsstrangsubsystemen mit unterschiedlicher Größenstufe zu ermöglichen. Daher ist die Anpassung der rotatorischen Systemgrößen in Abhängigkeit der zu skalierenden Parameter notwendig. Die Varianten der Kupplung unterscheiden sich hinsichtlich der Baugröße und des Übersetzungsverhältnisses.

6.3.2 Skalierungsfaktoren

Nach der Modellierung wurden die relevanten Parameter aus der Relevanzliste durch eine Dimensionsanalyse analysiert. Die Dimensionen der relevanten Parameter sind nach dem $\{MLT\}$ -System der Grundgrößen Masse (M), Länge (L), Zeit (T) geordnet (Unger & Leyer, 2015). Als Hauptgrößen des Systems werden die Parameter Drehmoment M , Winkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ und Abmessung l verwendet, da sie die Differenz des skalierten und unskalierten Systems und der physikalischen Größen in der virtuellen Kopplung darstellen. Die nachfolgende Tabelle 6.1 zeigt das Ergebnis der Dimensionsanalyse. Dargestellt sind die Dimensionen der betrachteten Parameter entsprechend der Grundgrößen Masse (M), Länge (L), Zeit (T). Die dimensionslosen Kennzahlen werden auf der Basis der dimensionslosen Größen und deren Beziehungen berechnet.

Tabelle 6.1: Ergebnis der Dimensionsanalyse. Dargestellt sind die Dimensionen der relevanten Parameter. Als Hauptgrößen des Systems werden die Parameter Drehmoment M , Winkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ und Abmessung l verwendet, da sie die Differenz des skalierten und unskalierten Systems abbilden. (Steck et al., 2022)

| Dimension | Parameter | | | F | t | φ | $\ddot{\varphi}$ | J | m |
|-----------|-----------|-----------------|-----|-----|-----|-----------|------------------|-----|-----|
| | M | $\dot{\varphi}$ | l | | | | | | |
| Masse (M) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Länge (L) | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| Zeit (T) | -2 | -1 | 0 | -2 | 1 | 0 | -2 | 0 | 0 |

Die beiden Größenstufen der Kupplungen unterscheiden sich nicht hinsichtlich der verwendeten Materialien und der genutzten Fertigungsverfahren. Aufgrund der Eigenschaften des XiL-Prüfstands, der Eigenschaften des Prototyps und des Zwecks der Skalierung sind die folgenden Randbedingungen relevant:

- Der Durchmesser der Kupplung wird mit dem Faktor a skaliert. So wird das Verhältnis zwischen dem Durchmesser (δD) des skalierten und des unskalierten Systems mit

$$\delta D = \frac{D_s}{D_u} = a$$
 beschrieben.
- Höhe des Kupplungsringes (siehe Abbildung 5.3) wird mit b skaliert. Die Höhe des Kupplungsringes ist für die Vorspannung der Feder verantwortlich und bestimmt damit das Kupplungsmoment. Diese Länge wird mit $\delta h = b$ skaliert. Es liegt keine vollständige geometrische Skalierung des Kupplungsringes vor, da der Durchmesser mit einem abweichenden Faktor skaliert wird.
- Das Drehmoment ergibt sich durch die Federkraft multipliziert mit dem Durchmesser des Kupplungsringes. Als Resultat wird das Moment mit $\delta M = \delta D \cdot \delta h$ skaliert
- Das Übersetzungsverhältnis stellt bereits eine dimensionslose Kennzahl dar, die das Verhältnis der Zahnzahlen der Zahnräder beschreibt.
- Die Drehzahl wird mit dem Faktor $\delta n = n$ skaliert. Die Unterschiede des Übersetzungsverhältnisses bestimmen die Skalierung der Drehzahl.
- Eine Zeitskalierung ist nicht zulässig. Dies ist notwendig, um die Interaktionen zwischen den Teilsystemen abbilden zu können. Daher wird ein Verhältnis zwischen der Zeit des skalierten und des unskalierten Systems so definiert, dass es keine Skalierung gibt: $\delta t = 1$
- Es soll das gleiche Material verwendet werden, d.h. es erfolgt keine Skalierung für das Material: $\delta \rho = 1$

Die Randbedingungen ermöglichen keine vollständige geometrische Skalierung, da der Durchmesser und die Höhe der Kupplung nicht mit dem gleichen Faktor skaliert werden können. Die Überprüfung der Kennzahlen zeigt eine Diskrepanz hinsichtlich der Trägheitsmomente. Durch die Teilähnlichkeit der geometrischen Abmessung werden die Trägheiten des Kupplungsrings nicht im gleichen Maß skaliert. Zusätzlich liegt eine Diskrepanz zwischen der Skalierung der Trägheiten und der Skalierung der Trägheitsmomente vor. Das externe Drehmoment wird mit dem Faktor ($\delta M = a \cdot b$) skaliert, während das Massenträgheitsmoment aufgrund der unterschiedlichen Geometrie mit einem abweichenden Faktor skaliert wird. Um die beiden Zustände des Planetenradgetriebes im Zusammenspiel mit der Kupplung zu berücksichtigen, wird die Skalierung der Drehzahl aufgeteilt. Es erfolgt eine Anpassung der Drehzahl vor und eine nach der Kupplung.

Die Überprüfung mit den Randbedingungen ergibt eine partielle Ähnlichkeit. Abschließend ergeben sich folgende Skalierungsfaktoren (siehe Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der Skalierungsfaktoren der betrachteten Parameter (Steck et al., 2022)

| Parameter | Masse (M) | Länge (L) | Zeit (T) | Skalierungsfaktoren |
|--------------------------------------------------|-----------|-----------|----------|---------------------|
| Zeit (δt) | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Durchmesser (δl) | 0 | 1 | 0 | a |
| Höhe (δh) | 0 | 1 | 0 | b |
| Winkelgeschwindigkeit ($\delta \dot{\varphi}$) | 0 | 0 | -1 | n_1/n_2 |
| Masse (δm) | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Externe Kräfte (δF_e) | 1 | 1 | -2 | 1 |
| Interne Kräfte (δF_i) | 1 | 1 | -2 | 1 |
| Anliegendes Drehmoment (δM) | 1 | 2 | -2 | $a \cdot b$ |
| Trägheitsmoment (δM_T) | 1 | 2 | -2 | 1 |
| Steifigkeit (δc) | 1 | 0 | -2 | 1 |
| Massenträgheit (δJ) | 1 | 2 | 0 | 1 |

Am Prüfstand werden für die Berechnung der Leistungsgrößen (Fluss- und Potentialgrößen) die Skalierungsfaktoren δM und $\delta \dot{\varphi}$ verwendet:

- Skalierung des anliegenden Drehmoments ist abhängig vom Verhältnis der Kupplungsabmessungen. Daraus folgt die Skalierung des Drehmoments mit
$$\delta M = a \cdot b \quad (13)$$
- Skalierung der Winkelgeschwindigkeit
$$\delta \dot{\varphi} = n_1/n_2 \quad (14)$$

Die Berechnung der Leistungsgrößen (siehe Abbildung 6.10) erfolgt innerhalb des Regelungssystems während des Betriebs des Prüfstandes in Echtzeit. Die verrechneten mechanischen Größen werden dann auf die interagierenden Teilsysteme in den Koppelsystemen angewendet.

Zur Umsetzung werden die Skalierungsfaktoren (Formel 13 und Formel 14) in die virtuelle Kopplung integriert. Das Drehmoment M wird dabei in Abhängigkeit der Anpassung des Durchmessers und der Höhe der Raste der Kupplung skaliert. Die Anpassung der Winkelgeschwindigkeit erfolgt in Abhängigkeit der Drehzahlverhältnisse. Die Skalierungsfaktoren (angegeben in Formel 13 und Formel 14) werden für die Berechnung der Leistungsgrößen (Fluss- und Potentialgrößen) am Prüfstand verwendet.

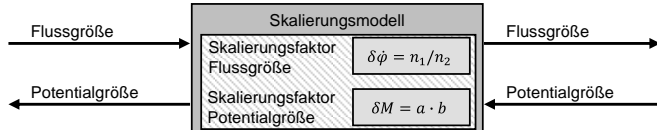


Abbildung 6.10: Skalierungsfaktoren zum Ausgleich der Größenstufe. Das Drehmoment M wird dabei in Abhängigkeit des Verhältnisse der Durchmesser und der Höhe der Rasten der Kupplung skaliert. Die Anpassung der Winkelgeschwindigkeit erfolgt in Abhängigkeit der Drehzahlverhältnisse.

6.3.3 Verifikation der Skalierungsfaktoren am sCiL-Prüfstand

Die Verifikation der Skalierungsfaktoren erfolgt durch Versuche am sCiL-Prüfstand (siehe Abbildung 6.6). Es wurde das Systemverhalten beider Größenstufen experimentell ermittelt und hinsichtlich der Höhe des Kupplungsmoments verglichen. Die Auswertung erfolgt anhand des Zeitverlaufs (siehe Abbildung 6.11) und der charakteristischen Punkte im Drehmoment der skalierten Versuche.

Die zeitlichen Verläufe des Drehmoments für die beiden Messstellen Sensor 1 und Sensor 2 sind in Abbildung 6.11 dargestellt. Die Parameter der Auswertung sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

Ohne die Skalierung sind die Drehmomentverläufe an beiden Messstellen (Sensor 1 und Sensor 2, siehe Abbildung 6.11) ähnlich, es erfolgt keine Skalierung der Leistungsgrößen. Geringe Unterschiede der Drehmomentverläufe ergeben sich durch den Einfluss der verwendeten Motoren und der implementierten Regelung. In skalierten Untersuchungen wird die übertragene Leistung verrechnet, um die Unterschiede der betrachteten Teilsysteme auszugleichen. Dazu erfolgt eine Anpassung des Drehmoments und der Drehzahl an abweichende Kupplungsparameter und Übersetzungsverhältnisse.

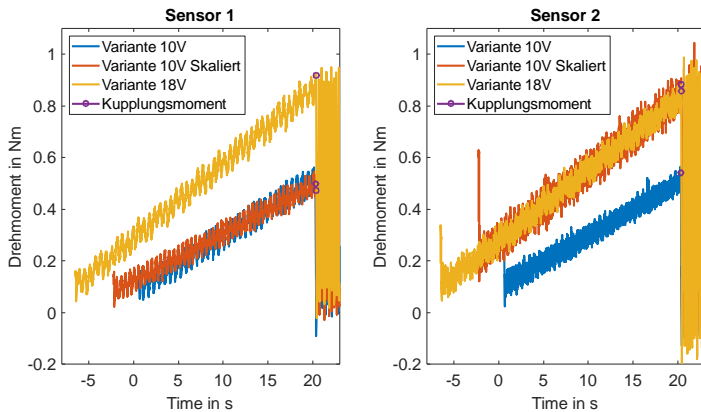


Abbildung 6.11: Drehmomentkurven der Kupplungsauslösung für zwei verschiedene Größenstufe der Kupplung (Variante 10 V und Variante 18 V) im Vergleich zur skalierten Kupplung (Variante 10 V Skaliert).

In Tabelle 6.3 sind die Mittelwerte der Kupplungsmomente der drei Versuchsreihen mit jeweils 21 Wiederholungen dargestellt.

Tabelle 6.3: Maximales Drehmoment der Kupplungsauslösung für zwei verschiedene Kupplungsgrößen im Vergleich zum skalierten Kupplungsdrehmoment. Sensor 1 ist neben der Kupplung angebracht. Sensor 2 befindet sich im Restsystem. Dargestellt sind die Mittelwerte aus 21 Versuchen.

| | Kupplungsmoment Sensor 1 (SiD) | Kupplungsmoment Sensor 2 (RS): |
|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Referenz 10 V | 0.628 Nm | 0.653 Nm |
| Skaliert 10 V | 0.655 Nm | 1.019 Nm |
| Referenz 18 V | 1.048 Nm | 1.032 Nm |

Ohne die Skalierung sind die maximalen Drehmomente bei Kupplungsauslösung an beiden Messstellen (Sensor 1 und Sensor 2, Abbildung 6.12) nahezu gleich.

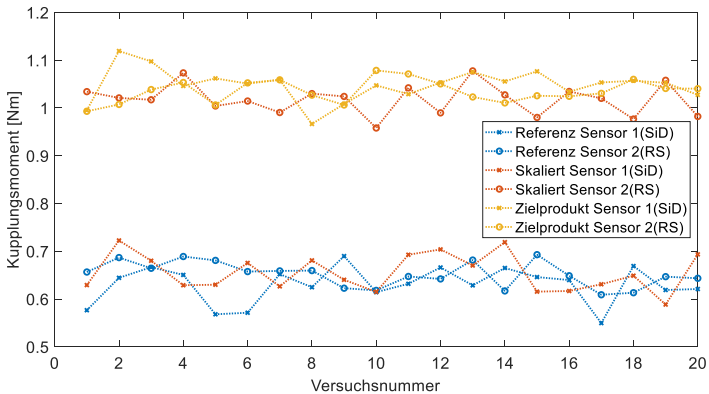


Abbildung 6.12: Kupplungsmomente der betrachteten Versuche. Sensor 1 ist direkt an der Kupplung (SiD) angebracht. Sensor 2 ermittelt das Drehmoment im Restsystem. Im skalierten Versuch ist das Kupplungsmoment bei Sensor 2 (RS) auf dem Niveau des Zielprodukts.

Durch die Skalierung konnte das Drehmoment für die skalierten Versuche angepasst werden. Die Verteilung der Kupplungsmomente für Sensor 1 und Sensor 2 ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Im Unterschied der Drehmomente für den skalierten Versuch ist die angepasste Leistung zu sehen (siehe Messpunkt Sensor 1). Das Kupplungsmoment wurde auf das Niveau der größeren Kupplung skaliert.

Abbildung 6.13 zeigt die Verteilung der Kupplungsmomente im Vergleich der Kupplungsstufen und der Skalierung.

Abbildung 6.13 zeigt die Verteilung der Kupplungsmomente im unskalierten (Referenz 10 V und Zielprodukt 18 V) und skalierten Versuch (10 V Skaliert). Als Datenbasis dienen 21 Versuchswiederholungen. Abbildung 5.13 zeigt, dass im unskalierten Fall für die beiden Messstellen das Kupplungsmoment ähnlich große Werte annimmt. Die Abweichung der Kupplungsmomente zwischen den beiden Sensorpositionen ist klein und für das Untersuchungsziel unkritisch. Ein höheres Auslösemoment führt aufgrund des konstanten Lastfaktors im Lastmoment direkt zu einem späteren Auslösezeitpunkt. Die auftretenden Streuungen können durch den Einfluss der Motorregelung innerhalb der Koppelsysteme erklärt werden (Gwosch et al., 2019).

Durch die Skalierung wird auch die Drehzahl in der virtuellen Kopplung angepasst, um die Unterschiede des Übersetzungsverhältnisses auszugleichen. Für die skalierte Kupplung wird die Drehzahl angepasst um, im Restsystem eine ähnliche Anregung durch die Kupplungsauslösungen zu erzielen.

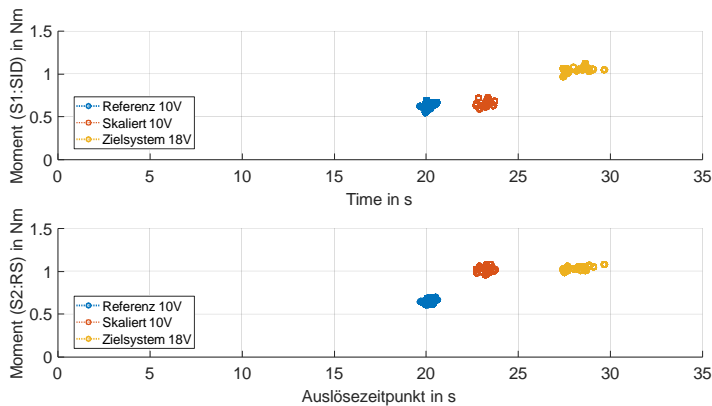


Abbildung 6.13: Verteilung des Kupplungsdrehmoments im unskalierten (Referenz 10 V und Zielprodukt 18 V) und skalierten Versuch (10 V Skaliert). Die Verteilung zeigt die maximalen Kupplungsmomente an beiden Sensoren (Last und SID) der Skalierung. Aufgetragen sind die Kupplungsmomente über dem Auslösezeitpunkt. Jede Punktewolke enthält die Ergebnisse aus 21 Versuchen.

Der Zeitverlauf und die charakteristischen Punkte der Auslösefrequenz sind in Abbildung 6.14 dargestellt. Im Zeitverlauf zeigt sich, dass die Auslösefrequenz für die Variante 10 V Skaliert mit der Variante 18 V übereinstimmt.

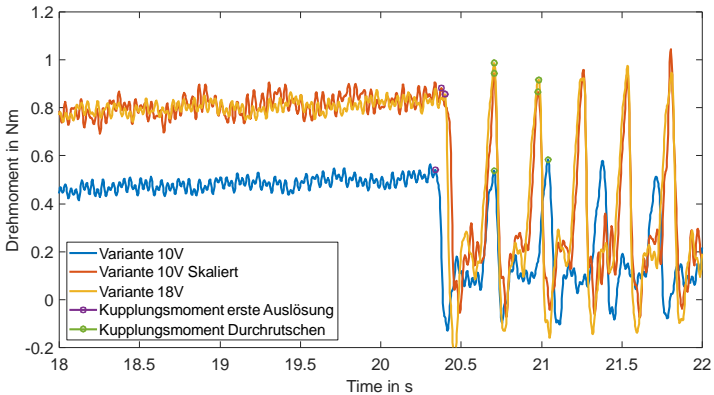


Abbildung 6.14: Bewertung der Anregung durch die Kupplungsauslösungen zur Auswertung der Auslösefrequenz.

Abbildung 6.15 zeigt die Verteilung der Auslösefrequenz der betrachteten Versuchsreihen. Jede Verteilung enthält die Ergebnisse von 21 Versuchen. Das Diagramm (Abbildung 6.15) zeigt, dass im unskalierten Fall die Frequenz der Kupplungsauslösungen von der Referenz abweicht. Durch die Skalierung konnte die Auslösefrequenz angepasst werden und ist damit auf einem vergleichbaren Wert des Zielprodukts.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Anpassung der rotatorischen Leistungsgrößen zum Ausgleich der unterschiedlichen Kupplungseigenschaften für skalierte Versuche erfolgen kann. Ein Skalierungsmodell kann in der virtuellen Kopplung die rotatorischen Leistungsgrößen (Drehmoment und Drehzahl) an die Unterschiede der Teilsysteme anpassen. Die Skalierung ermöglicht eine Anpassung der Drehzahlen und damit eine Berücksichtigung von unterschiedlichen Übersetzungsverhältnissen. Die Hypothese, welche in diesem Kapitel aufgestellt wurde, kann damit bestätigt werden.

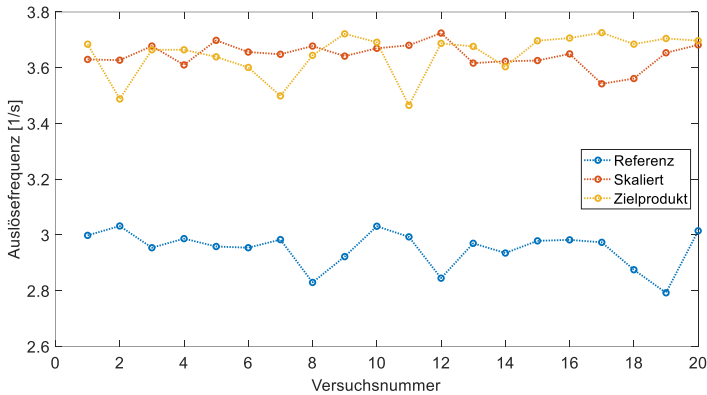


Abbildung 6.15: Verteilung der Auslösefrequenz der Untersuchung. Durch die Skalierung der Drehzahl konnte die Auslösefrequenz der Kupplung angepasst werden und entspricht jetzt dem Zielprodukt. Die Anregung durch die Kupplungsauslösung ist dadurch im skalierten System vergleichbar zum Zielprodukt.

6.4 Diskussion zur Skalierung bezüglich Baugröße

Ziel dieses Kapitels war die Berücksichtigung der Größenunterschiede in der Skalierung von Überlastkupplungen auf dem sCiL-Prüfstand. In dieser Studie wurde der Einfluss von zwei Parametern der Überlastkupplung zwischen zusammengesetzten Systemen analysiert und durch die Skalierung kompensiert, um skalierte Komponententests unter Berücksichtigung des restlichen Systems zu ermöglichen.

Die Ergebnisse zeigen einen Einfluss der unterschiedlichen Größenstufen auf die Funktion der Überlastkupplung und des Gesamtsystems. Die abgeleitete Skalierung ermöglicht eine Anpassung der Auslösefrequenz der Kupplung durch die Berücksichtigung der abweichenden Übersetzungsverhältnisse.

Die beiden betrachteten Parameter beeinflussen das Funktionsverhalten der Kupplung hinsichtlich der Auslösefrequenz und des Kupplungsmoments. Um die Modellunterschiede in der Skalierung berücksichtigen zu können, ist eine Anpassung der Leistungsgrößen von Drehmoment und Drehzahl notwendig. Der Skalierungsfaktor des Drehmoments hängt vom Durchmesser der verwendeten Kupplung ab. Der

Skalierungsfaktor der Drehzahl bestimmt sich aus den Übersetzungsverhältnissen. Die weiteren relevanten Parameter ermöglichen keine vollständige Ähnlichkeit. Die Abweichungen der Bewertungsgrößen von Kupplungsmoment und Auslösefrequenz können als gering betrachtet werden.

Das skalierte Versuchsmuster kann so an unterschiedliche Übersetzungsverhältnisse angepasst werden. Damit können Einflüsse, wie das Übersetzungsverhältnis der Getriebestufe früh untersucht werden.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse sind auf den in dieser Untersuchung verwendeten sCiL-Aufbau beschränkt. So wurde für diese Untersuchung die Anzahl an zusätzlichen Teilsystemen reduziert. Eventuell ergeben sich durch zusätzliche Teilsysteme weitere Herausforderungen, beispielsweise bei Nichtlinearitäten oder bei zusätzlicher Schwingungsanregung in einem der interagierenden Teilsysteme. Diese weiteren Herausforderungen sind in weiteren Experimenten zu untersuchen. Der sCiL-Prüfstand bietet mit der Möglichkeit, weitere Teilsysteme im Gesamtzusammenhang zu untersuchen, die Grundlage, diese Herausforderungen anzugehen.

Die als relevant erachteten Parameter erlauben keine vollständige Ähnlichkeit. Konflikte ergeben sich hinsichtlich der Trägheit der Komponenten und der resultierenden Winkelbeschleunigung. Es ergibt sich somit ein Kompromiss zwischen Ergebnisqualität und der möglichen Skalierung. Weitere Untersuchungen können dazu beitragen, weitere Einflüsse in der Skalierung zu berücksichtigen und dadurch die Aussagequalität der skalierten Untersuchungen zu verbessern.

Insbesondere Änderungen in den Parametern der Aktoren, der virtuellen Kupplung und der verwendeten Kupplung können zu abweichenden Ergebnissen führen. Statische Effekte wurden nicht berücksichtigt, ebenso wenig wie mechanische Belastungen und die induzierte Spannung. Die skalierten Untersuchungen können für separate Bewertung der Belastungen wichtige Eingangsgrößen liefern, um bspw. FEM-Simulationen zu unterstützen. Bei geänderten Randbedingungen ist eine Bewertung der Relevanzliste und der Skalierungsgesetze erforderlich.

Die Ergebnisse zeigen, dass zwei abweichende Parameter der skalierten Kupplung in der Skalierung berücksichtigt werden können. Damit sind skalierte Komponententests unter Berücksichtigung des restlichen Systems möglich, um das Verhalten des Folgeentwurfs abzubilden. Die Skalierung der Leistungsgrößen von Drehmoment und Drehzahl ermöglicht die Anpassung an das Verhalten der groß dimensionierten Kupplung, obwohl eine klein dimensionierte Kupplung am Prüfstand genutzt wurde. Durch die frühzeitige Bewertung lassen sich aus den Experimenten Anforderungen an das Teilsystem des Folgenentwurfs ableiten (vgl. Abbildung 4.1). Solche Tests eignen sich auch für andere Komponenten in rotierenden Antriebssträngen, sofern

der Fokus auf der Untersuchung des Funktionsverhaltens im Zusammenspiel mit dem Gesamtsystem liegt.

6.5 Fazit und Beantwortung der Forschungsfrage

Die Untersuchung bezüglich unterschiedlicher Kupplungsstufen eines Akkubohrschraubers zeigt die Einsatzmöglichkeit des Antriebsstrangprüfstandes für eine vorzuzogene Absicherung von Überlastkupplungen.

Berücksichtigung der Modellunterschiede in der Skalierung

In der gezeigten Untersuchung wurden zwei Parameter der Skalierung der Kupplung berücksichtigt. Es erfolgte eine Ableitung der Skalierungsvorschriften, um Unterschiede der Baugröße und des Übersetzungsverhältnisses zu berücksichtigen. Die Untersuchung zeigt, dass Einflüsse der Teilsysteme mit direkten Auswirkungen auf die Bewertungsgröße betrachtet werden müssen. In der Untersuchung der Kupplung des Akkubohrschraubers wurde gezeigt, dass die Parameter der Baugröße und des Übersetzungsverhältnisses Einfluss auf die Funktionsweise haben und so in der Absicherung zu berücksichtigen sind. Durch die Berücksichtigung dieser Modellunterschiede konnte die Absicherung dahingehend verbessert werden. Daraus leitet sich ab, dass Parameter und Einflüsse von Teilsystemen mit Auswirkung auf die Funktionsweise in der Skalierung zu berücksichtigen sind. Die relevanten Parameter und Einflüsse leiten sich aus dem Untersuchungsziel (vgl. Abbildung 4.1) der Absicherung ab. Das Untersuchungsziel hängt dabei von den Produktanforderungen und den Entwicklungszielen ab.

Durch die Einbindung von verfügbaren Referenzsystemen, in diesem Fall aus vorangegangenen Produktgenerationen, kann die Funktionsweise einer zukünftigen Kupplung als Folgeentwurf mit angepasster Größenstufe abgeschätzt werden, bevor dafür Prototypen oder Komponenten verfügbar sind. Die Untersuchungen ermöglichen eine Bewertung der Funktionsfähigkeit und Abschätzung der Produkteignung der Kupplung durch die Nutzung von frühen Referenzsystemen und die Anpassung durch ein Skalierungsmodell.

Die Ergebnisse zeigen, dass die rotatorischen Leistungsgrößen mit Hilfe der Skalierungsfaktoren, die aus einer Ähnlichkeitsanalyse gewonnen werden, verrechnet werden können. Die Skalierung erlaubt die Anpassung an das Verhalten des Folgeentwurfs, obwohl am sCiL-Antriebsstrangprüfstand ein skaliertes Referenzsystem eingesetzt ist. Damit können in frühen Entwicklungsphasen, in denen noch keine

Prototypen des Folgeentwurfs vorliegen, bereits Zielgrößen für die weitere Entwicklung ermittelt werden. Zusätzlich können frühe Konzeptüberprüfungen durchgeführt werden und Randbedingungen für Simulationsuntersuchungen ermittelt werden.

In einer weiterführenden Untersuchung⁶ (Steck, Gwosch et al., 2021) wurde der Einfluss von Masseneffekten auf die Anpassung von Leistungsgrößen zwischen miteinander verbundenen Systemen analysiert und durch virtuelle Trägheiten kompensiert. Am Beispiel einer drehmomentbegrenzenden Kupplung aus einem Flugzeugaktuator wurde, die abweichende Trägheit durch die Integration der virtuellen Trägheit innerhalb der Skalierung berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine virtuelle Trägheit zum Skalierungsmodell hinzugefügt werden kann, um massebasierte Effekte im Verhalten abzubilden. Dies ermöglicht das gleichzeitige Testen von Antriebsstrangkomponenten unter Berücksichtigung abweichender Trägheit. (Steck, Gwosch et al., 2021)

Liegen in Untersuchungen zusätzlich Unterschiede der Trägheit der Komponenten vor, können diese Unterschiede über die in Steck et al. (2021) vorgestellten virtuellen Trägheiten berücksichtigt werden

Koppelsysteme zur Anpassung der Leistungsgrößen

Wichtig für die Einbindung der Skalierungsfaktoren sind passende Koppelsysteme. Wichtig sind dabei Koppelsysteme, die eine Untersuchung der relevanten Effekte bezüglich der Produktanforderungen ermöglichen. Die Dynamik der Koppelsysteme sollte dabei besonders betrachtet werden, um eine Übertragung und Anpassung der relevanten Effekte über die virtuelle Domäne ohne größere Verluste zu ermöglichen. Dazu ist es wichtig, dass die Dynamik der Koppelsysteme größer ist als der Dynamikbereich der betrachteten Effekte. Dynamische Anregungen, die nicht über die Koppelsysteme übertragen werden, stehen als Wechselwirkungen für die interagierenden Teilsysteme nicht zur Verfügung. Für die Auswahl der Koppelsysteme kann für die Abschätzung der notwendigen Dynamik auf Systemwissen oder auf Untersuchungen mit Referenzsystemen zurückgegriffen werden.

Die Anforderungen der Leistungsskalierung hängen direkt von den Eigenschaften der Koppelsysteme ab. In rotorischen Untersuchungen kann in den Koppelsystemen über Sensor-Aktor-Systeme eine Anpassung von Drehmoment und Drehzahl erfolgen. Wichtig ist, dass die Skalierung die relevanten Einflüsse berücksichtigt.

⁶ Die weiterführende Untersuchung ist im Rahmen einer Mitautorenschaft Steck, Gwosch und Matthiesen (2021) entstanden und wird hier nur zusammenfassend vorgestellt.

Über die Auswahl der relevanten Parameter können die berücksichtigten Einflüsse festgelegt werden.

Störgrößen ergeben sich durch den Einfluss der Regelung innerhalb der Koppelsysteme und durch die Verzögerung des Regelungssystems. Beispielsweise kann eine veränderte Temperatur störenden Einfluss auf die Funktionsweise der Aktoren der Koppelsysteme haben. Ebenso kann es durch zusätzliche mechanische Komponenten, wie Adapter-Bauteile und Verbindungswellen, zu einer veränderten Trägheit des betrachteten Antriebsstrangs kommen. Diese Einflüsse sind für Untersuchungen möglichst zu minimieren oder konstant zu halten.

Die virtuelle Kopplung bietet die Möglichkeit, direkt Einfluss auf die Leistungsgrößen zu nehmen, darüber hinaus können über virtuelle Modelle zusätzliche Eigenschaften oder nicht physisch verfügbare Teilsysteme eingebunden werden.

Die erreichte partielle Ähnlichkeit und die abgeleiteten Skalierungsfaktoren zeigen eine gute Nutzbarkeit für skalierte Untersuchungen. Durch das aufgezeigte Vorgehen zur Ableitung der Skalierungsfaktoren mithilfe einer Dimensionsanalyse (siehe Abbildung 5.8) können für abweichende Beispiele und veränderte Teilsysteme entsprechende Untersuchungen vorbereitet werden (siehe hierzu übertragbarer Beitrag in Kapitel 8).

Im Rahmen dieser Untersuchung konnte eine Einsatzmöglichkeit des scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstands exemplarisch für die vorgezogene Absicherung von Entwicklungsentscheidungen hinsichtlich der Baugröße bei Überlastkupplungen aufgezeigt werden.

Mit der in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchung konnte die zweite Teilforschungsfrage

Welche Einflüsse der Teilsysteme müssen in den Skalierungsfaktoren berücksichtigt werden, um eine Anpassung der mechanischen Leistungsgrößen an unterschiedliche Größenstufen innerhalb des Antriebsstrangs zu ermöglichen?

beantwortet werden.

7 Geometrieuntersuchungen einer skalierten Überlastkupplung eines Akkuboehrschraubers

In diesem Kapitel wird die Skalierung hinsichtlich Untersuchungsmöglichkeiten zur Ableitung von Gestaltparametern betrachtet, um skalierte Geometrieuntersuchungen unter Berücksichtigung des restlichen Systems zu ermöglichen. Dazu wird eine beispielhafte Anpassung der Geometrie der Überlastkupplung und deren skalierte Absicherung vorgestellt. Dabei ist das Entwicklungsziel die Beeinflussung der Auslösecharakteristik durch Anpassung des Kupplungsringes im Akkuboehrschrauber. Zur Erreichung des Entwicklungsziels werden unterschiedliche der Gestaltparameter durch skalierte Untersuchungen bewertet.

In diesem Kapitel wird die Teilforschungsfrage 3 (TF 3) beantwortet:

Wie gut können durch skalierte Versuche mit einer Leistungsskalierung Bauteilvarianten trotz unterschiedlicher Größenstufen hinsichtlich der Funktionserfüllung untersucht werden?

Dieses Kapitel basiert auf den nachfolgenden Veröffentlichungen, in denen Inhalte dieses Kapitels durch den Autor im Rahmen einer Mitautorenschaft publiziert sind:

- Steck, M., Matthiesen, S & Gwosch, T. (2022): „Functional Investigation of Geometrically Scaled Drive Components by X-in-the-Loop Testing with Scaled Prototypes“ (siehe Steck et al., 2022)

Abbildungen und Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung oder in übersetzter Form aus den Veröffentlichungen übernommen. Sie werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.

7.1 Zielsetzung und Hypothese

Ziel der in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchung ist die skalierte Bewertung von zwei prototypisch umgesetzten Bauteilvarianten des Kupplungsringes hinsichtlich der Auslösecharakteristik der Überlastkupplung auf dem sCiL-Prüfstand. Zur Bewertung der Auslösecharakteristik werden Kennwerte im Drehmomentverlauf der Ausgangswelle betrachtet. Die Einbindung der skalierten Bauteilvarianten erfolgt

über virtuelle Koppelsysteme und eine Skalierung, um skalierte Komponententests unter Berücksichtigung des restlichen Systems zu ermöglichen.

Es wird folgende Hypothese formuliert:

Die Skalierung ermöglicht die Geometrieuntersuchungen von skalierten Komponenten. Durch die Einbindung der Entwicklungsvarianten in den sCiL-Prüfstand sind früh skalierte Geometrieuntersuchungen unter Berücksichtigung des restlichen Systems möglich.

Am Beispiel einer Überlastkupplung werden die unterschiedliche Bauteilvarianten in skalierten Komponententests unter Berücksichtigung des restlichen Systems untersucht. Entwicklungsziel dieses Beispiels ist eine Anpassung des Kupplungsverhalten durch eine Anpassung der Geometrie. Die skalierte Absicherung findet auf dem sCiL-Prüfstand statt. Es wird für beide Geometrievarianten das identische Skalierungsmodell verwendet. Damit wird überprüft, ob sich mit einem entwickelten Skalierungsmodell in skalierten Untersuchungen Bauteilvarianten untersuchen lassen.

7.2 Untersuchungsmethode und Versuchsaufbau

In diesem Kapitel werden der Versuchsaufbau und die Untersuchungsmethode beschrieben, um skalierte Komponententests unter Berücksichtigung des restlichen Systems durchzuführen. Zunächst werden die verwendeten Bauteilvarianten der Überlastkupplung beschrieben. Anschließend wird die Versuchsreihe zur Durchführung der skalierten Komponententests auf einem XiL-Prüfstand aufgezeigt.

7.2.1 Bauteilvarianten der Überlastkupplung

In dieser Untersuchung wird eine Kupplung aus einem Akkubohrschrauber (siehe Kapitel 2.3.3) verwendet, um den Einfluss der Geometrie auf das Auslöseverhalten in skalierten Untersuchungen zu bewerten.

Zur Überprüfung der Skalierung bei Geometrievarianten werden zwei Varianten des Kupplungsringes auf dem sCiL-Prüfstand untersucht. Die Varianten unterscheiden sich in der Laufbahngeometrie (vgl. Abbildung 7.1). Als Referenz dient dabei Variante 1, diese entspricht dabei annähernd der Originalgeometrie des Serienbauteils. Variante 2 weist eine veränderte Geometrie auf und enthält eine Taschengometrie.

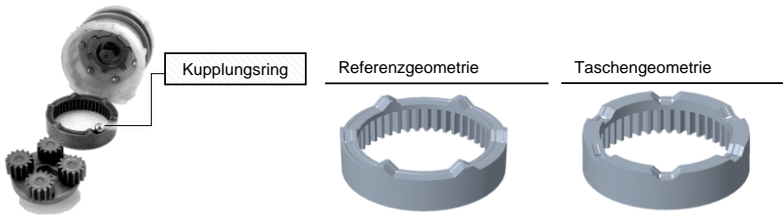


Abbildung 7.1: Unterschiede der Laufbahngeometrie für zwei Bauteilvarianten zur Untersuchung in TF 3.

Gwosch (2019) führte vergleichbare Untersuchungen zur Bewertung von Bauteilvarianten durch. Es zeigt sich, dass durch eine Änderung der Laufbahngeometrie die Auslösecharakteristik der Überlastkupplung verändert werden kann. Besonders hervorzuheben ist, dass bei vergleichbarem Kupplungsmomentniveau das Reibmoment bei der Taschengeometrie anders als bei der Referenzgeometrie ausfällt.

Eine Betrachtung des theoretischen Drehmomentverlaufs bei aktiver Überlastkupplung ist auf Basis der Untersuchungen aus Kapitel 6.3 und der Simulationsergebnisse aus Steck et al. (2021) als qualitativer Verlauf in Abbildung 7.2 dargestellt.

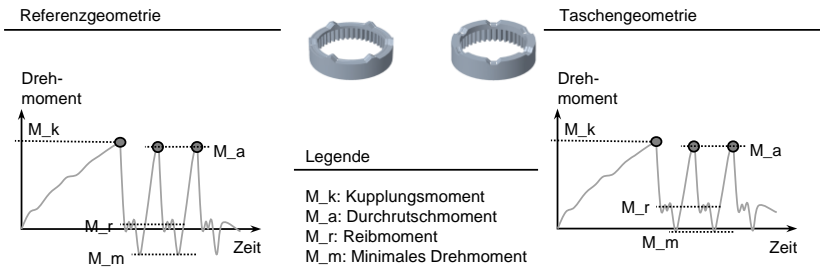


Abbildung 7.2: Qualitativer Verlauf des Drehmoments bei aktiver Überlastkupplung für zwei betrachteten Geometrievarianten. Die Drehmomentkennwerte sind zur Charakterisierung der Varianten eingezeichnet. (Angepasste Darstellung aus Gwosch, 2019, S. 148)

Beschreibung des qualitativen Verlaufs basierend auf Untersuchungen von Gwosch (2019):

Überschreitet das anliegende Moment das Kupplungsmoment der Referenzgeometrie, so bewegen sich die Rastkugeln über die Mitnehmer des Kupplungsringes, anschließend fällt das Drehmoment stark ab. Die Überlastkupplung löst dabei aus und daraufhin beginnt sich das Hohlrad der Planetenstufe zu drehen (siehe Abbildung 2.11). Anschließend werden die Rastkugeln über die Andruckfedern auf die tiefere Laufbahn des Kupplungsringes gedrückt, es wird nur ein reduziertes Drehmoment (Reibmoment) übertragen, das sich durch die Reibung begründet (vgl. Sequenzanalyse aus Matthiesen, Gwosch, Mangold und Grauberger et al. (2017) und Abbildung 5.5). Durch sich wiederholenden Kontakt zwischen Rastkugeln und dem Mitnehmer des Kupplungsringes kommt es zu weiteren Drehmomentanstiegen (Durchrutschmoment). Je nach geometrischen Eigenschaften und dynamischem Verhalten des Triebstrangs können unterschiedlich starke Drehmomentschwingungen nach dem ersten Auslösen der Kupplung auftreten. (Gwosch, 2019, S. 148)

Für die Taschengeometrie zeigt sich ein ähnlicher Drehmomentverlauf, mit dem Unterschied, dass sich ein erhöhtes Reibmoment im Vergleich zur Referenzgeometrie zeigt. Diese Unterschiede begründen sich durch die geänderte Laufbahngeometrie. (Gwosch, 2019, S. 149)

Bei Gwosch (2019) wurden die Bauteilvarianten aus einer Aluminiumlegierung (AlSi10Mg) durch ein additives Fertigungsverfahren hergestellt. Zusätzlich erfolgte eine spanende Nachbearbeitung der Laufbahn. Für Untersuchungen mit Bauteilvarianten aus Kunststoff liegen in skalierten Untersuchungen keine Veröffentlichungen vor. Aufgrund von Fertigungseinschränkungen zur Herstellung der Bauteilvarianten werden in dieser Forschungsarbeit additiv hergestellte Bauteile aus Kunststoff eingesetzt. Um den Einfluss der Geometrievariation untersuchen zu können, werden beide Geometrievarianten mit dem gleichen Fertigungsverfahren sowie aus dem gleichen Material hergestellt. Beide Bauteilvarianten des Kupplungsringes sind aus Photopolymer¹ (Stratasys, 2021b) durch ein additives Fertigungsverfahren² hergestellt. Ein Vergleich hinsichtlich unterschiedlicher Herstellungsverfahren und Materialeigenschaften ist nicht Teil dieser Untersuchung. Die Laufbahn der Rastkugeln ist beim additiven Druck nach oben ausgerichtet, um eine glatte Oberfläche zu realisieren. Die Geometrie der Kupplungsringe wurde vor der Untersuchung hinsichtlich der Gesamthöhe vermessen und dokumentiert. Die Ergebnisse der Geometrieermessung können im Anhang Tabelle A.1 entnommen werden.

¹ VeroWhitePlus des Herstellers Stratasys. Materialeigenschaften sind in Stratasys (2021b) angegeben.

² PolyJet 3D-Drucker von Stratasys: PolyJet baut Teile additiv auf, indem es Schichten von flüssigem Photopolymer mit 27 Mikrometer Dicke Schicht für Schicht ausstößt, während ein UV-Licht gleichzeitig aushärtet (vgl. Stratasys (2021a))

Die beiden in dieser Untersuchung genutzten Kupplungsringe sind in Abbildung 7.1 dargestellt. Variante 1 entspricht dabei annähernd der Originalgeometrie des Serienbauteils und dient als Referenz. Variante 2 enthält Taschen, in denen sich die Rastkugeln im nicht aktiven Zustand der Überlastkupplung befinden.

7.2.2 Versuchsaufbau

Die Untersuchung findet am scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstand (sCiL-Prüfstand) mit dem in Abbildung 7.3 dargestellten Untersuchungssetup statt. Das Untersuchungssetup entspricht dem in Kapitel 6.2 eingesetzten Setup zur Untersuchung der Größenstufen der Kupplung. Die Bauteilvarianten des Kupplungsringes können auf dem Prüfstand (Abbildung 7.4) in die Überlastkupplung eingesetzt werden.

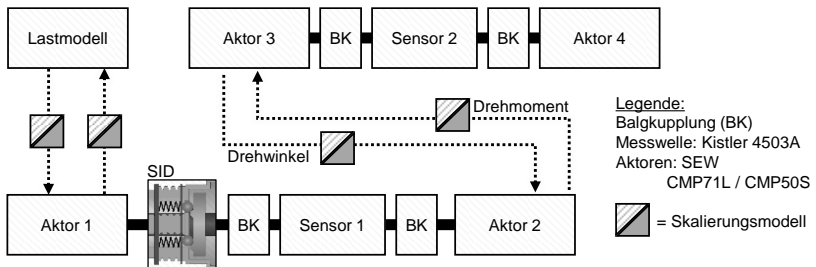


Abbildung 7.3: Untersuchungssetup für die Variantenuntersuchung der Überlastkupplung in skalierten Prüfstandsuntersuchungen (schematische Darstellung). Das Untersuchungssetup entspricht dem in Kapitel 6.2 eingesetzten Setup.

Die Untersuchungen werden mit dem in Kapitel 6.2.2 beschriebenen generischen Lastmodell durchgeführt. Als Vorgabegröße wird die Drehzahl der Antriebswelle genutzt, welche nach einer Hochlaufphase auf einem konstanten Wert von 100 Umdrehungen pro Minute gehalten wird.

Diese Untersuchung wird exemplarisch am scaled-Components-in-the-Loop (sCiL)-Prüfstand durchgeführt. Das umgesetzte Untersuchungssetup entspricht dem Aufbau aus Kapitel 6 und ist in Abbildung 7.4 dargestellt.

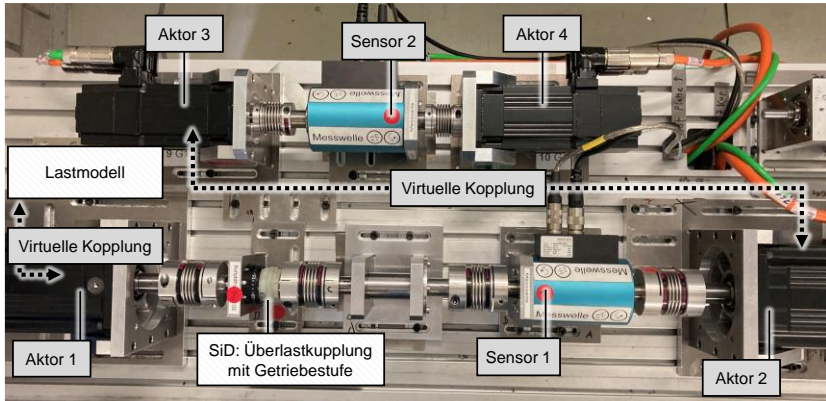


Abbildung 7.4: sCiL-Prüfstand zur Durchführung der Verifikation der skalierten Untersuchung. Der sCiL-Prüfstand enthält die mechanischen Komponenten des Antriebsstrangs eines Akkuboehrschraubers. Die virtuelle Kopplung ist zwischen Aktor 2 und Aktor 3 sowie zwischen Aktor 1 und virtuellem Lastmodell im Antriebsstrang integriert. Das Untersuchungssetup entspricht dem in Kapitel 6.2 eingesetzten Setup.

7.2.3 Versuchsdurchführung

Zur Beantwortung der Forschungsfrage werden vier Versuchsreihen durchgeführt und hinsichtlich der Auslösecharakteristik verglichen:

- 1) Skalierter Versuch mit Referenzgeometrie der Größenstufe 10 V
- 2) Skalierter Versuch mit Taschengeometrie der Größenstufe 10 V
- 3) Versuch mit Referenzgeometrie des Folgeentwurfs in Größenstufe 18 V
- 4) Versuch mit Taschengeometrie des Folgeentwurfs in Größenstufe 18 V

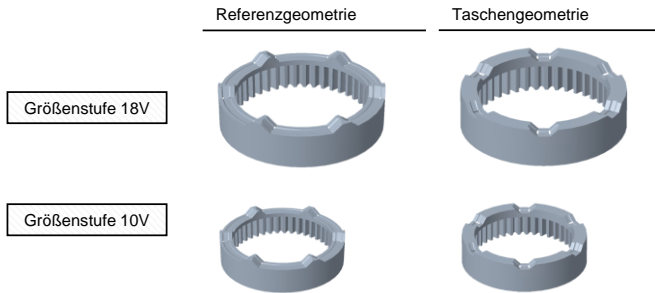


Abbildung 7.5: Komponenten zur Überprüfung der Hypothese. Die Versuchsreihen unterscheiden sich hinsichtlich der eingesetzten Entwicklungsvariante.

Die Versuchsreihen unterscheiden sich hinsichtlich der eingesetzten Entwicklungsvariante und durch die genutzte Skalierung zur Anpassung der Größenstufe. Das Skalierungsmodell ist identisch zu dem in Kapitel 6 (vgl. Teilforschungsfrage 2) genutzten Skalierungsmodell. Die Einbindung der Skalierungsmodelle erfolgt innerhalb der virtuellen Kopplung zwischen den betrachteten Teilsystemen. Die Koppelsysteme sind mit Sensor-Aktor-Systemen und einem zentralen oder dezentralen Steuerungssystem realisiert.

Als Bewertungsgrößen werden das Kupplungsmoment sowie das Reibmoment nach dem ersten Drehmomentabfall betrachtet. Die Kennwerte sind in Abbildung 7.2 eingezeichnet. Als Messgröße wird das gefilterte³ Drehmoment an Messwelle 2 in Abbildung 7.3 gewählt. Die Versuchswiederholung beträgt je Variante 21.

7.3 Ergebnis und Vergleich der Geometrievarianten

Die Ergebnisse zum Vergleich der skalierten Geometrievarianten sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst. Das verwendete Skalierungsmodell ist identisch zu dem in Kapitel 6 (vgl. Teilforschungsfrage 2) genutzten Skalierungsmodell. Es zeigt sich, dass die Teilsysteme der Referenzgeometrie und Taschengeometrie einen Unterschied

³ Die Filterung erfolgt mit einem Tiefpassfilter 5. Ordnung (100 Hz Grenzfrequenz).

bezüglich des Reibmoments (siehe Tabelle 7.1) aufweisen. Tabelle 7.1 zeigt zusätzlich die Mittelwerte der Kupplungsmomente der beiden Geometrievarianten für Sensor 2.

Tabelle 7.1: Kenngrößen zur Bewertung der Geometrievarianten. Mittelwerte des Kupplungsmoments und Reibmoments wurden aus jeweils 21 Versuchswiederholungen ermittelt.

| Kennwert | | 10 V | 10 V Skaliert | 18 V |
|------------------------------|-----------------|----------|---------------|----------|
| Kupplungs- moment | Referenz | 0.554 Nm | 0.838 Nm | 0.865 Nm |
| | Tasche | 0.518 Nm | 0.787 Nm | 0.834 Nm |
| Kennwert | | 10 V | 10 V Skaliert | 18 V |
| Reibmoment | Referenz | 0.457 Nm | 0.697 Nm | 0.729 Nm |
| | Tasche | 0.194 Nm | 0.329 Nm | 0.110 Nm |

Für die Taschengeometrie liegt das Reibmoment jeweils niedriger (Abbildung 7.6). Bei beiden Geometrievarianten sind vereinzelt Ausreißer (siehe Abbildung 7.6) zu erkennen.

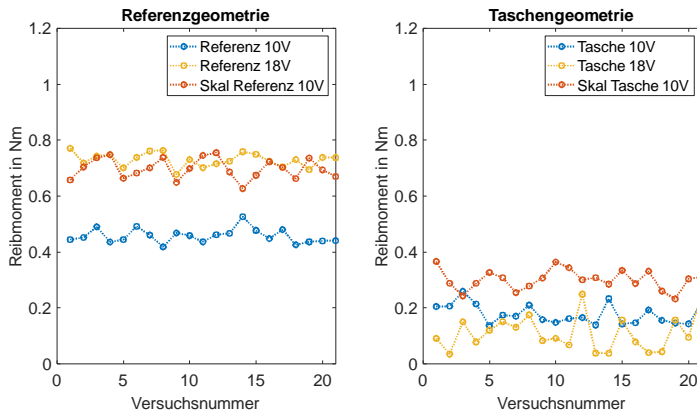


Abbildung 7.6: Reibmoment der beiden Gestaltvarianten. Aufgetragen sind jeweils die Reibmomente über der Versuchsnummer für Sensor 2.

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Skalierung wurden auch die Kupplungsmomente ausgewertet. Die Kupplungsmomente der Referenzgeometrie und Taschengeometrie sind in Abbildung 7.7 dargestellt. Der Mittelwert der Kupplungsmomente liegt für die beiden Geometrievarianten auf einem vergleichbaren Niveau.

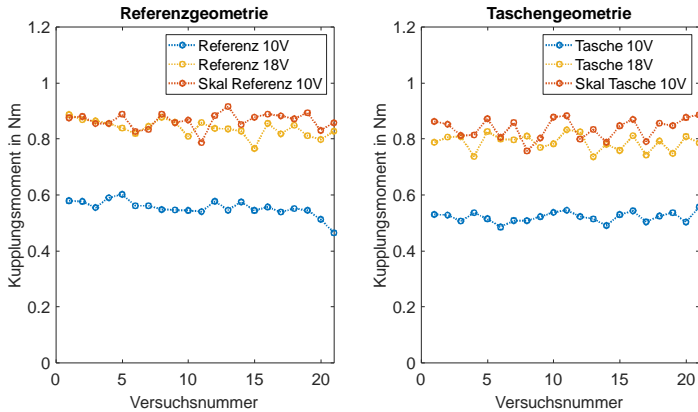


Abbildung 7.7: Vergleich der Kupplungsmomente zwischen Referenz- und Taschengeometrie für Sensor 2.

Durch die Skalierung kann der Einfluss der Geometrie auf das Reibmoment und das Kupplungsmoment untersucht werden. Die aus der Geometrieänderung resultierenden Anpassungen im Verhalten sind vergleichbar und ermöglichen eine frühe Absicherung.

Die eingangs formulierte Hypothese

Die Skalierung ermöglicht die Geometrieuntersuchungen von skalierten Komponenten. Durch die Einbindung der Entwicklungsvarianten in den sCiL-Prüfstand sind früh skalierte Geometrieuntersuchungen unter Berücksichtigung des restlichen Systems möglich.

soll in dieser Untersuchung überprüft werden.

Die Auswirkung der Geometrieänderung zeigt sich auch in den skalierten Untersuchungen. Für den Kennwert Reibmoment sind die Mittelwerte zwischen der Referenzgeometrie und der Taschengeometrie unterschiedlich. Eine Berücksichtigung

der konkreten Geometrieänderungen in der Skalierung ist nicht notwendig. Die Skalierung basiert auf den Modellunterschieden und den relevanten Parametern. Die Hypothese kann damit bestätigt werden.

Bei vergleichbarer Höhe des Kupplungsmoments fällt das Reibmoment bei der Tascengeometrie kleiner als bei der Referenzgeometrie aus. Durch die Änderung der Laufbahngeometrie kann die Auslösecharakteristik der Überlastkupplung verändert werden. Die Untersuchung ermöglicht die Ableitung des Reibmoments für die Überlastkupplung als Zielwert für weitere Entwicklungen.

Die Ergebnisse zeigen, dass unterschiedliche Bauteilvarianten in skalierten Komponententests unter Berücksichtigung des restlichen Systems hinsichtlich der berücksichtigten Effekte untersucht werden können. Ein Skalierungsmodell kann in der virtuellen Kopplung die rotatorischen Leistungsgrößen (Drehmoment und Drehzahl) an die Unterschiede der Teilsysteme anpassen und so vorgezogene Absicherung von Entwicklungsentscheidungen unterstützen.

7.4 Diskussion zur Skalierung bezüglich Geometrieänderung

Die Ergebnisse in dieser Untersuchung (siehe Kapitel 7.3) zeigen, wie Skalierungsmodelle die XiL-Untersuchung von Geometrievarianten für skalierte Bauteile unterstützen. Die Übereinstimmung zwischen skalierten Untersuchungen und nicht skalierten Untersuchungen ist für die Bewertungsgröße des Kupplungsmoments gut. In dem betrachteten Beispielsystem hängt das Kupplungsmoment direkt von der Geometrie ab. Eine Anpassung der Leistungsgrößen im Kupplungssystem über das Skalierungsmodell ist für verschiedene Geometrievarianten möglich. Unterschiede ergeben sich bei Bewertungsgrößen, die von zusätzlichen Einflüssen, wie der Reibung, abhängen. Für eine Bewertung der reibungsabhängigen Funktion sind Anpassungen am Skalierungsmodell notwendig.

Die skalierten Bauteilversuche zeigen eine Abweichung des Reibmoments der Tascengeometrie im Vergleich zur Referenzgeometrie. Das Reibmoment liegt hier deutlich unter dem Kupplungsmoment. Diese Unterschiede zeigen, dass nicht alle Effekte, die für diesen charakteristischen Punkt im Drehmomentverhalten verantwortlich sind, im Skalierungsmodell berücksichtigt werden. Aufgrund des relativ geringen Reibmoments können hier Effekte vorhanden sein, die für das Kupplungsmoment weniger bedeutend sind. Bei wechselnden Reibungsverhältnissen während der Drehbewegung ist es daher schwierig, die Reibungsverhältnisse im Skalierungsmodell abzubilden. Eine Bewertung in den frühen Phasen der Produktentwicklung

ist mit dem Skalierungsmodell dennoch möglich, wenn eine qualitative Untersuchung angestrebt wird. In skalierten Untersuchungen kann der Einfluss der Geometrieanpassung bereits abgeschätzt werden. Ist die Ableitung quantitativer Zielwerte für die Validierung notwendig, so müssen die entsprechenden Effekte bei der Skalierung berücksichtigt werden.

Um das Reibungsverhalten für die vorliegende Kupplung im Skalierungsmodell abzubilden, sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Reibungsverhältnisse in Abhängigkeit von den Werkstoffpaarungen und den lageabhängig wirksamen Oberflächenpaarungen zu analysieren. Die ermittelten Reibungsverhältnisse können dann in den Skalierungsmodellen mit bekannten Reibungsmodellen berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der vorgestellten Untersuchung einer skalierten Überlastkupplung eines Akkuboehrschraubers zeigen die Abhängigkeit der Drehmomentkennwerte von der Bauteilgeometrie des Kupplungsringes für zwei Geometrievarianten. Die Ergebnisse zeigen einen Einfluss der Geometrie im Reibmoment an der Ausgangswelle des Akkuboehrschrauber-Triebstrangs. Diese Ergebnisse decken sich mit den von Gwosch (2019) dargestellten Untersuchungsergebnissen. Die Skalierung ermöglicht auch Geometrieuntersuchungen in XiL-Prüfständen.

Die untersuchten Bauteilvarianten unterscheiden sich bezüglich des Materials und des Fertigungsverfahrens von den Serienbauteilen. Unterschiede ergeben sich hinsichtlich der Toleranzen und der Oberflächenrauheit und der mechanischen Eigenschaften. Ebenso unterscheiden sich aufgrund veränderter Dichte die Masse und dadurch auch die Bauteilträgheit. Die geänderte Bauteilträgheit kann die Schwingungen im Antriebsstrang beeinflussen. Dadurch kann es zu Abweichungen kommen, wenn die Erkenntnisse direkt auf das Serienbauteil übertragen werden. In weiteren Untersuchungen ist der Einfluss der Toleranzen und des Materials zu überprüfen. Die Bewertung des Drehmoments an der Antriebswelle ermöglicht die Bewertung der Sicherheitsfunktion der Kupplung und damit die Schutzwirkung für den Anwender.

Die inneren Systemzustände und Belastungen auf die Komponenten im Antriebsstrang des Akkuboehrschraubers können trotz gleichem Kupplungsmoment abweichen. Die Belastungen und Beanspruchungen der Komponenten sollten in weiteren Untersuchungen betrachtet werden. Eine Bewertung der anliegenden Belastungen ist durch die virtuelle Kopplung am sCiL-Prüfstand bereits jetzt zum Teil möglich. Es können damit die Systemzustände an den gewählten Schnittstellen detailliert erfasst werden.

7.5 Fazit und Beantwortung der Forschungsfrage

Im Rahmen dieser Untersuchung konnten die Einsatzmöglichkeiten des scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstands exemplarisch für die vorgezogene Absicherung von zwei Geometrievarianten aufgezeigt werden.

Skalierung ermöglicht Geometrieuntersuchung

Die aus den Modellunterschieden abgeleitete Skalierung ermöglicht in skalierten Untersuchungen die Bewertung der Geometrieänderungen. Damit können in skalierten Untersuchungen bereits mit skalierten Versuchsmustern Bauteilvarianten mit unterschiedlicher Geometrie hinsichtlich der Funktionseignung getestet werden. Eine Anpassung der Skalierung an die Geometrieänderung ist nicht notwendig.

Bei der Ableitung der Skalierung ist es wichtig, die relevanten Parameter und Eigenschaften zu berücksichtigen. Werden relevante Effekte vernachlässigt, kann es zu Abweichungen bei der Bewertung der skalierten Systeme und bei der Übertragung auf Systeme anderer Größenordnungen kommen. Vorhandenes Systemwissen, Experimente und Forschungsergebnisse können genutzt werden, um die relevanten Parameter zu identifizieren.

Die skalierten Untersuchungen ermöglichen es, den Einfluss der Geometrieänderung bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung auf dem Antriebsstrangprüfstand zu bewerten. Mit Hilfe der Variantenprüfung können aus skalierten Prototypenteilen bereits Zielwerte abgeleitet werden, für die Serienteile noch nicht für Prüfstandsuntersuchungen genutzt werden können.

Durch die quantitative Bewertung von Geometrieparametern in frühen Entwicklungsphasen kann die Funktionalität des späteren Produktes sichergestellt werden. Die Weiterentwicklung und Auslegung des Kupplungsringes wird so frühzeitig unterstützt und durch objektive Messungen abgesichert.

Mit Hilfe des sCiL-Prüfstands und der entwickelten Skalierung kann der Einfluss der Laufbahngeometrie auf den Drehmomentverlauf im Antriebsstrang des Akkubohrschraubers unter definierten Randbedingungen bereits untersucht werden, wenn noch keine Prototypen des Folgeprodukts vorliegen. Eine vorgezogene Absicherung ist bereits möglich, wenn für die betrachtete Kupplung nur Referenzprodukte genutzt werden können. Die Erweiterung des XiL-Prüfstands um die Skalierungsmodelle zur Anpassung der Leistungsgrößen in den Kuppelsystemen erlaubt eine vorgezogene Untersuchung.

Die Variation der Laufbahngeometrie des Kupplungsringes eines Akkuboehrschraubers zeigt die Einsatzmöglichkeiten des scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstands exemplarisch für eine vorgezogene Absicherung von Entwicklungsentscheidungen unter Einbindung von skalierten Prototypen.

Mit der in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchung konnte die dritte Teilforschungsfrage

Wie gut können durch skalierte Versuche mit einer Leistungsskalierung Bauteilvarianten trotz unterschiedlicher Größenstufen hinsichtlich der Funktionserfüllung untersucht werden?

beantwortet werden.

8 Übertrag der Ergebnisse und Beitrag zur frühen Absicherung

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse dieser Arbeit aus Kapitel 5-7 aufgegriffen und daraus der Beitrag zur skalierten Absicherung abgeleitet. Zusätzlich wird basierend auf den gezeigten Untersuchungen eine Validierungsmethode beschrieben und eine Möglichkeit zur Integration in den Produktentwicklungsprozess vorgeschlagen.

Dieses Kapitel basiert auf den nachfolgenden Veröffentlichungen, in denen Inhalte dieses Kapitels durch den Autor im Rahmen einer Mitautorenschaft publiziert sind:

- Steck, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2020). „Scaling of Rotational Quantities for Simultaneous Testing of Powertrain Subsystems with Different Scaling on a X-in-the-Loop Test Bench“ (Steck et al., 2020)
- Matthiesen, S., Gwosch, T. & Steck, M. (2019). „Digitaler Entwicklungsprozess - Entwicklung einer Validierungsmethode zur funktionalen Überprüfung von skalierten Versuchsmustern in einer HiL-Plattform“ (Matthiesen et al., 2019)
- Matthiesen, S., Gwosch, T., Mangold, S., Grauberger, P., Steck, M. & Cersowsky, S. (2017). „Frontloading in der Produktentwicklung von Power-Tools durch frühe Validierung mit Hilfe von leistungsskalierten Prototypen“. (Matthiesen, Gwosch, Mangold, Grauberger et al., 2017)

Abbildungen und Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung oder in übersetzter Form aus den Veröffentlichungen übernommen. Sie werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.

8.1 Ansatz und Untersuchungsumgebung

Um die Wechselwirkungen zu den interagierenden Systemen zu berücksichtigen, sind XiL-Untersuchungen wichtig. Eine Einbindung der Komponente (SiD) in das Gesamtsystem ist daher notwendig. Können für Untersuchungen nur Referenzsysteme anderer Größenstufe genutzt werden, sind spezielle XiL-Prüfstände notwendig. Ein Beispiel für einen derartigen Prüfstand ist der scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstand.

8.1.1 Aufbau und Architektur der Untersuchungsumgebung

8.1.1.1 Anforderungen an Untersuchungsumgebung

Ziel der skalierten Absicherung ist es, mit Hilfe von Komponenten (siehe Abbildung 8.1) mit abweichenden Eigenschaften, wie unterschiedlicher Baugröße die Funktionsweise in frühen Phasen der Produktentwicklung bewertbar zu machen, wenn noch keine Serienteile verfügbar sind.

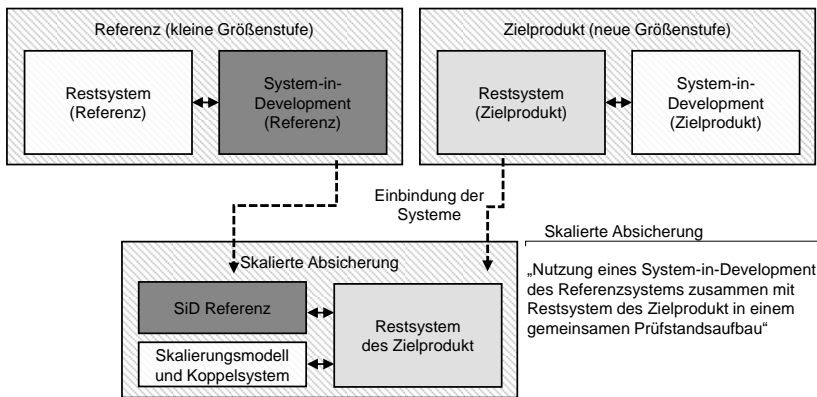


Abbildung 8.1: Struktur der skalierten Absicherung.

Aus dieser Struktur der skalierten Absicherung ergeben sich also die folgenden Anforderungen an den einen sCiL-Prüfstand für systemspezifische Untersuchungen (vgl. Matthiesen et al., 2019):

- Mechanische XiL-Plattform mit einfach konfigurierbarem Regelungssystem.
- Einbindung von Prototypen unterschiedlicher Baugrößen und Kopplung mit den restlichen Antriebsstrangkomponenten über die virtuelle Domäne.
- Integrationsmöglichkeit von Skalierungsmodellen an den Koppelsystemen der virtuellen Kopplung.
- Wiederholbare Testbedingungen und reproduzierbare Untersuchungsergebnisse durch systemspezifische Lastmodelle.
- Nutzung von virtuellen Modellen für Komponenten, die nicht physisch auf dem Prüfstand eingebunden sind.
- Virtuelle Kopplung, um Signale in Echtzeit zu übertragen.

Die folgende Abbildung 8.2 zeigt eine allgemeine Architektur einer beispielhaften Umsetzung.

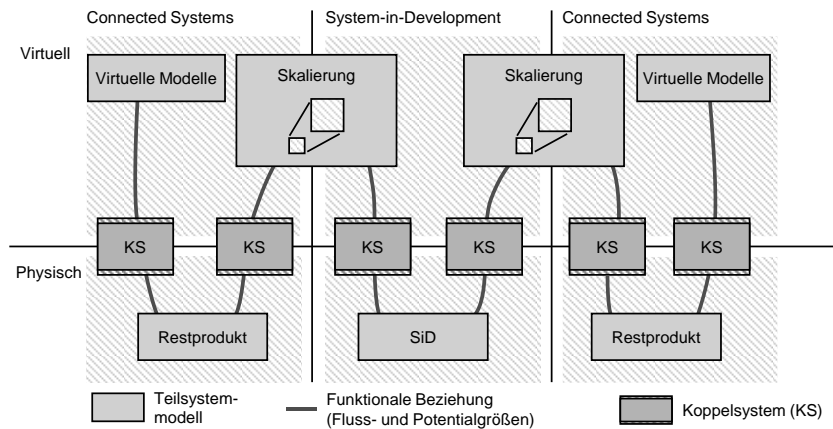


Abbildung 8.2: Beispielhafte XiL-Architektur für skalierte Absicherung

Je nach Untersuchungsziel kann die skalierte Komponente (SiD) auch von anderen Restsystemen (physisch oder virtuell) umgeben sein. Wichtig sind die Kopplensysteme der virtuellen Kopplung, um die Möglichkeit der Skalierung zu realisieren.

8.1.1.2 Kopplensysteme und virtuelle Kopplung

Die Kopplensysteme sind für die Einbindung der Prototypen in den restlichen Antriebsstrang wichtig. Die physischen Teilsysteme sind durch Kopplensysteme über die virtuell-physische Domäne verbunden. Die Kopplensysteme bestehen aus Sensor-Aktor Systemen, welche die Systemgrößen von virtuellen zu physischen Größen übersetzen und umgekehrt. In den Kopplensystemen sind Skalierungsmodelle integriert, welche die Leistungsskalierung zwischen dem zu untersuchenden Teilsystem (System-in-Development) und den interagierenden Teilsystemen (Connected Systems) ermöglichen (siehe Abbildung 8.3).

Eine besondere Herausforderung ist dabei die Regelung der Aktoren. Bei der Einbindung ist der Einfluss der Regelung durch moderne Regelungsmethoden und virtuelle Modelle möglichst zu beseitigen, um die untersuchungsspezifischen dynamischen Anforderungen zu erfüllen. Ziel ist es, durch die Auswahl der Sensor-Aktor-

Systeme eine Echtzeitfähigkeit der virtuellen Kopplung zu ermöglichen. Eine Bewertung der virtuellen Kopplung kann über die in Gwosch et al. (2019) gezeigten Kriterien erfolgen.

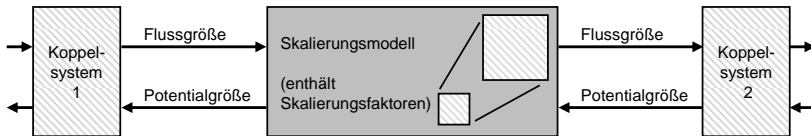


Abbildung 8.3: Koppelsysteme und virtuelle Kopplung zur Einbindung der Skalierung

8.1.2 Einsatzszenarien einer virtuellen Kopplung

Der folgende Abschnitt ist im Rahmen einer Mitautorenschaft¹. (Gwosch et al., 2019) entstanden und daraus entnommen.

Die folgenden Szenarien (vgl. Gwosch et al., 2019) können mit einer virtuellen Kopplung adressiert werden:

- Szenario 1: Virtueller Koppelbetrieb bietet Möglichkeiten zur Beeinflussung des Leistungsflusses und zur Anpassung der übertragenen Signale. Es können beispielsweise Filter eingesetzt oder zusätzliche Signale überlagert werden.
- Szenario 2: Die virtuelle Kopplung ermöglicht die Einbindung von Skalierungsmodellen zur Anpassung der übertragenen Leistung an unterschiedlich große Komponenten der Serie.
- Szenario 3: Die virtuelle Kopplung ermöglicht die Integration von Prototypen, die additiv hergestellt werden und nicht die geforderte Robustheit erreichen. Innerhalb der virtuellen Kopplung wird die Leistung an die Prototypen angepasst. Mit Hilfe von Materialmodellen können Unterschiede im Material und deren Einfluss berücksichtigt werden.
- Szenario 4: Die virtuelle Kopplung ermöglicht die Integration von Simulationsmodellen für Hardwarekomponenten, die noch nicht physikalisch vorhanden sind.

¹ Gwosch, T., Steck, M. & Matthiesen, S. (2019). „Virtual Coupling of Powertrain Components: New Applications in Testing“ (Gwosch et al. (2019))

8.2 Beschreibung der sCiL-Validierungsmethode

Basierend auf dem Validierungsansatz zur Einbindung von leistungsskalierten Prototypen in Prüfstände wird eine Validierungsmethode für den Einsatz von skalierten Teilsystemen an einem XiL-Prüfstand vorgeschlagen (vgl. Matthiesen, Gwosch, Mangold, Grauberger et al., 2017). Die Validierungsmethode Scaled-Components-in-the-Loop ist mit ihren fünf aufeinander aufbauenden Schritten in Abbildung 8.4 dargestellt.

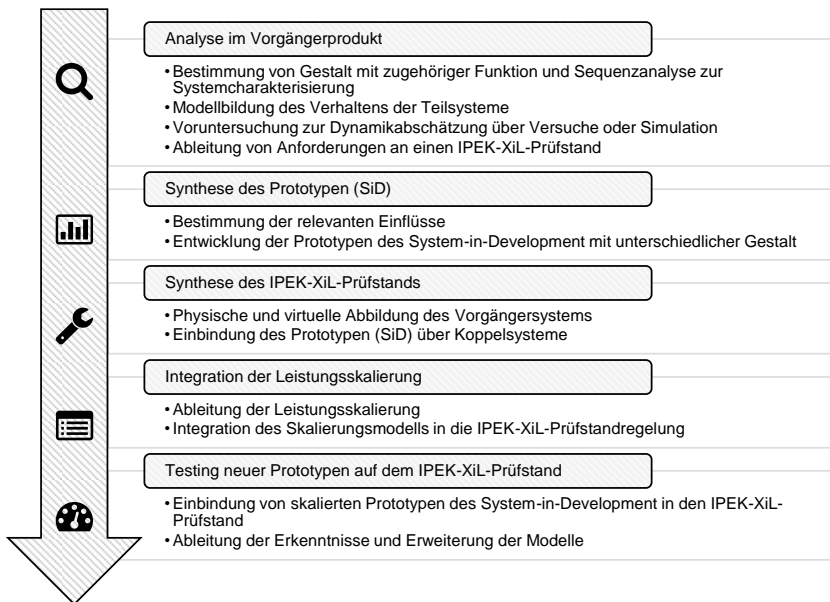


Abbildung 8.4: Schritte der sCiL-Validierungsmethode für die Vorentwicklungsphase, wenn keine vollständig funktionsfähigen Versuchs- bzw. Technologieträger zur Verfügung stehen und dennoch eine frühzeitige funktionale Absicherung mit Hardwarekomponenten notwendig ist. (Matthiesen, Gwosch, Mangold, Grauberger et al., 2017)

Der folgende Abschnitt ist im Rahmen einer Mitautorenschaft² (Matthiesen et al. (2017)) entstanden und daraus entnommen.

Im ersten Schritt der sCiL-Validierungsmethode erfolgt die Analyse des zu entwickelnden Teilsystems im Vorgängerprodukt der letzten Produktgeneration hinsichtlich der kritischen Funktion³. Ziel ist die Ableitung von Anforderungen an die aufzubauende Validierungsumgebung und die benötigten Koppelsysteme. Über eine Analyse der Gestalt werden die Orte der Funktionserfüllung und die relevanten Leistungsflüsse identifiziert. Hierbei kann die Analyse verschiedener Zustände und eine darauf folgende Überführung in ein Sequenzmodell nach Albers et al. (2008) unterstützen. Auf Basis dieser Analyse erfolgt die Modellbildung des Vorgängerprodukts. Mithilfe des erlangten Wissens wird für das zu entwickelnde Teilsystem (System-in-Development) ein erweitertes Modell erstellt. Die Simulationsergebnisse werden zur Ableitung der Anforderungen an die Validierungsumgebung verwendet. Zusätzlich können Voruntersuchungen in physischer und virtueller Form zur Abschätzung der Dynamikanforderungen an die Koppelsysteme beitragen.

Im zweiten Schritt werden die Ergebnisse zur Synthese der verschiedenen Varianten des System-in-Development als skalierte Prototypen genutzt. Auf Basis der Versuche und Simulationsergebnisse aus dem ersten Methodenschritt werden die relevanten Einflüsse bestimmt, die im skalierten Prototyp abgebildet werden müssen. Aus dem Vorgängerprodukt werden für das zu entwickelnde Teilsystem verschiedene Varianten abgeleitet und Prototypen mit verminderter Beanspruchbarkeit erstellt.

Im dritten Schritt wird der sCiL-Prüfstand aufgebaut. Hierzu wird das Vorgängerprodukt aus früheren Produktgenerationen als physisches Restsystem in den Prüfstand integriert oder in Form von virtuellen Modellen⁴ aus früheren Entwicklungen in Echtzeitmodellen aufbereitet.

Im vierten Schritt erfolgt die Integration des Skalierungsmodells in den Prüfstand, durch die eine entsprechende Kopplung des System-in-Development mit dem Vorgängerprodukt ermöglicht wird. Das zu entwickelnde Teilsystem wird über diese Koppelsysteme, bestehend aus Sensoren und Motoren, in das virtuelle oder physische Vorgängerprodukt eingebunden. Die Leistungsskalierung, als Bestandteil der

² Matthiesen, S., Gwosch, T., Mangold, S., Grauberger, P., Steck, M. & Cersowsky, S. (2017). „Frontloading in der Produktentwicklung von Power-Tools durch frühe Validierung mit Hilfe von leistungsskalierten Prototypen“ (Matthiesen et al. (2017))

³ Die kritischen Teilsysteme sind hierbei solche Systeme, deren Funktionserfüllung nicht vollständig vorausgedacht werden kann. Matthiesen, Gwosch und Steck (2019, S. 18))

⁴ Wichtig sind dabei auch Lastmodelle, um eine realitätsnahe Belastung vorzugeben.

Prüfstandregelung, beinhaltet Verrechnungsmodelle, die innerhalb der Koppelsysteme die Messgrößen in Vorgabegrößen der Aktoren umrechnen. Bestehende Ähnlichkeitskennzahlen und etablierte Modellbildungsansätze werden zur Erstellung der Skalierungsmodelle (siehe auch Abbildung 8.5) eingesetzt.

Im fünften und letzten Schritt der sCiL-Validierungsmethode werden mithilfe des entwickelten sCiL-Prüfstands und der skalierten Prototypen verschiedene Validierungsversuche durchgeführt. Mit den Versuchsergebnissen ist es möglich, die Funktionserfüllung der zu entwickelnden Komponente im Gesamtsystem zu bewerten, auch wenn die Beanspruchbarkeit der Komponenten noch reduziert ist. Weiterhin können die Ergebnisse genutzt werden, um die bisherigen bestehenden Modelle der Systemkomponenten zu erweitern und verfeinern. Damit hilft die sCiL-Methode auch bei der Verkürzung der Entwicklungszeit von zukünftigen Produktgenerationen.

8.3 Vorgehensweise zur Entwicklung des Skalierungsmodells

Zur Entwicklung des Skalierungsmodells wurde folgende Vorgehensweise (siehe Abbildung 8.5 und Kapitel 5.6) abgeleitet (vgl. Steck et al., 2020).

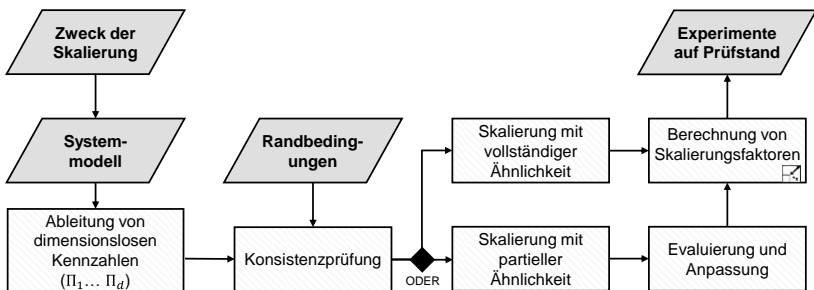


Abbildung 8.5: Vorgehensweise zur Entwicklung des Skalierungsmodells ausgehend von einem Modell mittels Dimensionsanalyse und Berücksichtigung der Randbedingungen aus Modell und Prüfstand. (Steck et al., 2020)

Der folgende Abschnitt ist im Rahmen einer Mitautorenschaft⁵ (Matthiesen et al., 2019) entstanden und daraus entnommen.

Zunächst ist es wichtig, die Randbedingungen aus dem XiL-Prüfstand, dem Prototyp und dem Zweck der Skalierung abzuleiten. Die kritische Funktion des Bauteils oder ein Entwicklungsziel der Produktentwicklung kann zur Auswahl des Skalierungszwecks herangezogen werden. Dazu können vorhandene Messdaten analysiert werden. Im zweiten Schritt werden die relevanten Parameter der Modellierung identifiziert. Dazu ist es notwendig, die Zusammenhänge zu modellieren, welche die kritische Funktion beeinflussen. Dies kann durch physikalische Modellierung erfolgen. Die relevanten Parameter werden in einer Relevanzliste nach Koschorrek (2007) zusammengefasst. Weiterhin ist es notwendig, interne Parameter des Prototyps sowie Systemgrößen der Ein- und Ausgänge zu berücksichtigen.

Anschließend werden mit Hilfe einer Dimensionsanalyse dimensionslose Kennzahlen abgeleitet (Christophe, Sell, Coatanéa & Tamre, 2007). Zur Entwicklung der Skalierungsfaktoren wird der Ansatz nach Lotz (2017) verwendet. Anschließend werden die Dimensionen der relevanten Parameter in einer Tabelle angeordnet. Gute Beispiele für die Dimensionsanalyse sind Tan (2011) und Görtler (1975). Das Gleichungssystem kann entweder manuell oder mit Hilfe des Gauß-Algorithmus gelöst werden. Nach Möglichkeit sollten alle dimensionslosen Kennzahlen im unskalierten und skalierten System den gleichen Wert haben, sodass eine Ähnlichkeit der Systeme besteht. Wenn alle geometrischen Parameter einheitlich skaliert sind, ist eine geometrische Skalierung möglich (Wolniak, Mozgova & Lachmayer, 2018). Die ermittelten Kennzahlen werden in einer Kompatibilitätsprüfung auf Konsistenz geprüft. Oftmals ist es aufgrund von Abweichungen nicht möglich, eine vollständige Ähnlichkeit zu erreichen, sodass nur eine teilweise Ähnlichkeit erreicht wird. Liegt nur eine teilweise Ähnlichkeit vor, können in den skalierten Versuchen nur einzelne Effekte bewertet werden. Aussagen lassen sich dann nur für Effekte ableiten, die von den betrachteten Parametern bestimmt werden. Eine Änderung der Form oder der geometrischen Konfiguration kann zu geometrischen Abweichungen führen (vgl. Dutson & Wood, 2002). Die Bewertung der Auswirkung der Verzerrung erfolgt anhand der kritischen Funktion. Je nach Randbedingungen werden alle dimensionslosen Kennzahlen so transformiert, dass die Modell-Parameter hinsichtlich der eingestellten Eigenschaft verändert werden, welche durch einen Parameter repräsentiert wird. Die Transformation der dimensionslosen Kennzahlen führt auch zu Skalie-

⁵ Steck, M.; Gwosch, T.; Matthiesen, S. (2020): „Scaling of Rotational Quantities for Simultaneous Testing of Powertrain Subsystems with Different Scaling on a X-in-the-Loop Test Bench“ (Steck, Gwosch und Matthiesen (2020)).

rungsfaktoren für die übrigen Parameter. Diese Transformation wird so durchgeführt, dass die Skalierungsfaktoren der restlichen relevanten Größen nur vom Verhältnis eingestellten Eigenschaft abhängen.

Für die Umsetzung werden die Skalierungsfaktoren in die virtuelle Kopplung des Prüfstands integriert. Die Skalierungsfaktoren werden in der Prüfstandsregelung für die Berechnung der Leistungsgrößen (Potenzial- und Flussgrößen) verwendet. Darüber hinaus werden die Leistungsgrößen während des Prüfstandbetriebs kontinuierlich verrechnet. Die verrechneten mechanischen Größen werden über die Aktoren auf die miteinander verbundenen Teilsysteme aufgebracht.

8.4 Integration der Validierungsmethode

Um die Anwendung der vorgestellten Methoden in der Praxis der Produktentwicklung zu ermöglichen, wird eine Einbindung der sCiL-Validierungsmethode exemplarisch an zwei Beispielen erläutert. Ein allgemeine, nicht für bestimmte Produkte fokussierte Beschreibung ist wenig zielführend. Zunächst wird die Einbindung im Kontext der Luftfahrt an einem mechanischen Aktor aufgezeigt und daraus eine Nutzung für Elektrowerkzeuge vorgeschlagen. Beide Beispiele nutzen vergleichbare Antriebstränge (Matthiesen et al., 2019).

Einbindung im Kontext der Luftfahrt

Der folgende Abschnitt ist im Rahmen einer Mitautorenschaft⁶ (Gwosch, Steck, Dörr & Matthiesen, 2020; Matthiesen et al., 2019) entstanden und daraus entnommen.

Nachfolgend wird basierend auf (Gwosch et al., 2020) eine Einbindung in einen Produktentwicklungsprozess der Luftfahrt aufgezeigt. Die Validierungsmethode Scaled-Components-in-the-Loop eignet sich insbesondere für die Vorentwicklungsphasen, in denen noch keine vollständig funktionsfähigen Versuchs- bzw. Technologieträger zur Verfügung stehen, gleichzeitig jedoch eine frühe funktionale Absicherung mit Hardwarekomponenten gewünscht ist.

Die Validierungsmethode ist in einem Luftfahrt-Produktentwicklungsprozess parallel zur Vorentwurfsphase (Preliminary-Design) angesiedelt (vgl. Abbildung 8.6 und Abbildung B.6). Damit kann die funktionale Absicherung ausgewählter Komponenten

⁶ Gwosch, T.; Steck, M.; Dörr, M.; Matthiesen, S. (2020): „Frontloading in Aircraft Development Process by Integration of a new Validation Method“ (Gwosch, Steck, Dörr und Matthiesen (2020)).

bereits im Review der Vorentwurfsphase berücksichtigt werden. In der Detailkonstruktionsphase liegt damit ein abgesichertes Konzept auf Komponentenebene vor, welches das Design und die parallel stattfindende Produktverifikation beschleunigt.

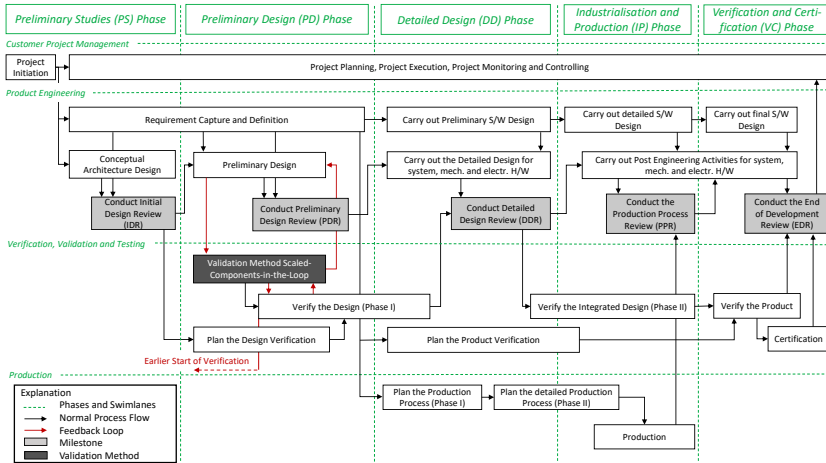


Abbildung 8.6: Einordnung der Validierungsmethode in einen Luftfahrtentwicklungsprozess (vgl. Gwosch et al., 2020)

Einbindung im Entwicklungsprozess für Powertools

Basierend auf der Validierungsmethode im Kontext der Luftfahrt wird die folgende Einbindung in den Entwicklungsprozess für Elektrowerkzeuge vorgeschlagen. Die Validierungsmethode (vgl. Abbildung 8.4) Scaled-Components-in-the-Loop eignet sich in der Entwicklung von Powertools besonders in der Phase der Vorentwicklung.

Diese Vorentwicklung ist dadurch gekennzeichnet, dass noch keine vollständig funktionsfähigen Prototypen und Versuchsträger zur Verfügung stehen, da diese von Lieferanten noch nicht bezogen werden können oder sich noch in der Entwicklung befinden. Notwendig ist es jedoch, weitreichende Entwicklungsentscheidungen durch Prüfstandsversuche im Gesamtsystem mit den vielfältigen Wechselwirkungen abzusichern. Es ist daher eine frühe funktionale Absicherung gewünscht, um das Risiko der weiteren Entwicklung zu reduzieren. Unterschiedliche Untersuchungsumgebungen und eine zeitliche Anordnung sind im Anhang in Abbildung A.1 dargestellt.

Die Validierungsmethode kann in einem Elektrowerkzeug-Produktentwicklungsprozess parallel zur Vorentwurfsphase angesiedelt werden (vgl. Abbildung 8.6). Damit kann die funktionale Absicherung ausgewählter Komponenten bereits in der Vorentwurfsphase durchgeführt werden. Die daran anschließende Phase der Detailkonstruktion wird durch die skalierte Absicherung unterstützt.

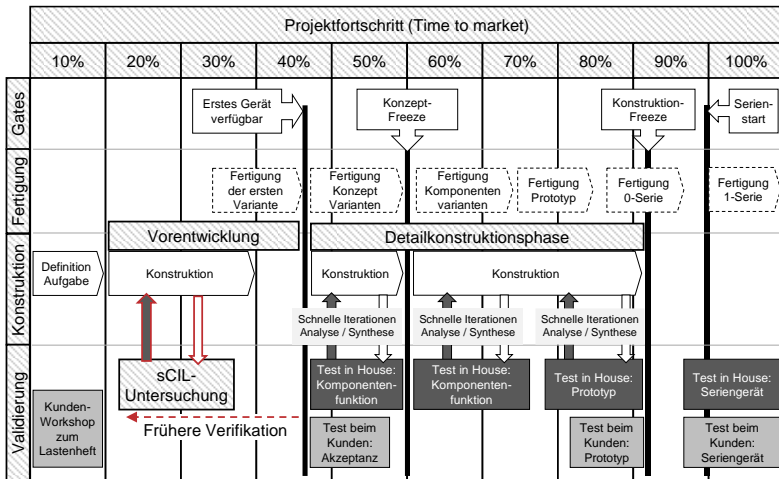


Abbildung 8.7: Einordnung der Validierungsmethode in einen Produktentwicklungsprozess für Elektrowerkzeuge. Erweiterte Darstellung aus Matthiesen et al. (2016)

Für den Einsatz der Validierungsmethode sind folgende Voraussetzungen (vgl. Gwosch et al., 2020) relevant:

- Die zu entwickelnde Komponente wird aus einer bestehenden Produktgeneration durch eine Gestaltvariation abgeleitet. Das Funktionsprinzip der Komponente bleibt unverändert, es wird zusätzlich die Leistungs- bzw. die Baugröße verändert.
- Für die zu entwickelnden Komponenten können Referenzprodukte anderer Baugröße eingesetzt werden. Beispielsweise können Komponenten aus einer vorhandenen Baureihe genutzt werden, auch wenn die Baugröße nicht zu den gewünschten Anforderungen passt.
- Die Validierungsumgebung steht für die skalierten Untersuchungen zur Verfügung. Diese sollte bereits vorhanden sein oder in einem ausgelagerten Entwicklungsprozess entwickelt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit und die daraus gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst. Abschließend wird ein Ausblick auf weiterführende Forschungsarbeiten gegeben, die im Zusammenhang mit der vorliegenden Forschungsarbeit stehen.

9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde ein Ansatz zur Unterstützung des Frontloading aufgezeigt und an einem Beispielsystem aus einem Akkuboehrschrauber in drei Untersuchungen (siehe Kapitel 5-7) angewandt. Durch die Einbindung von physischen Komponenten und Teilsystemen aus Referenzprodukten und der Ableitung von Skalierungsfaktoren konnten frühe Untersuchungen des skalierten Prototyps unter Berücksichtigung des Gesamtsystems durchgeführt werden.

An drei Untersuchungsbeispielen (siehe Kapitel 5-7) wurden die Einsatzmöglichkeiten skaliert Untersuchungen für die Produktentwicklung beschrieben und evaluiert. Dazu wurden Skalierungsfaktoren zur Berücksichtigung der Unterschiede zwischen Referenzprodukt und skaliertem Prototyp abgeleitet.

Um die Zielstellung zu erfüllen, wurden die drei Teilforschungsfragen beantwortet:

Teilforschungsfragen:

- TF 1: Wie kann die Anpassung der rotatorischen Leistung in einem XiL-Prüfstand erfolgen und welche mechanischen Parameter werden für die Ableitung der Leistungsskalierung benötigt?*
- TF 2: Welche Einflüsse der Teilsysteme müssen in den Skalierungsfaktoren berücksichtigt werden, um eine Anpassung der mechanischen Leistungsgrößen an unterschiedliche Größenstufen innerhalb des Antriebsstrangs zu ermöglichen?*
- TF 3: Wie gut können durch skalierte Versuche mit einer Leistungsskalierung Bauteilvarianten trotz unterschiedlicher Größenstufen hinsichtlich der Funktionserfüllung untersucht werden?*

Mit dem Ergebnis der drei Untersuchungsbeispiele der Teilforschungsfragen wurde eine Validierungsmethode (siehe Kapitel 8) beschrieben. Als Ergebnis ergeben sich

die Bewertung des Ansatzes durch drei Untersuchungsbeispiele für einen Antriebsstrang, die entwickelten Skalierungsmodelle am Beispielsystem Akkuboehrschrauber und abgeleitete Beiträge zur Validierungsmethode.

Jede der Teilforschungsfragen wurde durch eine Untersuchung am scaled-Components-in-the-Loop Prüfstand beantwortet.

Die Beantwortung der ersten Teilforschungsfrage erfolgte in Kapitel 5 mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen zur Bewertung einer Skalierung bezüglich Kuppelungsstufen. Die Anpassung der rotatorischen Leistung erfolgt in einem XiL-Prüfstand durch die Verrechnung der Leistungsgrößen in den Koppelsystemen zwischen den physischen Systemen. Hierzu konnten Skalierungsfaktoren zur Nutzung eines Referenzproduktes abgeleitet werden. Durch die Skalierungsfaktoren wurden abweichende Eigenschaften der Kupplung bezüglich der Federkraft berücksichtigt. Durch die Koppelsysteme konnten die verrechneten Leistungsgrößen am Prüfstand auf die Teilsysteme aufgebracht werden. Die experimentelle Überprüfung des Skalierungsmodells zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Versuchen mit unterschiedlicher Skalierung. Das Experiment bestätigt die Skalierung der Leistungsgrößen in Abhängigkeit der Modellunterschiede. Das vorgestellte Vorgehen zur Ableitung der Skalierungsfaktoren ist zielführend und kann für weitere Untersuchungen genutzt werden. Die vorgestellten Ergebnisse beantworten die erste Teilforschungsfrage.

Die zweite Teilforschungsfrage wurde in Kapitel 6 beantwortet. Für die zweite Forschungsfrage wurde die Skalierung in Abhängigkeit von zwei Faktoren am Beispiel der Überlastkupplung eines Akkuboehrschraubers abgeleitet. Mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen wurde die Skalierung zur Anpassung an abweichende Baugröße und veränderter Übersetzungsverhältnisse untersucht. Um eine Anpassung der mechanischen Leistungsgrößen an die unterschiedliche Größenstufe innerhalb des Antriebsstrangs zu ermöglichen, ist eine Bewertung der Modellunterschiede notwendig. Die Ergebnisse der Prüfstandsuntersuchung zeigen eine gute Übereinstimmung der skalierten Untersuchung mit Versuchen anderer Baugröße. Die Skalierungsfaktoren ermöglichen dabei die Anpassung des zur Verfügung stehenden Referenzsystems für eine Vorhersage anderer Größenstufen. Die unterschiedlichen Größenstufen der Überlastkupplung konnten in den Berechnungsvorschriften zur Skalierung der Leistungsgrößen berücksichtigt werden. Zusätzlich wurden über die virtuelle Kopplung weitere virtuelle Systemmodelle in den Untersuchungen eingebunden. Damit können zusätzliche Komponenten, die bisher nur als Simulationsmodelle vorliegen, in der Absicherung auf Prüfständen berücksichtigt werden. Mit der experimentellen Überprüfung der Skalierung konnte die zweite Teilforschungsfrage beantwortet werden.

Die dritte Teilforschungsfrage wurde in Kapitel 7 durch eine exemplarisch dargestellte Gestaltvariation beantwortet. Durch den Einsatz des scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstand und der abgeleiteten Skalierungsfaktoren konnten Gestaltvariationen bereits durch Einsatz eines skalierten Referenzsystems bewertet werden. Über eine Leistungsskalierung, welche die gegebenen physischen Unterschiede berücksichtigt, erfolgt die Einbindung in das Gesamtsystem. Die Untersuchungsergebnisse zeigen das die Übereinstimmung der Bewertungsgrößen durch die Auswahl der berücksichtigten Parameter beeinflusst wird. Es konnte gezeigt werden das die Verwendung von Referenzsysteme anderer Größenstufe für die Untersuchung unterschiedlicher Bauteilvarianten in skalierten Versuchen hilfreich ist. Durch solche Untersuchungen können in frühen Entwicklungsphasen Gestaltvariationen untersucht und daraus Zielgrößen für die weitere Entwicklung abgeleitet werden. Mit der gezeigten Untersuchung der Gestaltvariation konnte die dritte Teilforschungsfrage beantwortet werden.

In Kapitel 8 wurde basierend auf den gezeigten Untersuchungen eine Validierungsmethode abgeleitet. Zusätzlich wurden Möglichkeiten zur Integration der Methode in den Produktentwicklungsprozess vorgestellt. Die Validierungsmethode bildet das Grundgerüst für weitere untersuchungsspezifische Ausprägungen der Leistungsskalierung auf XiL-Prüfständen. Darüber hinaus ermöglicht das dokumentierte Vorgehen zur Ableitung der Skalierungsfaktoren eine Unterstützung für weitere skalierte Untersuchungen im Kontext Frontloading.

Mit der Beantwortung der drei Teilforschungsfragen (Kapitel 5-7) und der Beschreibung der Validierungsmethode (Kapitel 8) konnte die übergeordnete Forschungsfrage

Wie muss ein Antriebsstrangprüfstand auf Basis des X-in-the-Loop-Ansatzes gestaltet sein, um die Einbindung von Antriebsstrangkomponenten unterschiedlicher Größenstufen zu unterstützen und eine vorgezogene Absicherung von Antriebsstrangkomponenten zu ermöglichen?

beantwortet werden.

9.2 Ausblick

Die Forschungsarbeit und die vorgestellten Erkenntnisse zeigen das große Potenzial von skalierten Untersuchungen mit einem sCiL-Prüfstand zur Unterstützung von

Frontloading in der Produktentwicklung. Die Ergebnisse und Erkenntnisse der vorliegenden Forschungsarbeit bieten Anknüpfungspunkte für weiterführende Forschungsarbeiten in den folgenden Themenbereichen:

- Weiterentwicklung der Regelung am scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstand, um Untersuchungen in weiteren Dynamikbereichen vornehmen zu können.
- Berücksichtigung weiterer Wechselwirkungen im sCiL-Prüfstand und Erweiterung der Lastmodelle, um zusätzliche Belastungen neben dem Hauptleistungsfluss abzubilden.
- Ergebnistransfer der skalierten Untersuchungen auf andere Teilsysteme.
- Entwicklung von Skalierungsmodellen und Koppelsystemen, um auch andere Domänen skalieren zu können. Basierend auf thermischen Koppelsystemen (Leitenberger, Steck, Gwosch & Matthiesen, 2021) könnte auch die Wärmeleitung und -strahlung in Skalierungsmodellen abgebildet werden.
- Erweiterung der virtuellen Modelle, um die Prüfstandskomponenten durch Simulationsmodelle oder Digitale Zwillinge zu ersetzen.

Die Weiterentwicklung der Regelung am scaled-Components-in-the-Loop-Prüfstand bietet das Potential zur präziseren Abbildung der Wechselwirkungen zwischen den betrachteten Teilsystemen und zur Reduktion des Einflusses der Koppelsysteme. Hierbei sollen im Speziellen die mechanischen Einflüsse der Aktoren verbessert werden, um auch Untersuchungen in weiteren Dynamikbereichen vornehmen zu können. Als Unterstützung wird die Implementierung einer Trägheitskompensation in der Regelung der Koppelsysteme vorgeschlagen, um die Einflüsse der physischen Aktoren zu reduzieren.

Die Berücksichtigung zusätzlicher Wechselwirkungen im sCiL-Prüfstand bietet die Möglichkeit, die Absicherung hinsichtlich weiterer Einflüsse zu erweitern. Es können beispielsweise zusätzlich thermische Wechselwirkungen und Randbedingungen am sCiL-Prüfstand berücksichtigt werden, um auch Untersuchungen hinsichtlich temperaturabhängiger Effekte zu ermöglichen. Um zusätzliche Wärmeleistung in die Versuche einzubringen, wird die Einbindung von zusätzlichen Wärmequellen über thermische Koppelsysteme vorgeschlagen. Die dafür notwendigen thermischen Koppelsysteme wurden von Leitenberger et al. (2021) bereits vorgestellt und untersucht.

Zum Ergebnistransfer werden weitere skalierte Untersuchungen mit anderen Teilsystemen empfohlen. Denkbar sind solche Untersuchungen bei allen Arten von Antriebssträngen, die auch Komponenten und Teilsysteme von Zulieferern oder aus

bestehenden Baureihen nutzen. Hilfreich ist hierfür, auf bestehende Prüfstände zurückzugreifen und das Konzept der standortverteilten Validierung mit skaliertem Übertragung zu verknüpfen.

Zur Entwicklung der Einsatzfähigkeit der skalierten Untersuchung bieten die Skalierungsmodelle zusammen mit den erweiterten Koppelsystemen die Möglichkeit, auch andere Domänen an den Schnittstellen zu berücksichtigen. Denkbar ist beispielsweise die Skalierung von Wärmeflüssen zwischen den Teilsystemen, um bei immer kompakteren und integrierteren Systemen eine frühe Abschätzung der thermischen Belastbarkeit zu ermöglichen.

Die Erweiterung der virtuellen Modelle bietet die Möglichkeit, zunehmend mehr Teilsysteme durch Simulationsmodelle abzubilden und so das Systemwissen in ausführbaren Modellen zu dokumentieren. Eine gesteigerte Verwendung von Simulationsmodellen reduziert den Aufwand an mechanischen Prüfstandskomponenten. Als eine Unterstützung wird der Einsatz eines Digitalen Zwillings für interagierende Teilsysteme vorgeschlagen. Der sCiL-Prüfstand kann bei der Ableitung des Digitalen Zwillings für Teilsysteme des Akkuboehrschraubers zum Einsatz kommen. Die Ableitung des Digitalen Zwillings kann durch den von Sturm et al. (2021) vorgestellten Ansatz erfolgen. Durch die Nutzung des sCiL-Prüfstands eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Nutzung des XiL-Ansatzes in der Produktentwicklung.

Literaturverzeichnis

- Albers, A., Alink, T., Matthiesen, S. & Thau, S. (2008). Support of System Analyses and Improvement in Industrial Design through the Contact & Channel Model. In D. Marjanovic, M. Storga, N. Pavković & N. Bojčević (Hrsg.), *Proceedings of the DESIGN 2008, the 10th International Design Conference, Dubrovnik, Kroatien* (S. 245–252). Glasgow: The Design Society.
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S. & Matros, K. (2016). Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 541–569). München: Carl Hanser Verlag.
- Albers, A., Behrendt, M. & Ott, S. (2012). Systematisch zu Mobilitätslösungen. *Automobil-Konstruktion*, 2, 38–39.
- Albers, A., Bursać, N. & Wintergerst, E. (2015). Produktgenerationsentwicklung: Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2015*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Albers, A. & Düser, T. (2010). Implementation of a Vehicle-in-the-Loop Development and Validation Platform. *Proceedings of the FISITA 2010 World Automotive Congress, 30. Mai - 4. Juni 2010. Budapest, Ungarn*.
- Albers, A. & Düser, T. (2011). Validierung im Produktentstehungsprozess. In F. Henning (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung* (S. 133–141). München: Carl Hanser Verlag.
- Albers, A., Düser, T. & Ott, S. (2008). X-in-the-Loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebssystemen. 8. *Tagung Hardware-in-the-loop-Simulation, 16./17. September 2008, Kassel*.
- Albers, A., Matros, K., Behrendt, M. & Jetzinger, H. (2015). Das Pull-Prinzip der Validierung – Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess. *Konstruktion*, 67(6), 74–81.

- Albers, A. & Matthiesen, S. (2002). Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme. *Konstruktion*, 54(7-8), 55–60.
- Albers, A., Pinner, T., Yan, S., Hettel, R. & Behrendt, M. (2016). Koppelsystems: Obligatory Elements within Validation Setups. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković, N. Bojčetić & S. Škec (Hrsg.), *Proceedings of the DESIGN 2016, the 14th International Design Conference* (Bd. 84, S. 109–118). Dubrovnik, Kroatien.
- Albers, A., Rapp, S., Birk, C. & Bursać, N. (2017). Die „Frühe Phase“ der PGE - Produktgenerationsentwicklung. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2017*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Albers, A., Sadowski, E. & Marxen, L. (2011). A New Perspective on Product Engineering Overcoming Sequential Process Models. In H. Birkhofer (Hrsg.), *The Future of Design Methodology* (S. 199–209). London, England: Springer London. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-615-3_17
- Albers, A., Scherer, H., Bursać, N. & Rachenkova, G. (2015). Model Based Systems Engineering in Construction Kit Development – Two Case Studies. *Procedia CIRP*, 36, 129–134. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.044>
- Albers, A., Yan, S. & Behrendt, M. (2016). Validation Support for Distributed Vehicle Development Based on the XiL-Approach. *FISITA 2016 World Automotive Congress, Januar 2016, Busan, Südkorea*.
- Andert, J., Klein, S., Savelsberg, R., Pischinger, S. & Hameyer, K. (2016). Virtual Shaft: Synchronized Motion Control for Real Time Testing of Automotive Powertrains. *Control Engineering Practice*, 56(8), 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.08.005>
- Bacic, M., Neild, S. & Gawthrop, P. (2009). Introduction to the Special Issue on Hardware-in-the-Loop Simulation. *Mechatronics*, 19(7), 1041–1042. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2009.09.005>
- Bertsche, B. (Hrsg.). (2007). *Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte Rapid Prototyping. Grundlagen, Rahmenbedingungen und Realisierung*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

- Bier, M., Buch, D., Kluin, M., Beidl, C., Bier, M., Buch, D. et al. (2012). Entwicklung und Optimierung von Hybridantrieben am X-in-the-Loop-Motorenprüfstand. *MTZ-Motortechnische Zeitschrift*, 73(3), 240–247. <https://doi.org/10.1365/s35146-012-0272-y>
- Boës, S., Batliner, M., Stücheli, M. & Meboldt, M. 2017. *A Taxonomy of Testing Activities in Product Development* (Working Paper ETH-Zürich). Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000214845>
- Bouscayrol, A. (2008). Different Types of Hardware-in-the-Loop Simulation for Electric Drives. *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2146–2151. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2008.4677304>
- Božek, P. & Turygin, Y. (2014). Measurement of the Operating Parameters and Numerical Analysis of the Mechanical Subsystem. *Measurement Science Review*, 14(4), 198–203. <https://doi.org/10.2478/msr-2014-0027>
- Buckingham, E. (1914). On Physically Similar Systems; Illustrations of the Use of Dimensional Equations. *Physical Review*, 4(4), 345–376. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.4.345>
- Bursać, N. (2016). Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung. Dissertation. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung* (Bd. 93). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000054484>
- Cem, K., Brandt, T., Heckhoff, C. & Schramm, D. (2007). Ähnlichkeitstheorie in der Mechatronik - Skalierung einer vierbeinigen Laufmaschine. In VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.), *Mechatronik 2007, Innovative Produktentwicklung. Maschinenbau, Elektrotechnik, Informationstechnik; Wiesloch* (VDI-Berichte, Bd. 1971). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Cho, U., Wood, K. L. & Crawford, R. H. (1998). Novel Empirical Similarity Method for the Reliable Product Test With Rapid Prototypes. *Proceedings of DETC'98: ASME 1998 Design Engineering Technical Conferences, Atlanta, USA*. <https://doi.org/10.1115/DETC98/DAC-5605>
- Christophe, F., Sell, R., Coatanéa, E. & Tamre, M. (2007). System Modeling Combined with Dimensional Analysis for Conceptual Design. *8th International Workshop on Research and Education in Mechatronics 2007, June 14-15, Tallinn, Estland*.

- Conrad, P., Schiemann, H. & Vömel, P. G. (1977). *Erfolg durch methodisches Konstruieren: Ein Leitfaden für Studium und Praxis*. Grafenau: Lexika-Verlag.
- Coutinho, C., Baptista, A. J., Rodrigues, J. D., Coutinho, C. P., Baptista, A. J. & Dias Rodrigues, J. (2016). Reduced Scale Models Based on Similitude Theory: A review up to 2015. *Engineering Structures*, 119, 81–94.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.016>
- Cronjäger, L., Jahn, R. & Riederer, H. (1984). *Entwicklung eines Versuchsstandes zur reproduzierbaren Messung der Vibration schlagender handgeführter Maschinen* (Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Fachgruppe Maschinenbau Verfahrenstechnik, Bd. 3185). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-87723-9>
- Cross, N. (2008). *Engineering design methods. Strategies for product design* (4. Aufl.). Chichester, England: Wiley-Verlag.
- Deimel, M. (2007). *Ähnlichkeitskennzahlen zur systematischen Synthese, Beurteilung und Optimierung von Konstruktionslösungen*. Dissertation Technische Universität Braunschweig. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Dennig, H.-J. (2009). *Entwicklung einer schnell schaltenden Bremse und Kupplung für Linearbewegungen zum Überlastschutz in Werkzeugmaschinen* (Bericht Nr. 566). Dissertation Universität Stuttgart. <https://doi.org/10.18419/opus-4165>
- Dietz, P. (1983). Baukastensystematik und methodisches Konstruieren im Werkzeugmaschinenbau. *Werkstatt und Betrieb*, 116(4), 185–189.
- DIN EN 62841-1 VDE 0740-1:2016-07. *Elektrische motorbetriebene handgeführte Werkzeuge, transportable Werkzeuge und Rasen- und Gartenmaschinen – Sicherheit*. Berlin: VDE-Verlag.
- DIN 1313:1998-12. *Größen*. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN EN ISO 11148-1:2012-06. *Handgehaltene nicht elektrisch betriebene Maschinen- Sicherheitsanforderungen - Teil1: Maschinen für gewindelose mechanische Befestigungen (ISO 1148-1:2011); Deutsche Fassung EN ISO 11148-1:2011*. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN EN ISO 9000:2015-11. *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth-Verlag.

- Dispan, J. (2016). *Branchenanalyse Elektrowerkzeuge. Entwicklungstrends und Herausforderungen* (Study der Hans-Böckler-Stiftung, Nr. 343). Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung.
- Dresig, H. & Fidlin, A. (2014a). Modellbildung mechanischer Antriebssysteme. In H. Dresig & A. Fidlin (Hrsg.), *Schwingungen mechanischer Antriebssysteme. Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese* (3. Aufl., S. 5–193). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24117-8_2
- Dresig, H. & Fidlin, A. (Hrsg.). (2014b). *Schwingungen mechanischer Antriebssysteme. Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese* (3. Aufl.). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Dresig, H. & Holzweißig, F. (2012). *Maschinendynamik*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29571-3>
- Düser, T. (2010). X-in-the-Loop –ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen. Dissertation. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung* (Bd. 47). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Dutson, A. & Wood, K. L. (2002). Foundations and Applications of the Empirical Similitude Method (ESM). In *ASME Design Engineering Technical Conference (DETC), Las Vegas, Amerika* (S. 12–15). New York, USA: American Society of Mechanical Engineers.
- Ebel, B. (2015). Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung* (Bd. 85). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Ehrlenspiel, K. (2009). *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (4., aktualisierte Aufl.). München: Carl Hanser Verlag. <https://doi.org/10.3139/9783446421578>
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2013). *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (5., überarbeitete und erweiterte Aufl.). München: Carl Hanser Verlag. <https://doi.org/10.3139/9783446436275>

- Engel, A. (2010). *Verification, Validation, and Testing of Engineered Systems* (Wiley Series in Systems Engineering and Management, 1. Aufl.). New York: Wiley-Verlag. <https://doi.org/10.1002/9780470618851>
- Esteban, E., Salgado, O., Iturrospe, A. & Isasa, I. (2017). Design Methodology of a Reduced-Scale Test Bench for Fault Detection and Diagnosis. *Mechatronics*, 47, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.08.005>
- Europäische Kommission Unternehmen und Industrie. (2020). *Leitfaden für die Anwendung der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG: Deutsche Übersetzung der englischen Ausgabe 2.2*. Berlin: Beuth-Verlag.
- Fathy, H. K., Filipi, Z. S., Hagen, J. & Stein, J. L. (2006). Review of Hardware-in-the-Loop Simulation and its Prospects in the Automotive Area. *Proceedings Volume 6228, Modeling and Simulation for Military Applications, 62280E, 22 Mai 2006*. <https://doi.org/10.1117/12.667794>
- Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (Hrsg.). (2013). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (8., vollst. überarb. Aufl.). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Fischer, B. & Jassmann, U. (2017). A General Framework for a Control-Based Design of Power and Mechanical Hardware-in-the-Loop Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 10957–10963. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2467>
- Freudenmann, T. (2014). Ontologien zur Validierung von Produkten basierend auf dem Contact & Channel - Ansatz (C&C2-Ansatz). Dissertation. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung* (Bd. 78). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Geier, M., Stier, C., Düser, T., Behrendt, M., Ott, S. & Albers, A. (2009). Simulationsgestützte Methoden - IDE und XiL zur Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten. *ATZextra*, 14, 48–53. <https://doi.org/10.1365/s35778-009-0305-4>
- Gold, P. W., Schelenz, R. & Koenen, H. (1999). *Auslegung und Anwendung von Überlastkupplungen und die Auswirkungen des Schaltverhaltens auf den Antriebsstrang: Abschlußbericht; Forschungsvorhaben Nr. 326: Überlastkupplungen* (Forschungsheft FVA-590). Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Antriebstechnik.

- Gold, P. W., Schelenz, R. & Philipp, T. (2003). *Auslegung und Anwendung von Überlastkupplungen: Verallgemeinerung der Berechnungsmöglichkeiten; FVA-Projekt Nr. 326 Ib* (Forschungsreport 2003). Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Antriebstechnik.
- Görtler, H. (1975). *Dimensionsanalyse. Theorie der physikalischen Dimensionen mit Anwendungen*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Grabowski, H. & Geiger, K. (Hrsg.). (1997). *Neue Wege zur Produktentwicklung*. Stuttgart: Raabe-Verlag.
- BMWi. (2014). *Bekanntmachung zur Förderung von Forschungs- und Technologievorhaben im Rahmen des fünften nationalen zivilen Luftfahrtforschungsprogramms Zweiter Programmaufruf*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BAz AT 14.10.2014 B1).
- Grote, K.-H. & Feldhusen, J. (Hrsg.). (2014). *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Gwosch, T. (2019). Antriebsstrangprüfstände zur Ableitung von Konstruktionszielgrößen in der Produktentwicklung handgehaltener Power-Tools. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung* (Bd. 117). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Gwosch, T., Steck, M., Dörr, M. & Matthiesen, S. 2020. *Frontloading in Aircraft Development Process by Integration of a new Validation Method* (KIT Scientific Working Papers 139). Karlsruhe. <https://doi.org/10.5445/IR/1000117783>
- Gwosch, T., Steck, M. & Matthiesen, S. (2019). Virtual Coupling of Powertrain Components: New Applications in Testing. In U. Durak, C. Deatcu & J. Hettwer (Hrsg.), *ASIM-Workshop Simulation Technischer Systeme. Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation, Braunschweig* (S. 163–168). Wien: ARGESIM Verlag.
- Hartogh, P. & Vietor, T. (2017). Unterstützung des Entscheidungsprozesses in der Produktentwicklung additiv herzustellender Produkte mithilfe von Ähnlichkeitskennzahlen. In R. Lachmayer & R. B. Lippert (Hrsg.), *Additive Manufacturing Quantifiziert: Visionäre Anwendungen und Stand der Technik* (S. 49–68). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

- Herwig, H. (2016). *Strömungsmechanik. Einführung in die Physik von technischen Strömungen* (2. Aufl.). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-12982-8>
- Hilgert, J. (2005). *Anwendung der Ähnlichkeitstheorie zur experimentellen Eigenschaftsabsicherung eines Bahnplanungsverfahrens für Fahrzeugführungssysteme*. Dissertation. Universität Duisburg-Essen.
- Kaden, A., Walde, G., Bocher, B. & Luchner, R. (2012). Hardware-in-the-Loop - Simulation als Bestandteil des Entwicklungsprozesses für das automatische Flugsteuerungssystem der STEMME S15. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2012, September 2012, Berlin*.
- Karpenko, M. & Sepehri, N. (2009). Hardware-in-the-Loop Simulator for Research on Fault Tolerant Control of Electrohydraulic Actuators in a Flight Control Application. *Mechatronics*, 19(7), 1067–1077. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2009.01.008>
- Karthus, C., Binz, H. & Roth, D. (2015). *Studie zur Kooperation und zum Informationsaustausch zwischen Konstruktions- und Erprobungsabteilungen* (Bericht des Instituts für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Bd. 628). Stuttgart: Universität Stuttgart.
- Kobus, H. (1974). Anwendung der Dimensionsanalyse in der experimentellen Forschung des Bauingenieurwesens. *Bautechnik*, (51), 88–94.
<https://doi.org/10.18419/opus-8279>
- Koschorrek, R. (2007). *Systematisches Konzipieren mittels Ähnlichkeitsmethoden am Beispiel von PKW-Karosserien* (Dissertation TU Braunschweig, Bd. 72). Berlin: Logos-Verlag.
- Krause, D. & Gebhardt, N. (2018). *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien. Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln* (1. Aufl.). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53040-5>
- Lackmann, J. & Villwock, J. (2014). Ähnlichkeitsmechanik. In K.-H. Grote & J. Feldhusen (Hrsg.), *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau* (S. 78–80). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38891-0_10

- Lapapong, S., Gupta, V., Callejas, E. & Brennan, S. (2009). Fidelity of Using Scaled Vehicles for Chassis Dynamic Studies. *Vehicle System Dynamics*, 47(11), 1401–1437. <https://doi.org/10.1080/00423110802687604>
- Lehmann, T. (1959). Die Grundlagen der Ähnlichkeitsmechanik und Beispiele für ihre Anwendung beim Entwerfen von Werkzeugmaschinen der mechanischen Umformtechnik. *Konstruktion*, 11(12), 465–473.
- Leitenberger, F., Steck, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2021). Investigations to Consider Thermal Interactions Between Spatially Separated Subsystems: Concept of a Thermal Coupling System for X-in-the-Loop Test Benches. *Proceedings of the ASME 2021 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 11: Heat Transfer and Thermal Engineering. November 1–5, 2021*. <https://doi.org/10.1115/IMECE2021-69159>
- Lentijo, S., D'Arco, S. & Monti, A. (2010). Comparing the Dynamic Performances of Power Hardware-in-the-Loop Interfaces. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(4), 1195–1207. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2027246>
- Liebig, S., Helduser, S., Stüwing, M. & Dronka, S. (2001). Die Modellierung und Simulation gekoppelter mechanischer und hydraulischer Systeme. *Tagungsband Verkehr und Mobilität in der Informationsgesellschaft: 18. Verkehrswissenschaftliche Tage, 17. und 18. September 2001, Dresden*.
- Lindemann, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01423-9>
- Lotz, J. (2017). *Beherrschung von Unsicherheit in der Baureihenentwicklung. Dissertation*. Technische Universität, Darmstadt.
- Mach, E. (1917). Die Ähnlichkeit und die Analogie als Leitmotiv der Forschung. *Annalen der Naturphilosophie*, 1(14), 5–14.
- Maclay, D. (1997). Simulation Gets into the Loop. *IEEE Review*, 43(3), 109–112. <https://doi.org/10.1049/ir:19970312>
- Matthiesen, S. (2021). Gestaltung – Prozess und Methoden. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (9. Aufl., S. 397–465). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_13

- Matthiesen, S., Behrendt, M., Gwosch, T., Bruchmueller, T. & Schaefer, T. (2018). *IPEK-XiL-Ansatz und IPEK-XiL-Framework für Power-Tools*. <https://doi.org/10.5445/IR/1000080086>
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Sturm, C. & Steck, M. (2018). From Reality to Simulation – Using the C&C2-Approach to Support the Modelling of a Dynamic System. *Procedia CIRP*, 70(4), 475–480. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.039>
- Matthiesen, S., Gwosch, T., Mangold, S., Dültgen, P., Pelshenke, C. & Gittel, H.-J. (2017). Realitätsnahe Komponententests zur Unterstützung der Produktentwicklung bei der Validierung von Power-Tools. *Konstruktion*, 69(7/8), 76–81.
- Matthiesen, S., Gwosch, T., Mangold, S., Grauberger, P., Steck, M. & Cersowsky, S. (2017). Frontloading in der Produktentwicklung von Power-Tools durch frühe Validierung mit Hilfe von leistungsskalierten Prototypen. In W. Bauer, D. Spath, H. Binz, B. Bertsche & T. Maier (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2017*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Matthiesen, S., Gwosch, T. & Steck, M. (2019). *Digitaler Entwicklungsprozess - Entwicklung einer Validierungsmethode zur funktionalen Überprüfung von skalierten Versuchsmustern in einer HiL-Plattform. Schlussbericht zum Forschungsprojekt EFFPRO_4.0: Luftfahrtforschungsprogramm LuFo V-2. Aufruf*. Hannover: Technische Informationsbibliothek (TIB). <https://doi.org/10.2314/KXP:172524487X>
- Matthiesen, S., Mangold, S., Bruchmüller, T. & Marko, A.-M. (2014). Der Mensch als zentrales Teilsystem in Wechselwirkung mit handgehaltenen Geräten – Ein problemorientierter Ansatz zur Untersuchung dieser Schnittstelle. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X - Beiträge zum 25. DfX-Symposium* (Bd. 25, S. 193–204). Hamburg: TuTech Verlag.
- Matthiesen, S., Mangold, S. & Zumstein, T. (2016). Ein anpassbares Hand-Arm Modell mit rotatorischem Freiheitsgrad zur Validierung handgenähter Geräte. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Humanschwingungen 2016* (VDI-Berichte, Bd. 2277, S. 95–110). Düsseldorf: VDI-Verlag. <https://doi.org/10.51202/9783181022771-95>

- Matthiesen, S., Schaefer, T., Mangold, S. & Durow, W. (2013). X-in-the-Loop in der Gerätebranche -Ein ganzheitliches Validierungsframework unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Anwender, Gerät und Anwendung. In D. Spath, B. Bertsche & H. Binz (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2013*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- McMahon, T. A. & Bonner, J. T. (1983). *On Size and Life* (Scientific American library, Bd. 7). New York: Scientific American Books.
- Merziger, G. (2014). *Formeln + Hilfen höhere Mathematik* (7. Aufl.). Barsinghausen: Binomi-Verlag.
- Moog, W. (1985). *Ähnlichkeits- und Analogielehre*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Nickel, D., Behrendt, M., Bause, K. & Albers, A. (2018). Connected testbeds – Early validation in a distributed development environment. In M. Bargende, H.-C. Reuss & J. Wiedemann (Hrsg.), *18. Internationales Stuttgarter Symposium* (S. 1173–1185). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
https://doi.org/10.1007/978-3-658-21194-3_90
- Nitsche, W. & Brunn, A. (2006). *Strömungsmesstechnik* (2., aktualisierte und bearbeitete Aufl.). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/3-540-32487-9>
- Pahl, G. & Beitz, W. (1974). Baureihenentwicklung. *Konstruktion*, 26(2), 71–79 und 113–118.
- Pahl, G. & Zhang, Z. (1984). Dynamische und thermische Ähnlichkeit in Baureihen von Schaltkupplungen. *Konstruktion*, 36(11), 421–426.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (2003). Entwickeln von Baureihen und Baukästen. In G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.-H. Grote & K.-H. Grote (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung* (5., neu bearbeitete und erweiterte Aufl., S. 600–660). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-662-09186-9_10
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (2007). *Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung: Methoden und Anwendung* (7. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-34061-4>

- Paulweber, M. & Lebert, K. (2014). *Mess- und Prüfstandstechnik. Antriebsstrangentwicklung, Hybridisierung, Elektrifizierung*. Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-04453-4>
- Pawlowski, J. (1971). *Die Ähnlichkeitstheorie in der physikalisch-technischen Forschung*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-65095-6>
- Petersheim, M. D. & Brennan, S. N. (2009). Scaling of hybrid-electric vehicle powertrain components for hardware-in-the-loop simulation. *Mechatronics*, 19(7), 1078–1090. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2009.08.001>
- Ponn, J. & Lindemann, U. (2011). *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungs-lösungen* (VDI-Buch, 2. Aufl.). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20580-4>
- Powell, B. K., Lawson, G. P. & Hogh, G. (1988). Advanced Real-Time Powertrain Systems Analysis. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 110(3), 325–333. <https://doi.org/10.1115/1.3240125>
- Reuter, J. & Zimmer, E. (2015). E/E-Architekturen top-down und damit ganzheitlich bewerten. *ATZelektronik*, 10(1), 52–57. <https://doi.org/10.1007/s35658-015-0505-1>
- Riabouchinsky, D. (1911). Méthode des variables de dimension zéro et son application en aérodynamique. *L'Aérophile*, 407–408.
- Robert Bosch Power Tools GmbH. (2014). *Produktdatenblatt GSR 18-2-LI*. Leinfelden-Echterdingen. Zugriff am 07.07.2021. Verfügbar unter: <https://www.bosch-professional.com/ch/de/pdf/productdata/gsr-18-2-li-sheet.pdf>
- Robert Bosch Power Tools GmbH. (2016). *Produktdatenblatt GSR 10 8-2-LI*. Leinfelden-Echterdingen. Zugriff am 07.07.2021. Verfügbar unter: <https://www.bosch-professional.com/de/de/archive/gsr-10-8-v-li-2-16834-p/>
- Rudolph, S. (1995). *Eine Methodik zur systematischen Bewertung von Konstruktionen*. Dissertation Universität Stuttgart. Düsseldorf: VDI-Verlag.

- Schrandt, C., Schulz, A., Beckert, M. & Koppa, P. (2017). Berstdruckbestimmung an additiv gefertigten Bauteilen. In H. A. Richard, B. Schramm & T. Zipsner (Hrsg.), *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen* (S. 75–86). Wiesbaden: Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-17780-5_5
- Schweizer, H. H. (Hrsg.). (2003). *Elektrowerkzeuge und ihre Anwendung. 1500 Fragen und Antworten* (1. Aufl.). Konstanz: Christiani-Verlag.
- Sedov, L. I. (1993). *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics* (10. Aufl.). Florida, USA: CRC Press.
- Shannon, R. E. (1998). Introduction to the Art and Science of Simulation. *Proceedings 1998 Winter Simulation Conference, 13-16 Dez, 7–14*. <https://doi.org/10.1109/WSC.1998.744892>
- Siebertz, K., van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2010). *Statistische Versuchspaltung. Design of Experiments (DoE)* (VDI-Buch, 1. Aufl.). Heidelberg: Springer-Verlag.
- Simon, H. A. (1996). *The Sciences of the Artificial* (3. Aufl.). Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press.
- Sivaloganathan, S. & Shahin, T. M. M. (1999). Design Reuse: An overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 213(7), 641–654. <https://doi.org/10.1243/0954405991517092>
- Skjetne, R. & Egeland, O. (2005). Hardware-In-the-Loop Simulation for Testing of DP Vessels. *Proceedings International Conference on Technology and Operation of Offshore Support Vessels*.
- Spurk, J. H. (1992). *Dimensionsanalyse in der Strömungslehre*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer-Verlag.
- Steck, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2019). Frontloading in der Produktentwicklung handgehaltener Power-Tools – Lastmodelle für den Einsatz in Antriebsstrangprüfständen. *Konstruktion*, 71(5), 83–90. <https://doi.org/10.37544/0720-5953-2019-05-83>

- Steck, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2020). Scaling of Rotational Quantities for Simultaneous Testing of Powertrain Subsystems with Different Scaling on a X-in-the-Loop Test Bench. *Mechatronics*, 71(102425). <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102425>
- Steck, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2021). Compensation of Mass-Based Effects in Component Scaling on a Hardware-in-the-Loop Test Bench by Virtual Inertia. *Mechatronics*, 78(102622). <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102622>
- Steck, M., Matthiesen, S. & Gwosch, T. (2022). Functional Investigation of Geometrically Scaled Drive Components by X-in-the-Loop Testing with Scaled Prototypes. *Machines*, 10(3), 165. <https://doi.org/10.3390/machines10030165>
- Steck, M., Paland, D., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2021). Simulation Model of a Torque-Limiting Clutch with Adjustable Design Parameters to Investigate the Release Behavior. In X. Liu-Henke & U. Durak (Hrsg.), *Tagungsband ASIM Workshop STS/GMMS/EDU 2021* (S. 141–147). Wien: ARGESIM Verlag.
- Stichlmair, J. (1990). *Kennzahlen und Ähnlichkeitsgesetze im Ingenieurwesen*. Essen: Altos-Verlag.
- Stratasys. (2021a). *PolyJet 3D-Drucktechnologie*. Zugriff am 06.09.2021. Verfügbar unter: <https://www.stratasys.com/de/polyjet-technology>
- Stratasys. (2021b). *Vero Material Data Sheet*. Zugriff am 06.09.2021. Verfügbar unter: <https://www.stratasys.com/de/materials/search/vero>
- Sturm, C., Steck, M., Bremer, F., Revfi, S., Nelius, T., Gwosch, T. et al. (2021). Creation Of Digital Twins - Key Characteristics of Physical to Virtual Twinning in Mechatronic Product Development. *Proceedings of the Design Society*, 1, 781–790. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.78>
- Tan, Q.-M. (2011). *Dimensional Analysis. With Case Studies in Mechanics*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19234-0>
- Thomke, S. & Bell, D. E. (2001). Sequential Testing in Product Development. *Management Science*, 47(2), 308–323. <https://doi.org/10.1287/mnsc.47.2.308.9838>

- Thomke, S. & Fujimoto, T. (2000). The Effect of “Front-Loading” Problem-Solving on Product Development Performance. *Journal of Product Innovation Management*, 17(2), 128–142.
- Unger, J. & Leyer, S. (2015). *Dimensionshomogenität. Erkenntnis ohne Wissen?* Wiesbaden: Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-05412-0>
- Vaschy, A. (1892). Sur les lois de similitude en physique. *Annales Télégraphiques*, 19, 25–28.
- VDI 2206 (2004). *VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin: Beuth-Verlag.
- Walter, M., Heinke, S., Buscher, M., Schwandtner, S. & Leonhardt, S. (2013). Hardware in the Loop Prüfstand für mechatronische Herzunterstützungssysteme. In T. Bertram, B. Corves & K. Janschek (Hrsg.), *Fachtagung Mechatronik 2013. Tagungsband, Aachen* (S. 153–157). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Weber, M. (1940). Das Ähnlichkeitsprinzip der Physik und seine Bedeutung für das Modellversuchswesen. *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens*, 11(2), 49–58. <https://doi.org/10.1007/BF02585059>
- Weber, M. (1919). *Die Grundlagen der Ähnlichkeitsmechanik und ihre Verwertung bei Modellversuchen*. Dissertation Technischen Hochschule Braunschweig. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-42525-1>
- Weber, M. (1930). Das Allgemeine Ähnlichkeitsprinzip der Physik und sein Zusammenhang mit der Dimensionslehre und der Modellwissenschaft. In Schiffbau-technischen Gesellschaft (Hrsg.), *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*. 31. Band (S. 274–354). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-92021-9_14
- Wittel, H., Muhs, D., Jannasch, D. & Voßiek, J. (2013). *Roloff/Matek Maschinenelemente – Normung, Berechnung, Gestaltung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Wolniak, P., Mozgova, I. & Lachmayer, R. (2018). Concept for the Implementation of a Scaling Strategy into the Paradigm of Technical Inheritance. *Procedia Manufacturing*, 24, 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.012>

- Wyatt, D. F., Eckert, C. M. & Clarkson, P. J. (2009). Design of Product Architectures in Incrementally Developed Complex Products. In M. Norell Bergendahl, M. Grimheden, L. Leifer, P. Skogstad & U. Lindemann (Hrsg.), *Proceedings of ICED'09, the 17th International Conference on Engineering Design, Product and Systems Design*. (4. Aufl., S. 167–178). Palo Alto, USA.
- Yan, S., Nickel, D., Behrendt, M. & Albers, A. (2017). Methodischer Ansatz zur Bewertung und Auswahl einer Validierungsumgebung. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X - Beiträge zum 28. DfX-Symposium Oktober 2017* (Bd. 29, S. 12). Hamburg: TuTech Verlag.
- You, Y. (2017). Eine Studie zur Implementierung des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes in der verteilten Fahrzeugentwicklung am Beispiel Antriebsstrangentwicklung. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung* (Bd. 107). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Zhu, W. D. & Teppo, L. J. (2003). Design and Analysis of a Scaled Model of a High-Rise, High-Speed Elevator. *Journal of Sound and Vibration*, 264(3), 707–731. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(02\)01218-X](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(02)01218-X)
- Zierep, J. (1992). *Ähnlichkeitsgesetze und Modellregeln der Strömungslehre* (Wissenschaft + Technik: Taschenausgabe, 3. Aufl.). Karlsruhe: Braun-Verlag.
- Zohuri, B. (2017). *Dimensional Analysis Beyond the Pi Theorem*. Cham, Schweiz: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45726-0>

Studentische Abschlussarbeiten die im Kontext dieser Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor Co-betreut wurden:

- Kempf, S. (2022). *Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Beschreibung des Sägeprozesses einer Handkreissäge*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Leitenberger, F. (2018). *Entwicklung von Ähnlichkeitsmodellen zur Größenskalierung von Prototypen*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

- Leitenberger, F. (2020). *Modellierung und Simulation thermischer Wechselwirkungen für den Einsatz in XiL-Prüfständen zur Koppelung eines digitalen Zwillings*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Mucha, M. (2018). *Systematische Auswahl partieller Ähnlichkeiten zur Validierung von skalierten Prototypen auf dem sCiL-Prüfstand*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Müller, M. (2020). *Entwicklung eines Vorgehens zur Auswahl eines Algorithmus für das datenbasierte Health Monitoring*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Paland, D. (2019). *Entwicklung eines Simulationsmodells einer Sperrkörperkuppelung*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Paland, D. (2021). *Implementierung und Bewertung der Skalierung von Massenträgheitsmomenten durch virtuelle Trägheit*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Panitz, T. (2021). *Validierung eines ersten Hyperloop-Prototyps durch frühe Abschätzung der Produkteigenschaften und Definition wichtiger Schlüsselkomponenten mittels Skalierung*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Schorb, V. (2020). *Regelervorauslegung gekoppelter Synchronmaschinen mithilfe eines digitalen Modells*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Winkler, E. (2019). *Anpassung von geometrisch teilähnlich skalierten Prototypen an reale Testumgebungen*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Ye, T. (2021). *Analyse des Einfluss der Temperatur auf das Funktionsverhalten eines PMSM mithilfe einer Simulation*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Veröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors entstanden sind:

- Leitenberger, F., Steck, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2021). Investigations to Consider Thermal Interactions Between Spatially Separated Subsystems: Concept of a Thermal Coupling System for X-in-the-Loop Test Benches. *Proceedings of the ASME 2021 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 11: Heat Transfer and Thermal Engineering. November 1–5, 2021*. <https://doi.org/10.1115/IMECE2021-69159>
- Gwosch, T., Steck, M., Dörr, M. & Matthiesen, S. 2020. *Frontloading in Aircraft Development Process by Integration of a new Validation Method* (KIT Scientific Working Papers 139). Karlsruhe. <https://doi.org/10.5445/IR/1000117783>
- Gwosch, T., Steck, M. & Matthiesen, S. (2019). Virtual Coupling of Powertrain Components: New Applications in Testing. In U. Durak, C. Deatcu & J. Hettwer (Hrsg.), *ASIM-Workshop Simulation Technischer Systeme. Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation, Braunschweig* (S. 163–168). Wien: ARGESIM Verlag.
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Sturm, C. & Steck, M. (2018). From Reality to Simulation – Using the C&C2-Approach to Support the Modelling of a Dynamic System. *Procedia CIRP*, 70(4), 475–480. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.039>
- Matthiesen, S., Gwosch, T., Mangold, S., Grauberger, P., Steck, M. & Cersowsky, S. (2017). Frontloading in der Produktentwicklung von Power-Tools durch frühe Validierung mit Hilfe von leistungsskalierten Prototypen. In W. Bauer, D. Spath, H. Binz, B. Bertsche & T. Maier (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2017*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Matthiesen, S., Gwosch, T. & Steck, M. (2019). *Digitaler Entwicklungsprozess - Entwicklung einer Validierungsmethode zur funktionalen Überprüfung von skalierten Versuchsmustern in einer HiL-Plattform. Schlussbericht zum Forschungsprojekt EFFPRO_4.0: Luftfahrtforschungsprogramm LuFo V-2. Aufruf*. Hannover: Technische Informationsbibliothek (TIB).
- Steck, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2019). Frontloading in der Produktentwicklung handgehaltener Power-Tools – Lastmodelle für den Einsatz in Antriebsstrangprüfständen. *Konstruktion*, 71(5), 83–90. <https://doi.org/10.37544/0720-5953-2019-05-83>

- Steck, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2020). Scaling of Rotational Quantities for Simultaneous Testing of Powertrain Subsystems with Different Scaling on a X-in-the-Loop Test Bench. *Mechatronics*, 71(102425). <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102425>
- Steck, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2021). Compensation of Mass-Based Effects in Component Scaling on a Hardware-in-the-Loop Test Bench by Virtual Inertia. *Mechatronics*, 78(102622). <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102622>
- Steck, M., Matthiesen, S. & Gwosch, T. (2022). Functional Investigation of Geometrically Scaled Drive Components by X-in-the-Loop Testing with Scaled Prototypes. *Machines*, 10(3), 165. <https://doi.org/10.3390/machines10030165>
- Steck, M., Paland, D., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2021). Simulation Model of a Torque-Limiting Clutch with Adjustable Design Parameters to Investigate the Release Behavior. In X. Liu-Henke & U. Durak (Hrsg.), *Tagungsband ASIM Workshop STS/GMMS/EDU 2021* (S. 141–147). Wien: ARGESIM Verlag.
- Sturm, C., Steck, M., Bremer, F., Revfi, S., Nelius, T., Gwosch, T. et al. (2021). Creation Of Digital Twins - Key Characteristics of Physical to Virtual Twinning in Mechatronic Product Development. *Proceedings of the Design Society*, 1, 781–790. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.78>

Glossar

Wechselwirkungen

Wechselwirkungen beschreiben die Beziehungen zwischen zwei Bauteilen aufgrund ihrer Eigenschaften. Diese Beziehungen können aus Stoff-, Energie- oder Informationsflüssen bestehen. Informationsfluss kann im Falle von technischen Systemen etwa die Verbindung zweier Bauteile beschreiben. Dies drückt sich vor allem durch die gegenseitige Lage im Raum, die aufeinander wirkenden Kräfte oder Bewegungen relativ zueinander aus. (Ehrlenspiel, 2017)

Handgehaltene Maschine / Power-Tools

Handgehaltene Maschinen umfassen elektrisch angetriebene Maschinen (nach DIN EN 62841-1 (VDE 0740-1): 2016-07 Absatz 3.24) und nicht elektrisch betriebene Maschinen (DIN EN ISO 11148-1:2012-06). Handgehaltene Maschinen werden auch als Power-Tools bezeichnet (Matthiesen, Gwosch, Mangold, Dültgen et al., 2017).

Kupplungsstufen

Über einen Einstellring kann das Auslösemoment der Kupplung in definierten Stufen gewählt werden. Diese „Kupplungsstufen“ hängen von der Federkraft der Kupplung ab.

Connected System

Ein Connected System bezeichnet im IPEK-XiL-Ansatzes ein mit dem zu untersuchenden System interagierendes System (Albers, Behrendt et al., 2016). Ein Connected System wird auch als Restsystem bezeichnet.

IPEK-XiL-Ansatz

Der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz (IPEK-XiL-Ansatz) ist ein Ansatz zur methodischen Unterstützung und Beschreibung von Validierungsaktivitäten. Nach dem Verständnis des IPEK-XiL-Ansatzes erfolgt die Validierung eines Teilsystems unter Berücksichtigung seiner Wechselwirkungen mit allen relevanten umgebenden Systemen. (Albers, Behrendt et al., 2016)

System-in-Development

Das System-in-Development bezeichnet in der Terminologie des IPEK-XiL-Ansatzes das physische und/oder virtuelle (Teil-)System, welches im Fokus

einer spezifischen Validierungsaktivität steht und über das dabei Erkenntnisse gewonnen werden sollen. (Albers, Behrendt et al., 2016)

Validierung

Validierung bezeichnet bezogen auf technische Systeme die „Prüfung [...], ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt“ (VDI 2206, S. 39, 2004) Die Validierung geht damit über die Verifikation, also den formalen Abgleich der technischen Lösung mit der Spezifikation, hinaus. Die Validierung beantwortet die Frage, ob das richtige Produkt entwickelt wird, während die Verifikation die Antwort auf die Frage liefert, ob ein korrektes Produkt entwickelt wird. (Albers, Behrendt et al., 2016)

Skalierungsmodell

Virtuelles Modell, um zwischen den Koppelsystemen eine unabhängige Anpassung der Leistungsgrößen zu ermöglichen. Die Verrechnung der Leistungsgrößen erfolgt über Skalierungsfaktoren.

Skalierungsfaktoren

Unter Skalierungsfaktoren werden im Rahmen dieser Arbeit Faktoren verstanden, die innerhalb der Skalierungsmodelle zur Verrechnung der Leistungsgrößen genutzt werden. Die Skalierungsfaktoren werden durch Dimensionsanalyse abgeleitet und können auf Ähnlichkeitsfaktoren basieren.

Symbolverzeichnis

| Zeichen | Einheit | Beschreibung |
|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <i>Lateinische Symbole</i> | | |
| a | m/s ² | Beschleunigung |
| A | m ² | Fläche |
| c_{trans} | kg/s ² | translatorische Federsteifigkeit |
| c_{rot} | (kg m ²)/s ² | rotatorische Federsteifigkeit |
| d_{trans} | (kg m ²)/s | translatorische Dämpfungskonstante |
| d_{rot} | kg/s | rotatorische Dämpfungskonstante |
| d | m | Durchmesser |
| D | - | Dämpfungsgrad |
| E | Pa | Elastizitätsmodul |
| f | - | relative Abweichung |
| F | N | Kraft |
| g | m/s ² | Erdbeschleunigung |
| G | Pa | Schubmodul |
| J | kg m ² | Massenträgheitsmoment |
| l | m | geometrische Abmessungen |
| m | kg | Masse |
| M | Nm | Drehmoment |
| p | Pa | Flächenpressung |
| P | W | Leistung |
| t | s | Zeit |
| s | - | Skalierungsfaktor |
| v | m/s | Geschwindigkeit |
| U | V | Spannung (elektrisch) |
| x | - | beliebige Relevanzgröße |
| M | | Dimension der Masse |
| L | | Dimension der Länge |
| T | | Dimension der Zeit |
| <i>Griechische Symbole</i> | | |
| α | - | Exponent zur Bestimmung der dimensionslosen Kennzahlen |

| | | |
|------------------|--------------------|----------------------------------------|
| α_k | - | Formzahl (Kerbwirkung) |
| δ | - | dimensionsloser Faktor |
| ε | - | Dehnung |
| θ | K | Temperatur |
| μ_0 | - | Haftreibungskoeffizient |
| ν | - | Poisson-Zahl bzw. Querkontraktionszahl |
| π | - | Kreiszahl Pi |
| ρ | kg/m ³ | Dichte |
| σ | Pa | Spannung |
| φ | rad | Winkel |
| $\dot{\varphi}$ | rad/s | Winkelgeschwindigkeit |
| $\ddot{\varphi}$ | rad/s ² | Winkelbeschleunigung |
| ω_0 | Hz | Eigenkreisfrequenz |
| Π | - | dimensionslose Kennzahl |
| Δ | - | Differenz zweier Zustände |

| Zeichen | Beschreibung |
|----------------|---------------------|
|----------------|---------------------|

Ähnlichkeitskennzahlen

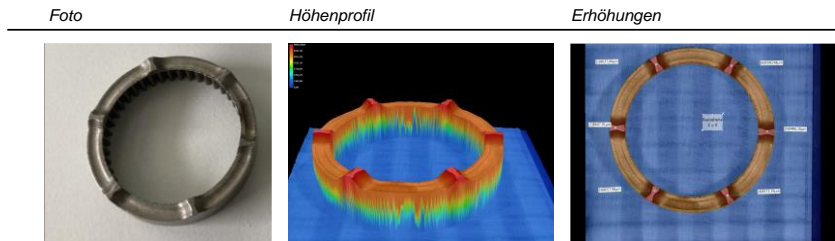
| | |
|----|--------|
| Ho | Hooke |
| Ne | Newton |
| Ca | Cauchy |
| Fr | Froude |

Indizes

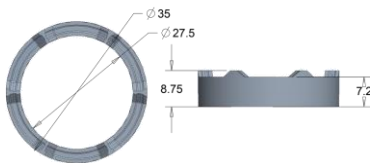
| | |
|-------|-------------------------|
| H | Hauptausführung |
| M | Modellausführung |
| E | elastisch |
| T | Trägheit |
| z | Zahnrad |
| w | Welle |
| red | reduziert |
| rot | rotatorisch |
| trans | translatorisch |
| x | beliebige Relevanzgröße |

A Anhang – Beispieluntersuchungen

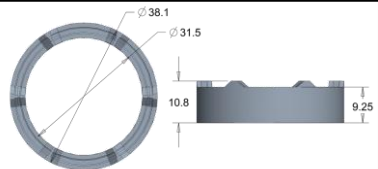
A1 Vergleich Getriebevarianten



Referenz 10 V



Referenz 18 V



Version 10 V - Referenz

| Name | Abk. | Eigenschaften |
|---------------------|--------------------|-------------------------------|
| Referenz 10 V "alt" | R10 0 K | Höhe: 8,38 mm Masse: 2,03g |
| Referenz 10 V | R10 I K (zerstört) | Höhe: 8,61 mm Masse: 2,08g |

| | | |
|---------------|-------------|--------------------------------|
| Referenz 10 V | R10 II K | Höhe: 8,72 Masse: 2,08g |
| Referenz 10 V | R10 S clean | Höhe: 8,56 mm Masse: 12,46g |
| Referenz 10 V | R10 III K | Höhe: 8,65 Masse: 2,15g |
| Referenz 10 V | R10 IV K | Höhe: 8,72 Masse: 2,16g |

Version 18 V - Referenz

| | | |
|---------------|----------|------------------------------|
| Referenz 18 V | R18 I K | Höhe: 10,75 Masse: 3,35g |
| Referenz 18 V | R18 II K | Höhe: 10,75 Masse: 3,35g |
| Referenz 18 V | R18 S | Höhe: 10,71 Masse: 20,51g |

Version 10 V - Tasche

| | | |
|-------------|-----------|--------------------------------|
| Tasche 10 V | T10 I K | Höhe: 8,38 mm Masse: 2,35 g |
| Tasche 10 V | T10 II K | Höhe: 8,38 mm Masse: 2,41 g |
| Tasche 10 V | T10 III K | Höhe: 8,27 mm Masse: 2,35 g |
| Tasche 10 V | T10 IV K | Höhe: 8,27 mm Masse: 2,35 g |

Version 18 V - Tasche

| | | |
|-------------|---------|--------------------------------|
| Tasche 18 V | T18 I K | Höhe: 10,47 mm Masse: 3,7 g |
|-------------|---------|--------------------------------|

| | | |
|-------------|----------|--------------------------------|
| Tasche 18 V | T18 II K | Höhe: 10,47 mm Masse: 3,7 g |
|-------------|----------|--------------------------------|

Materialunterschiede

| | Serienbauteile | Prototypen |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Material | Stahl gesintert | Photopolymere (Duroplaste) |
| Beschreibung | feinkörnige metallische Stoffe feinkörnige Oberfläche, teilweise verschmolzene Körner | Schichtweiser Aufbau, photochemische Härtung des Materials durch Vernetzung, glatte Oberfläche, |
| Verwendung | bei Serienteilen | bei Prototypen Polyjet 3D-Druck (Stratasys, 2021a) |

A2 Untersuchungsumgebung

Für eine weitere Beschreibung des Prüfstandes und der verwendeten Hardware wird auf publizierte Literatur verwiesen (Gwosch, 2019; Gwosch et al., 2019; Steck et al., 2020, 2021).

Umgebung

Unterschiede der Untersuchungsumgebung zu bekannten XiL-Anordnungen werden in nachfolgender Abbildung A.1 dargestellt.

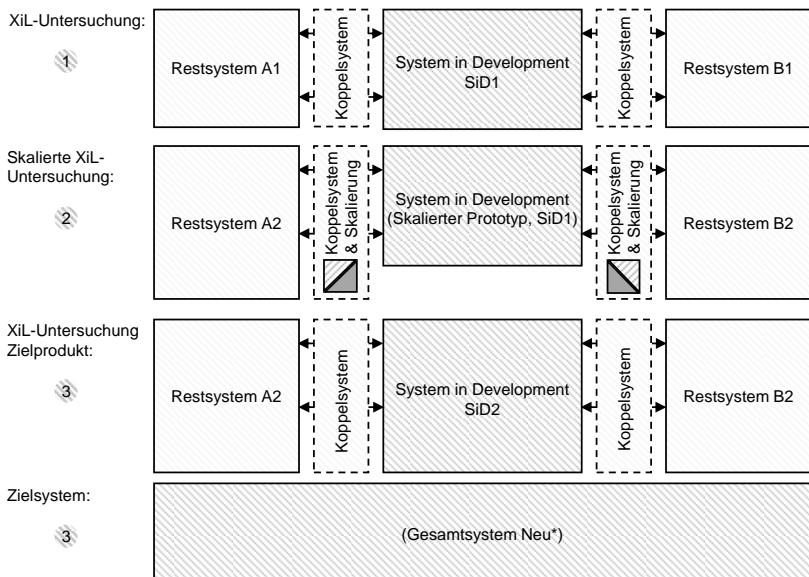


Abbildung A.1: Untersuchungsumgebung und zeitliche Anordnung der möglichen Versuche zur Absicherung.

A3 Untersuchungsumgebung für TF 1

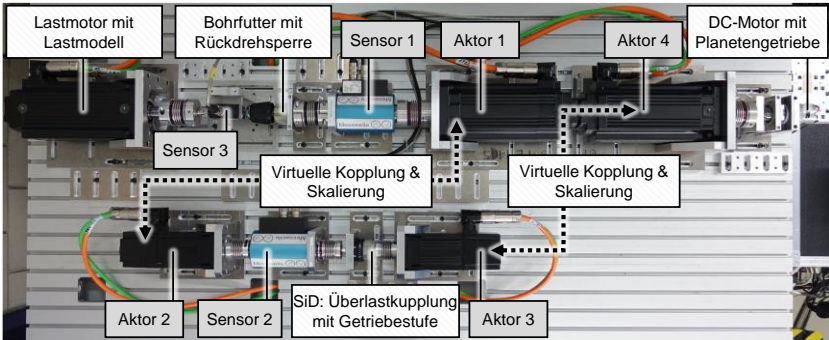


Abbildung A.2: Foto Untersuchungsumgebung TF 1

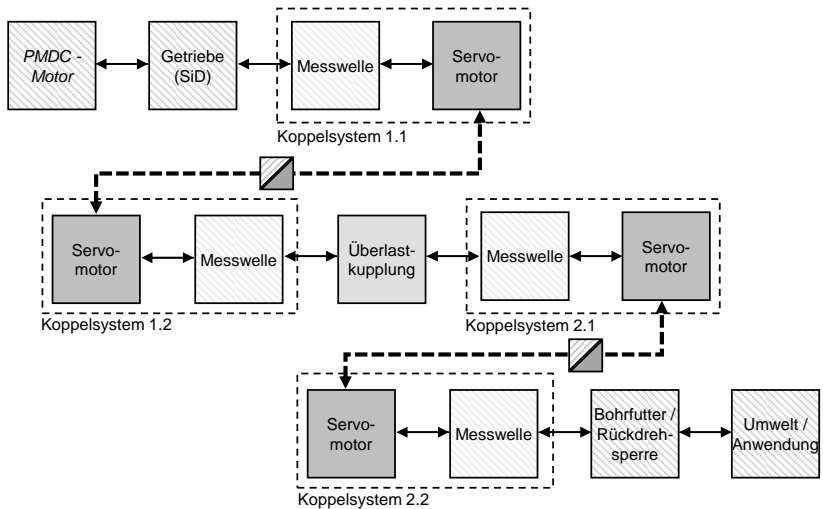


Abbildung A.3: Benennung und Anordnung der Komponenten TF 1

A4 Untersuchungsumgebung für TF 2 und TF 3

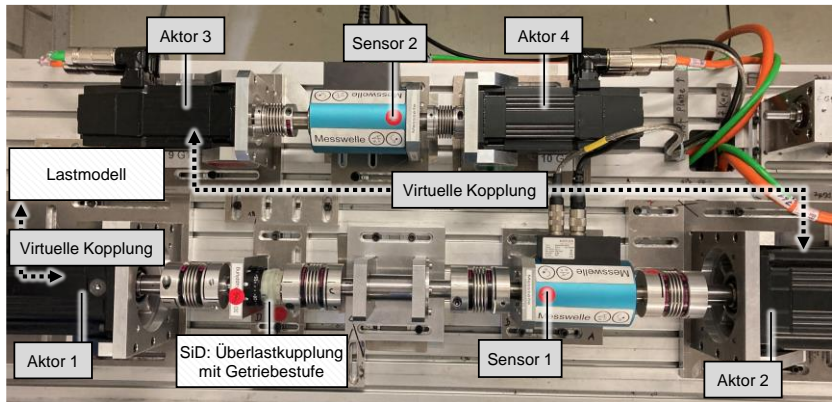


Abbildung A.4: Foto Untersuchungsumgebung TF 2 und TF 3

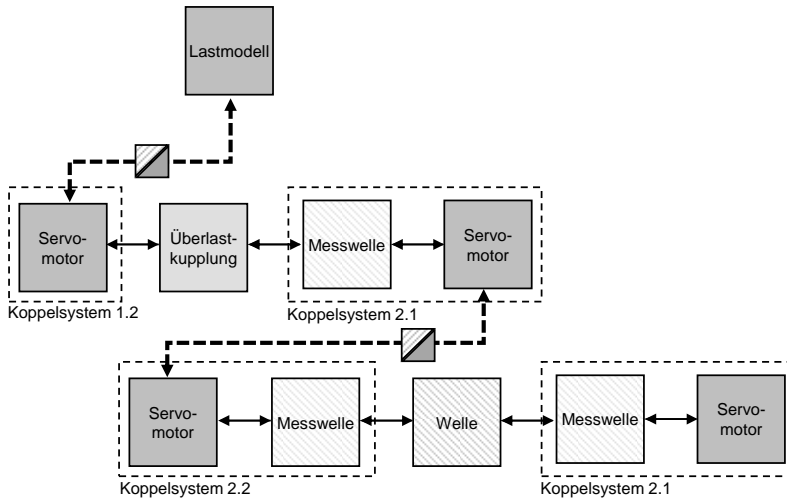


Abbildung A.5: Benennung der Komponenten TF 2 und TF 3

B Anhang – Validierungsmethode

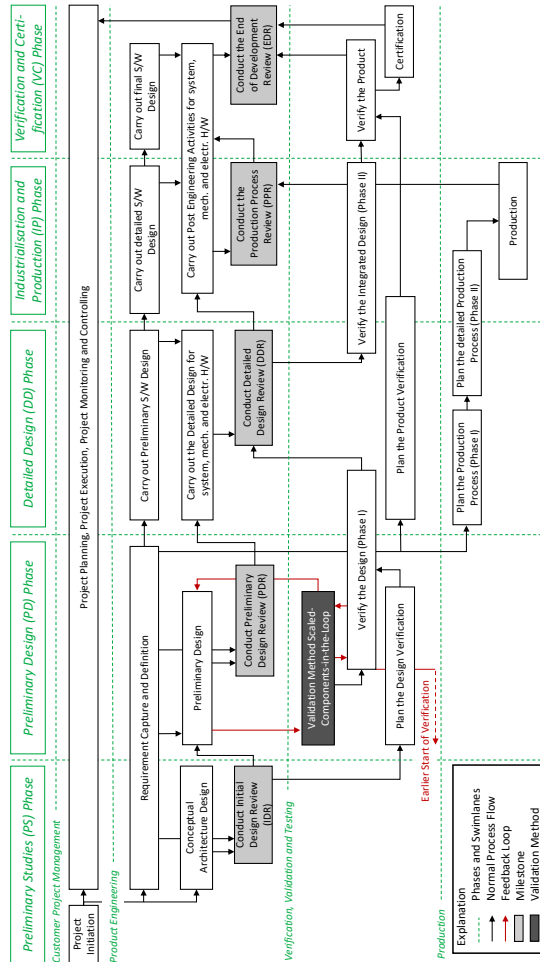


Abbildung B.6: Einordnung der Validierungsmethode in einen Luftfahrtentwicklungsprozess (Gwosch et al. 2020)

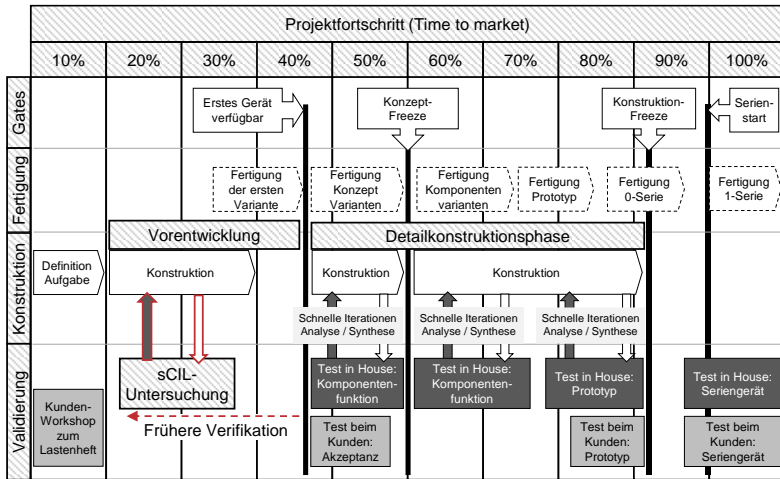


Abbildung B.7: Einordnung der Validierungsmethode in einen Produktentwicklungsprozess für Elektrowerkzeuge. Erweiterte Darstellung aus Matthiesen et al. (2016)

