

Frontloading in der Produktentwicklung von Power-Tools durch frühe Validierung mit Hilfe von leistungsskalierten Prototypen

Sven Matthiesen¹, Thomas Gwosch¹, Sebastian Mangold¹, Patric Grauberger¹, Michael Steck¹, Stefan Cersowsky²

¹KIT, IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe, Deutschland
Sven.Matthiesen@kit.edu

²Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH, 88161 Lindenberg, Deutschland
Stefan.Cersowsky@liebherr.com

Abstract: Derzeit geschieht Frontloading, also der frühe Erkenntnisgewinn, in der Produktentwicklung häufig simulativ über Berechnungstools, durch Rapid-Prototyping und durch den Einsatz von Hardware-Prüfständen. Während Simulationen oft komplexe Modelle erfordern, ist der Einsatz von Prototypen aus Rapid-Prototyping Verfahren bislang oft auf Grund der limitierten Beanspruchbarkeit sowohl in Prüfständen, als auch frühen Funktionstests nur eingeschränkt möglich. Ziel der hier vorgestellten IPEK-sCiL-Methode ist es, eine Validierungsmethode für Prototypen mit geringer Beanspruchbarkeit bereitzustellen. Der Einsatz von leistungsskalierten Prototypen soll im Vorgängerprodukt durch eine Skalierung des Leistungsflusses auf HiL-Plattformen ermöglicht werden. Die Methode wird am Beispielsystem Akkubohrschrauber zur Untersuchung von leistungsskalierten Prototypen der Sperrkörperkupplung gezeigt.

Keywords:

Frontloading, Testing, Akkubohrschrauber, Power-Tools, Leistungsskalierung, Prototypen, HiL, IPEK-XiL, IPEK-sCiL, Methodenentwicklung

1 Motivation

Die Verlagerung von Entwicklungsentscheidungen und -tätigkeiten in frühere Entwicklungsphasen wird als Frontloading bezeichnet (Albers et al. 2016a). Frontloading geschieht derzeit im Entwicklungsprozess häufig simulativ über Berechnungstools, auf Bauteilebene durch Rapid-Prototyping und auf Teilsystemebene durch den Einsatz von Komponentenprüfständen. Allen Methoden des Frontloadings ist hierbei gemein, dass der Erkenntnisgewinn durch eine vorgelagerte Validierung möglichst früh im Entwicklungsprozess herbeigeführt wird. Das Testing oder die frühe Validierung hat hierbei das Ziel, neu entwickelte Ideen möglichst frühzeitig auf deren Umsetzbarkeit in einem Produkt und dessen Funktionsfähigkeit zu überprüfen. Dadurch werden Wissenslücken geschlossen und damit die Sicherheit der zukünftigen Funktionserfüllung erhöht (Albers et al. 2016a). So schlägt Meboldt et al. vor, dass Iterationen in den frühen Stadien des Entwicklungsprozesses durch Validierung provoziert werden sollten (Meboldt et al. 2012).

In der Entwicklung ist oft die Simulation der günstigste und schnellste Schritt zur frühen Überprüfung der Anforderungserfüllung. Berechnungstools können jedoch oftmals das Systemverhalten nicht ausreichend genau abbilden. Im Speziellen die Interaktion zwischen Bauteilen, wie beispielsweise die Schwingungsanregung im System durch tribologische Kontakte, lassen sich oft nicht mit der notwendigen Detaillierung darstellen oder nur durch sehr hohen Modellierungsaufwand. Das frühe Testing leistet deshalb neben der Simulation einen wichtigen Beitrag zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit von Produkten. Häufig finden solche Untersuchungen in XiL-Prüfständen statt, in denen noch nicht vorhandene angrenzende Teilsysteme oder Umwelteinflüsse hinzusimuliert werden können (Albers et al. 2008; Matthiesen et al. 2013; Albers et al. 2016a). Diese XiL-Prüfstände finden sowohl in der Automobilindustrie als auch der Flugzeugindustrie für die Untersuchung von Teilsystemen schon breite Anwendung. Für die Verwendung in HiL-Umgebungen sind jedoch mechanisch belastbare und funktionsfähige Prototypen notwendig. Dies steht im Spannungsfeld zur eher niedrigen mechanischen Beanspruchbarkeit kostengünstiger früher Funktionsmuster und Prototypen,

die beispielsweise durch additive Fertigungsverfahren oder in der Musterfertigung mit alternativen Fertigungsverfahren entstehen. Diese Funktionsmuster sind in ihrer Beanspruchbarkeit gegenüber dem Serienfertigungsverfahren oft stark reduziert, was ihren Einsatz in XiL-Prüfständen sowie frühen Funktionstests der Gesamtsysteme erschwert. Diese Prototypen können nur mit skaliertem Leistungsaufschlag beaufschlagt werden, da ihre Beanspruchbarkeit geringer ist. Sie werden deshalb im Weiteren als skalierte Prototypen bezeichnet.

Ziel dieses Beitrags ist es, einen Ansatz vorzustellen, welcher die Validierung von skalierten Prototypen, die in ihrer Beanspruchbarkeit reduziert sind, durch Prüfstände ermöglicht. Kern des Ansatzes ist die Nutzung einer Leistungsskalierung unter dem Einbezug von Vorgängerprodukten. Durch die dabei eingesetzte Methode wird es erstmals möglich, mechanisch noch nicht voll belastbare Komponenten unter dem Einsatz von Hardware-Prüfständen und der Simulation des Leistungsflusses in Vorgängerprodukten zu integrieren. Dies ermöglicht insbesondere bei der Produktgenerationsentwicklung (vgl. Albers et al. 2015) die Überprüfung von Produktfunktionen in sehr frühen Phasen der Produktentwicklung.

2 Stand der Forschung

Validierung stellt eine zentrale Aktivität in der Produktentwicklung dar. Durch sie wird ein stetiger Abgleich zwischen den Zielen und dem Zweck des Produktes sowie dem jeweils erreichten Entwicklungsstand durchgeführt. Sie wird bislang methodisch noch nicht ausreichend unterstützt (Albers et al. 2016a; Matthiesen et al. 2016).

Hardware-in-the-Loop-Methoden werden seit einigen Jahren bei der Entwicklung und Validierung von Reglern für Flugsteuerungen eingesetzt. Beispiele hierfür sind in (Karpenko und Sepehri 2006) und (Kaden et al. 2012) vorgestellt. Hierbei werden Regelalgorithmen nicht nur in rein virtuellen Validierungsumgebungen mit Hilfe einer virtuellen Regelstrecke untersucht, sondern durch Hardwarekomponenten ergänzt. Beispielsweise kann das Originalsteuergerät inkl. Motor durch Aktoren und Sensoren in Ersatzsystemen getestet werden.

Das HiL-Konzept, das im ursprünglichen Sinne für die Validierungsaktivitäten von Steuergeräten eingesetzt wird, wurde zum IPEK-X-in-the-Loop-(IPEK-XiL)-Ansatz nach Albers (Albers et al. 2008a; Albers et al. 2016a) weiterentwickelt und kann auch auf andere zu entwickelnde Teilsysteme (als X bezeichnet) angewendet werden. Die Kopplung des zu entwickelnden Teilsystems mit dem Restsystem geschieht über Koppelsysteme in Form von Hardwareschnittstellen mithilfe von Sensoren und Aktoren. Der IPEK-XiL-Ansatz ermöglicht es, die bestehenden Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Systemen zu berücksichtigen und unterstützt bei der Validierung eines Teilsystems seine Einbindung in das Gesamtsystem.

Die verschiedenen Teilsysteme können dabei rein virtueller, rein physischer oder auch gemischt physisch-virtueller Ausprägungen sein. Das „X“ ist hierbei definiert als das physische und/oder virtuelle (Teil)-System, welches als System-in-Development im Fokus einer spezifischen Validierungsaktivität steht und über welches Erkenntnisse gewonnen werden sollen (Albers et al. 2016a).

Bei der Entwicklung eines handgehaltenen Gerätes (Power-Tool) muss das Gesamtsystem, bestehend aus Anwender, Gerät und Anwendung ganzheitlich betrachtet werden. Dies liegt vor allem an der Tatsache, dass Wechselwirkungen von Anwendung, Anwender und Gerät die Funktionalität stark beeinflussen (Matthiesen et al. 2013).

Ein Erfolgsfaktor der Produktentwicklung ist das so genannte Frontloading, in dem Entwicklungsentscheidungen und -tätigkeiten in frühere Entwicklungsphasen verlegt, dadurch Wissenslücken geschlossen und damit Unsicherheiten begrenzt werden (Albers et al. 2016a; Thomke und Fujimoto 2000). Es existiert Bedarf an Methoden zur Einbindung von skalierten Prototypen in den IPEK-XiL-Ansatz für die frühen Phasen der Produktentwicklung, da gerade in den frühen Phasen neben Simulationsstudien oftmals nur Prototypen mit geminderter Belastbarkeit für die Validierung vorhanden sind. Diese Prototypen ermöglichen es, einen Eindruck für das Produkt zu erhalten und bilden die äußere Gestalt gut ab. Aktuell werden Prototypen aus additiver Fertigung vorwiegend für die Bauraumabschätzung oder für die Visualisierung des Funktionsprinzips eingesetzt. Solche Prototypen können die geforderte Funktion aufgrund ihrer niedrigen Belastbarkeit aber nicht ausreichend abbilden, weshalb sie für das Testing in Prüfständen als Teil der Validierung bisher ungeeignet sind.

Eine Kombination aus Simulation, Rapid-Prototyping-Verfahren zur Prototypenerstellung und Testing im Vorgängerprodukt durch entsprechende Prüfstände kann das Frontloading unterstützen. Daraus leitet sich die folgende Forschungsfrage ab: „Wie können leistungsskalierte Prototypen in das Vorgängerprodukt integriert und auf Prüfständen untersucht werden?“

Um diese Forschungsfrage zu unterstützen wird in diesem Beitrag ein Validierungsansatz vorgestellt, welcher den Einsatz von leistungsskalierten Prototypen für die funktionale Prüfung und frühe Validierung in IPEK-XiL-Prüfständen erlaubt. Hierzu ist eine Methode zur Leistungsskalierung notwendig, mit der die Prototypen zur Funktionsvalidierung in den IPEK-XiL-Prüfstand integriert werden können.

3 Die IPEK-sCiL-Validierungsmethode

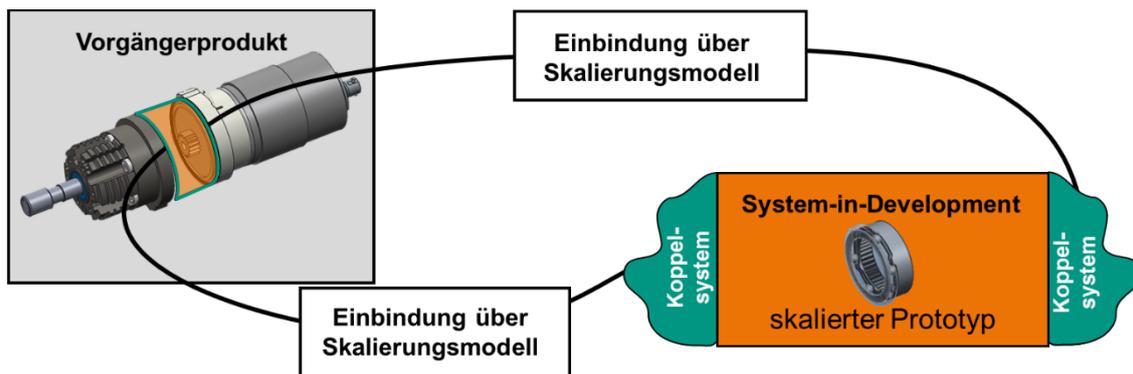


Bild 1: Validierungsansatz zur Einbindung von leistungsskalierten Prototypen in das Vorgängerprodukt

In Bild 1 ist der Validierungsansatz zur Einbindung von leistungsskalierten Prototypen in das Vorgängerprodukt schematisch dargestellt (vgl. Matthiesen et al. 2017). Die Systembegriffe basieren auf dem IPEK-XiL-Ansatz und werden im Folgenden in diesem Kontext beschrieben:

- **System-in-Development:** Das zu entwickelnde Teilsystem, dessen Funktionsfähigkeit überprüft werden soll. Es beinhaltet Prototypenteile, welche durch ihr Herstellverfahren in ihrer Beanspruchbarkeit gemindert sein können. Es bildet den skalierten Prototyp, der beispielsweise additiv gefertigt wurde.
- **Vorgängerprodukt:** Es bildet die angrenzenden Teilsysteme des zu entwickelnden Systems ab. Es liegt hierbei physisch oder virtuell auf Basis der vorangegangenen Produktgeneration vor und bildet das Restsystemmodell. Eine Einbindung des Vorgängerprodukts ist hilfreich, um bestehende Wechselwirkungen auf das zu entwickelnde Teilsystem abbilden zu können, auch wenn die weiteren Teilsysteme für die nächste Produktgeneration noch nicht entwickelt sind.
- **Skalierungsmodell:** Das Skalierungsmodell übersetzt die Systemgrößen zwischen Vorgängerprodukt und System-in-Development.
- **Koppelsysteme:** Sie verbinden das Vorgängerprodukt und das System-in-Development miteinander. Sie übersetzen in diesem Fall physische Leistungsgrößen in virtuelle Systemgrößen und andersherum und ermöglichen mit Hilfe von Skalierungsmodellen (vgl. Albers et al. 2016b) eine Anpassung der Belastung.

Basierend auf dem Validierungsansatz zur Einbindung von leistungsskalierten Prototypen in Prüfstände wird eine Methode – die IPEK-sCiL-Methode (scaled-Components-in-the-Loop) – für den Einsatz an einem IPEK-XiL-Prüfstand vorgestellt. Die IPEK-sCiL-Methode ist mit ihren fünf aufeinander aufbauenden Schritten in Bild 2 dargestellt.

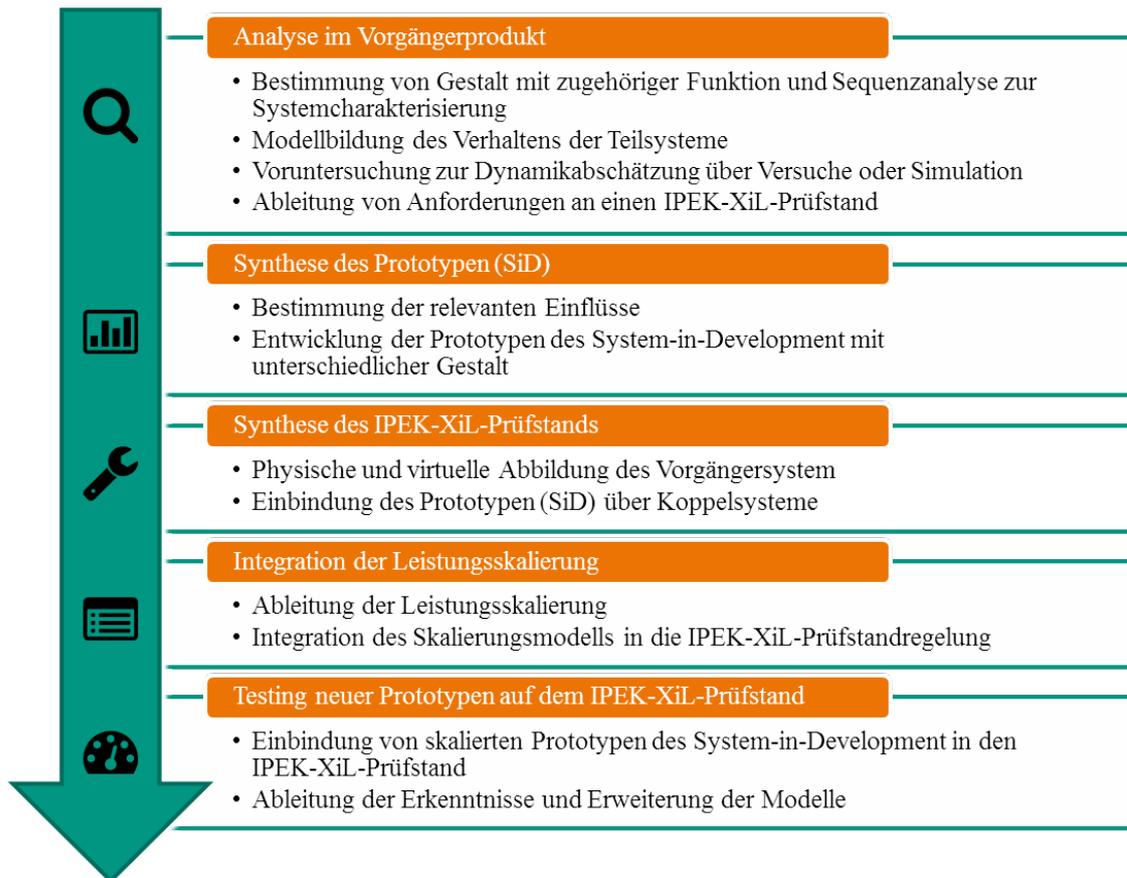


Bild 2: Darstellung der 5 Schritte der IPEK-sCiL-Methode

Im **ersten Schritt** erfolgt die Analyse des zu entwickelnden Teilsystems im Vorgängerprodukt der letzten Produktgeneration hinsichtlich der kritischen Funktion. 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 darauffolgende Überführung in ein Sequenzmodell (Albers et al. 2008b) unterstützen. Auf Basis dieser Analyse erfolgt die Modellbildung des Vorgängerprodukts. Mithilfe des erlangten Wissens wird für das zu entwickelnde Teilsystem (System-in-Development) ein angepasstes 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 IPEK-XiL-Prüfstand aufgebaut. Hierzu wird das Vorgängerprodukt aus früheren Produktgenerationen als physisches Restsystem in den Prüfstand integriert oder in Form von virtuellen Modellen 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 Prüfstandregelung beinhaltet Verrechnungsmodelle, die innerhalb der Koppelsysteme die Messgrößen in Vorgabegrößen der Aktoren umrechnen. Bestehende Ähnlichkeitskennzahlen und etablierte Modellbildungsansätze werden zur Erstellung der Skalierungsmodelle eingesetzt.

Im **fünften** und letzten **Schritt** der Methode werden mithilfe des entwickelten IPEK-XiL-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 IPEK-sCiL-Methode auch bei der Verkürzung der Entwicklungszeit von zukünftigen Produktgenerationen.

4 Anwendung der IPEK-sCiL-Methode zur Validierung einer Power-Tool Komponente

Die Anwendung der IPEK-sCiL-Methode (vgl. Bild 2) wird am Beispiel einer Weiterentwicklung eines 18-Volt-Akkubohrschraubers für Profianwendungen vorgestellt. Innerhalb der Produktgenerationsentwicklung dieses Akkubohrschraubers soll die drehmomentbegrenzende Kupplung für die nächste Produktgeneration durch eine Gestaltvariation optimiert werden. Das Auslöseverhalten der drehmomentbegrenzenden Kupplung soll durch eine geänderte Gestalt der Kupplungsteile verbessert werden. Eine rein simulationsgestützte Auslegung ist auf Grund des schwer zu simulierenden tribologischen Kontaktes und der Schwingungsfähigkeit des Systems begrenzt möglich. Eine Vielzahl an Varianten der neu zu entwickelnden Kupplung liegt nur als skaliertes Prototyp mit geminderter Beanspruchbarkeit vor, da seriennahe Prototypen in dieser Entwicklungsphase aufgrund deren aufwendigen Herstellung noch nicht zur Verfügung stehen. Die verschiedenen Varianten der drehmomentbegrenzenden Kupplung sollen auf einem IPEK-XiL-Prüfstand als skalierte Prototypen auf ihre Funktionserfüllung im Gesamtsystem untersucht werden und die Auswahl der geeignetsten Geometrie ermöglichen. Für die restlichen Teilsysteme des Akkubohrschraubers können die Komponenten aus dem bestehenden Akkubohrschrauber (Vorgängerprodukt) verwendet werden. Diese werden zusätzlich durch bereits fertig entwickelte Bauteile oder Zukaufteile vervollständigt.

In den folgenden Abschnitten wird das Vorgehen zur Erstellung eines Prüfstandes, welcher eine in der Beanspruchbarkeit geminderte Drehmomentkupplung durch Leistungsskalierung in das Vorgängermodell des Akkubohrschraubers einbindet, entlang des in Kapitel 3 vorgestellten Vorgehens diskutiert.

4.1 Analyse im Vorgängerprodukt

Im ersten Schritt erfolgt nach der vorgestellten IPEK-sCiL-Methode (vgl. Bild 2) die Analyse des Vorgängerprodukts. Dies hat zum Ziel, das Systemverständnis für die Modellbildungsaktivitäten in Simulation- und Prüfstandentwicklung aufzubauen und Anforderungen an den IPEK-XiL-Prüfstand zu generieren.

Zunächst werden im Rahmen einer Systemanalyse im Vorgängerprodukt die Zusammenhänge der vorliegenden Gestalt mit der erfüllten Funktion erfasst. Durch das so gewonnene Systemverständnis können im weiteren Verlauf die relevanten Gestaltmerkmale des Systems berücksichtigt werden – beispielsweise beim Aufbau eines Simulationsmodells. Diese Analyse wird mit dem C&C²-Ansatz (Albers und Wintergerst 2014; Matthiesen 2002) durchgeführt, der Gestalt und Funktion eines technischen Systems in einem Modell verknüpft.

Am Beispiel des Akkubohrschraubers ist der Zweck des Modells eine Identifikation der Abläufe bei der Funktionserfüllung *Drehmoment am Abtrieb begrenzen*. Dazu wird der Leistungsfluss von Motor zu Abtrieb betrachtet, wobei die weiter zu entwickelnde Funktion die *Begrenzung des Abtriebsmoments* ist. Eine Darstellung des Antriebsstrangs ist in Bild 3 gezeigt. Die Begrenzung des Drehmoments erfolgt in einer Kupplung (vgl. Bild 3), die in das Hohlrad der letzten Stufe des Planetengetriebes integriert ist. Die Kupplung begrenzt das Drehmoment mechanisch und besteht aus sechs im Kunststoffgehäuse gelagerten Kugeln, die über Federn auf eine Laufbahn, die im Hohlrad integriert ist, gedrückt werden und über Erhebungen auf der Laufbahn die Drehmomentübertragung ermöglichen.

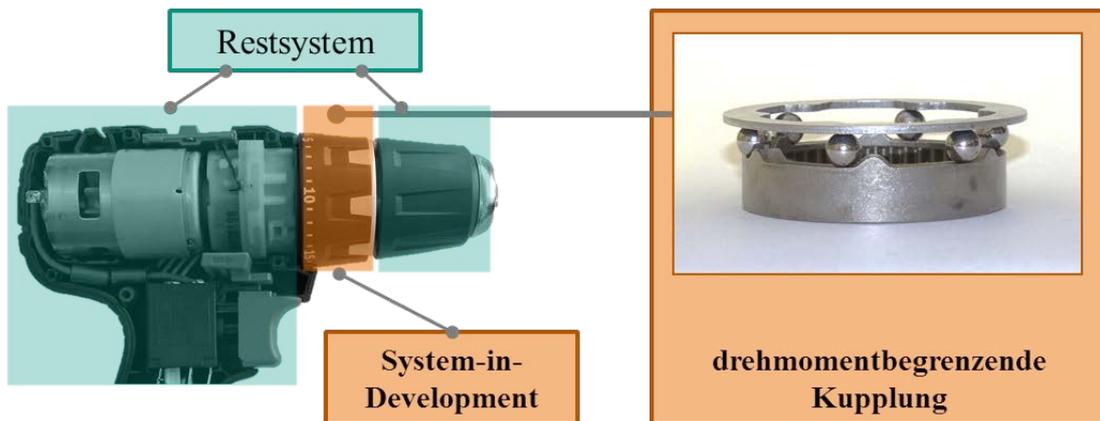


Bild 3: Antriebstrang eines Akkuboehrschraubers (links) und Darstellung der Komponenten (nicht vollständig) der drehmomentbegrenzenden Kupplung (rechts)

Die qualitative Systemanalyse zeigt, dass sich verschiedene Zustände während der Aktivität der Drehmomentbegrenzung einstellen. Dies erfordert verschiedene C&C²-Modelle, da sich der Zustand des Systems ändert. Die Verknüpfung dieser C&C²-Modelle geschieht durch ein Sequenzmodell, das in Bild 4 dargestellt ist. Bild 4 zeigt eine Kugel (vgl. Ausschnitt aus Bild 3), die vertikal beweglich ist und durch eine Feder auf die Laufbahn vorgespannt wird. Die Laufbahn bewegt sich in der eingezeichneten Richtung. Der Zweck des Modells ist eine Identifikation der Abläufe bei der Funktionserfüllung *Drehmoment am Abtrieb begrenzen*. Wenn die an der Funktionserfüllung beteiligten Teilfunktionen und Gestaltparameter bekannt sind, können sie verändert und die Funktion optimiert werden. In Zustand 1 dreht sich die Laufbahn frei, bis die Kugel eine Erhebung erreicht und Zustand 2 eintritt. In Zustand 2 entsteht ein Wirkflächenpaar zwischen der Erhebung der Laufbahn und der Kugel. Damit wird eine Momentübertragung erzielt und zusätzlich wird durch die Kugel eine Kraft auf das Gehäuse übertragen. In Zustand 3 bewegt sich die Kugel gegen die Federkraft auf die Erhebung der Laufbahn, es kommt zu einer Relativbewegung zwischen Gehäuse und Laufbahn. In Zustand 4 erreicht die Kugel das Ende der Erhebung, die abstützende Kraft fällt ab und die Laufbahn dreht sich wieder frei.

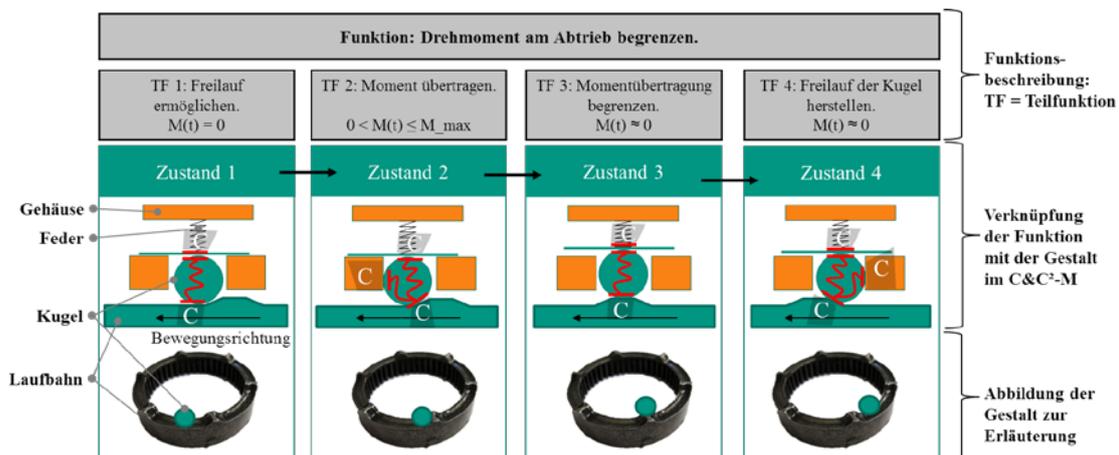


Bild 4: Sequenzmodell der Kugelbewegung im Auslösemoment der Kupplung

Das durch die Analyse erlangte Systemverständnis wird anschließend zum Aufbau einer virtuellen Validierungsumgebung des Antriebstrangs des Akkuboehrschraubers (System-in-Development und Restsystemmodell) genutzt. Ziel der virtuellen Simulation ist die schnelle Überprüfung von Anforderungen an den IPEK-XiL-Prüfstand und die benötigten Koppelsysteme.

Für die Abbildung der Komponenten des Vorgängerprodukts in der Simulation können bereits bestehende Komponentenmodelle genutzt werden, wenn diese vorhanden sind.

Da in diesem Fall die gewünschte Modellgüte des System-in-Development mit bestehenden Modellen nicht erreicht wurde, wird es mit Hilfe des zuvor erstellten Sequenzmodells (vgl. Bild 4) in ein neues

Komponentenmodell überführt. Zur Erstellung des Komponentenmodells wird auf Basis des Sequenzmodells eine mathematische Beschreibung der einzelnen Zustände der Kupplung erstellt und das Systemverhalten in Form von algebraischen Formeln und Gleichungen beschrieben. Diese mathematische Beschreibung wird anschließend im Komponentenmodell implementiert.

Durch die Integration des erstellten Kupplungsmodells in die Simulationsumgebung wird eine vollständige Simulation der Leistungsflüsse innerhalb des in den IPEK-XiL-Prüfstand integrierten Systems (Restsystem und System-in-Development) erzielt.

Durch Messungen am Vorgängerprodukt wird anschließend die bislang qualitative Modellierung verifiziert und quantitative Größen wie beispielsweise Höhe des Abtriebsmoments oder Zustandszeiten erfasst. Dazu werden Versuche mit dem Vorgängerprodukt (Akkuboehrschrauber) durchgeführt, in denen die real auftretenden Effekte in der Kupplung durch geeignete Sensorik erfasst werden. Sind die Effekte nicht direkt messbar, können diese durch indirekte Messmethoden ermittelt werden (vgl. Matthiesen et al. 2016). In diesem Fall wird das Abtriebsmoment des Akkuboehrschraubers mit einem Messaufbau mittels Drehmomentmesswelle erfasst. Aus dem erfassten Verhalten lassen sich Rückschlüsse auf die Zustände des Kupplungsbetriebs ableiten. Beispielsweise zeigt sich im Übergang von Zustand 1 zu Zustand 2 (vgl. Bild 4) ein Stoßeffect, dessen Wirkung auf das Abtriebsmoment von der Vorspannung der Federn abhängt. Solche beobachteten Effekte werden zur Verbesserung der Simulationsmodelle genutzt und erweitern diese kontinuierlich.

Mit Hilfe dieser Simulationsmodelle und der durchgeführten Experimente lässt sich eine effiziente Vorauslegung des IPEK-XiL-Prüfstands durchführen. Beispielsweise wird ein maximales Moment von 5,5 Nm bei aktivierter Kupplung festgestellt. Weiter können nun die auftretenden Messgrößen quantifiziert werden, woraus sich die Anforderung an den zu erstellenden IPEK-XiL-Prüfstand in Schritt 3 ableiten lassen. Zusätzlich lassen sich die notwendigen Leistungsbereiche und Dynamikanforderungen an die benötigten Koppelsysteme ableiten.

4.2 Synthese des Prototypen (SiD)

Im zweiten Methodenschritt (vgl. Bild 2) werden die relevanten Einflüsse und Parameter der Skalierung ermittelt und die skalierten Prototypen konstruiert.

Das System-in-Development ist als skaliertes Funktionsprototyp im Prüfstand ausgeführt und in seiner Beschaffenheit (Material, Geometrie und Form der Reibpartner etc.) der neu zu entwickelnden Komponente ähnlich, weist jedoch noch nicht dessen Drehmomentübertragbarkeit auf.

Die zuvor durchgeführten Experimente und Simulationsstudien werden in diesem Schritt zur Ermittlung der relevanten Einflüsse auf die Skalierung genutzt. Wichtig ist zu hinterfragen, welche Parameter auf dem Prüfstand skaliert werden und wie sich das System-in-Development in seiner Gestalt und Belastbarkeit vom Vorgängerprodukt unterscheidet.

Mithilfe des erlangten Systemverständnisses werden die Varianten des System-in-Development konstruiert und die Gestalt so angepasst, dass eine Optimierung der gewünschten Funktion realisiert wird. Die unterschiedlichen Varianten werden im weiteren Verlauf als skalierte Prototypen auf dem IPEK-XiL-Prüfstand auf ihre Funktionsfähigkeit untersucht.

4.3 Synthese des IPEK-XiL-Prüfstands

Im dritten Schritt der Methode wird, entsprechend des abzubildenden Anwendungsfalls eine Prüfstandkonfiguration aufgebaut sowie das betrachtete System-in-Development und das Vorgängerprodukt als Restsystem darin integriert. Im vorliegenden Fall wird die drehmomentbegrenzende Kupplung aus dem Gesamtsystem herausgelöst. Dementsprechend werden die Koppelsysteme zu beiden Seiten der skalierten Kupplung und des Restsystems benötigt. Zur Auslegung dieser Koppelsysteme werden die Ergebnisse der Simulation und der experimentellen Ermittlung (Systemidentifikation) verwendet.

In Bild 5 ist die konkrete Umsetzung der Prüfstandkonfiguration für die vorliegende Validierungsaufgabe nach der in Kapitel 3 vorgestellten IPEK-sCiL-Methode dargestellt.

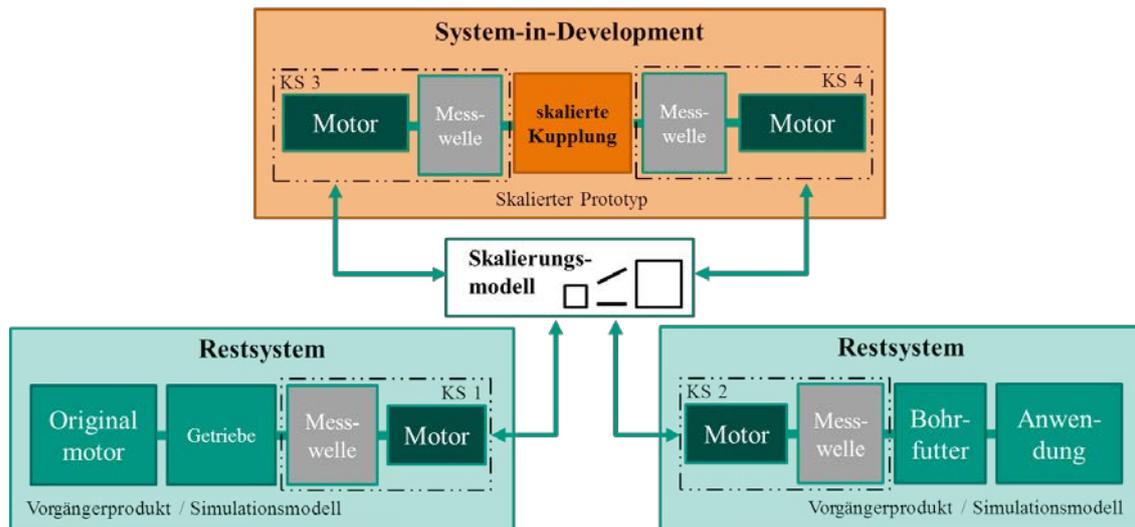


Bild 5: Prüfstandkonfiguration mit Leistungsskalierung eines Akkuboehrschraubers mit prototypischer Drehmomentkupplung

Aus dem Vorgängerprodukt wird die drehmomentbegrenzende Kupplung (vgl. Bild 3, links) physisch entfernt, sodass neue Schnittstellen entstehen. Die Akkuboehrschrauberkomponenten ohne Kupplung bilden im Sinne der IPEK-sCiL-Methode das Restsystemmodell. An den durch die fehlende Kupplung entstehenden Schnittstellen werden die Koppelsysteme KS1 und KS2 angebunden (vgl. Bild 5). Diese Koppelsysteme bestehen jeweils aus Elektromotoren und Sensoren. Die Sensoren der Koppelsysteme ermöglichen die Drehzahl- und Drehmomenterfassung an der Schnittstelle, während die Elektromotoren Drehzahlen und Drehmomente aufprägen können. Über das Skalierungsmodell und die beiden Koppelsysteme KS3 und KS4 ist der skalierte Prototyp der neu entwickelten Kupplung mit seinen in der Belastbarkeit geminderten Komponenten in das Restsystem eingebunden.

4.4 Integration der Leistungsskalierung

Im vierten Schritt wird eine Leistungsskalierung implementiert, die eine Anpassung der Leistung an die verwendeten Prototypen ermöglicht. Zwischen den beiden Motoren (z.B. von KS1 und KS3, Bild 5) befindet sich die Leistungsskalierung in einer Echtzeitregelung.

Die Leistungsskalierung als Bestandteil der Prüfstandregelung beinhaltet Verrechnungsmodelle, die innerhalb der Koppelsysteme die Messgrößen, wie beispielsweise Drehzahl und Drehmoment, auf der einen Seite in die passenden Vorgabegrößen der Motoren auf der anderen Seite der Koppelsysteme umrechnen. Die Verrechnungsmodelle sind dabei stark problemspezifisch, wobei etablierte Modellbildungsansätze, wie beispielsweise in (Dresig und Holzweißig 2012) vorgestellt sind, Verwendung finden können. Die von Dresig und Fidlin (Dresig und Fidlin 2014) vorgestellte Normierung von Parametern und Variablen sowie Bildung von Ähnlichkeitskennzahlen helfen bei der Aufstellung des Skalierungsmodells, wenn hierdurch die Unabhängigkeit der skalierten Größe zu den Parametern erreicht wird.

Dieses Skalierungsmodell wird in die Prüfstandregelung integriert und erlaubt die einfache Anpassung der relevanten Systemparameter wie Drehmoment und Drehzahl an die zu entwickelnde Komponente.

4.5 Testing neuer Prototypen auf dem IPEK-XiL-Prüfstand

Im letzten Methodenschritt werden, über die Einbindung von leistungsskalierten Prototypenvarianten der zu entwickelnden Komponente in den IPEK-XiL-Prüfstand, Versuche durchgeführt. Mit den Versuchsergebnissen werden sowohl die Fragestellung zum Systemverhalten im untersuchten Testfall beantwortet, als auch die Erweiterung der bisher bestehenden Modelle der Systemkomponenten erreicht. Mithilfe einer Kopplung des skalierten Prototyps mit dem Vorgängerprodukt wird das Testing unterschiedlicher Prototypen mit den relevanten Wechselwirkungen ermöglicht. Die verschiedenen Varianten der leistungsgeminderten Kupplung werden auf dem IPEK-XiL-Prüfstand auf ihre

Funktionserfüllung im Gesamtsystem untersucht und so die Auswahl der geeignetsten Geometrie ermöglicht. Verschiedene Kupplungen mit alternativen Geometrien können so, beispielsweise durch additive Fertigungsverfahren, schnell hergestellt und auf ihre Funktionsfähigkeit im Vorgängerprodukt vergleichend getestet werden. Auf eine Fertigung vieler Varianten mit zeit- und kostenintensiven Herstellverfahren wie Schmieden oder Feingießen kann durch diese Validierungsumgebung verzichtet werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorgestellte Validierungsansatz ermöglicht Frontloading in der Produktentwicklung durch Nutzung skalierter Prototypen (zum Beispiel aus additiver Fertigung) in XiL-Prüfständen mit Hilfe einer entsprechenden Leistungsskalierung. Die vorgestellte IPEK-sCiL-Methode beschreibt mögliche Schritte zum Aufbau eines auf dem Ansatz basierenden IPEK-XiL-Prüfstand zur Untersuchung von Prototypen in Vorgängerprodukte mit leistungsreduzierten Systemgrößen. Im nächsten Schritt soll der nach der vorgestellten IPEK-sCiL-Methode entwickelte Prüfstand auf seine Funktionsfähigkeit überprüft und weitere skalierte Prototypen auf ihre Eignung zur Drehmomentbegrenzung im Gesamtsystem untersucht werden.

Im Anschluss wird die Methode auf die Entwicklung einer Validierungsumgebung eines Flugzeugaktuators übertragen und dabei die Methodvalidierung durchgeführt. In der Luftfahrt erschwert die hohe Leistungsdichte zusätzlich die Verwendung von additiv gefertigten Prototypen in der Konzeptabsicherung. Der betrachtete Flugzeugaktuator verfügt über vergleichbare Baugruppen zur mechanischen Drehmomentbegrenzung, besitzt jedoch ein erheblich größeres Leistungsniveau. Eine besondere Herausforderung besteht somit in der aufwendigeren Leistungsskalierung. Mithilfe der vorgestellten IPEK-sCiL-Methode soll der Methodentransfer auf Systeme höherer Leistung untersucht werden. Darüber hinaus soll auch dort die Validierung von skalierten Prototypen mit Hilfe einer Leistungsskalierung ermöglicht werden und damit eine einfache Konzeptabsicherung in frühen Entwicklungsphasen erreicht werden. Die hier vorgestellte Methode wird somit an zwei unterschiedlichen Systemen angewendet.

Danksagung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20Y1509B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMW) und dem Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für die Unterstützung dieses Vorhabens.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

- | | |
|---------------------|--|
| Albers et al. 2016a | Albers, Albert ; Behrendt, Matthias ; Klingler, Simon ; Matros, Kevin: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: Lindemann, Udo (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. München : Hanser, 2016a |
| Albers et al. 2016b | Albers, Albert ; Pinner, Tobias ; Yan, Steven ; Hettel, Rolf ; Behrendt, Matthias: Koppelsysteme: Obligatory Elements within Validation Setups. In: Proceedings of DESIGN 2016, 2016b |
| Albers et al. 2015 | Albers, A. ; Bursac, N. ; Wintergerst, E.: Produktgenerationsentwicklung: Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (2015) |

- Albers und Wintergerst 2014 Albers, A. ; Wintergerst, E.: The Contact and Channel Approach (C&C2-A): relating a system's physical structure to its functionality. In: An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations. London : Springer, 2014
- Albers et al. 2008a Albers, A. ; Düser, T. ; Ott, S.: X-in-the-loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebsystemen. In: 8. Tagung Hardware-in-the-loop-Simulation, 2008
- Albers et al. 2008b Albers, A. ; Alink, T. ; Matthiesen, S. ; Thau, S.: Support of system analyses and improvement in industrial design through the contact & channel model. In: International Design Conference - Design 2008. Dubrovnik, Croatia, 2008
- Dresig und Fidlin 2014 Dresig, Hans ; Fidlin, Alexander: Schwingungen mechanischer Antriebssysteme : Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese. 3., überarb. u. erw. Aufl. Berlin : Springer Vieweg, 2014
- Dresig und Holzweißig 2012 Dresig, Hans ; Holzweißig, Franz: Maschinendynamik. 11. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012
- Kaden et al. 2012 Kaden, A. ; Walde, G. ; Bocher, B. ; Luchner, R.: Hardware-in-the-Loop - Simulation als Bestandteil des Entwicklungsprozesses für das automatische Flugsteuerungssystem der STEMME S15. In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (2012)
- Karpenko und Sepehri 2006) Karpenko, Mark ; Sepehri, Nariman: Hardware-in-the-Loop Simulator for Research on Fault Tolerant Control of Electrohydraulic Flight Control Systems : Mineapolis, Minnesota, USA, June 14-16, 2006. In: Proceedings of the 2006 American Control Conference, Minneapolis, Minnesota, USA (2006)
- Matthiesen und Steck 2017 Matthiesen, S. ; Steck, M. ; Validierung von leistungsskalierten Prototypen. In: WiGeP News 01/2017,
- Matthiesen et al. 2016 Matthiesen, S. ; Gwosch, T. ; Schäfer, T. ; Dültgen, P. ; Pelshenke, C. ; Gittel, H.-J.: Experimentelle Ermittlung von Bauteilbelastungen eines Power Tool Antriebsstrangs durch indirektes Messen in realitätsnahen Anwendungen als ein Baustein in der Teilsystemvalidierung. In: Forschung im Ingenieurwesen (2016) Nr 1-2/2016
- Matthiesen et al. 2013 Matthiesen, Sven ; Schaefer, Tobias ; Mangold, Sebastian ; Durow, Wasili: X-in-the-Loop in der Gerätebranche - Ein ganzheitliches Validierungsframework unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Anwender, Gerät und Anwendung. In: SSP 2013. Stuttgart : Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2013
- Matthiesen 2002 Matthiesen, Sven: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Karlsruhe, KIT. Forschungsberichte des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, 2002
- Meboldt et al. 2012 Meboldt, M. ; Matthiesen, S. ; Lohmeyer, Q.: The dilemma of managing iterations in time-to-market development processes. In: 2nd International Workshop on Modelling and Management of Engineering Processes MMEP, 2012
- Thomke und Fujimoto 2000 Thomke, Stefan ; Fujimoto, Takahiro: The effect of "front-loading" problem-solving on product development performance. In: Journal of Product Innovation Management 17 (2000), Nr. 2, S. 128-142