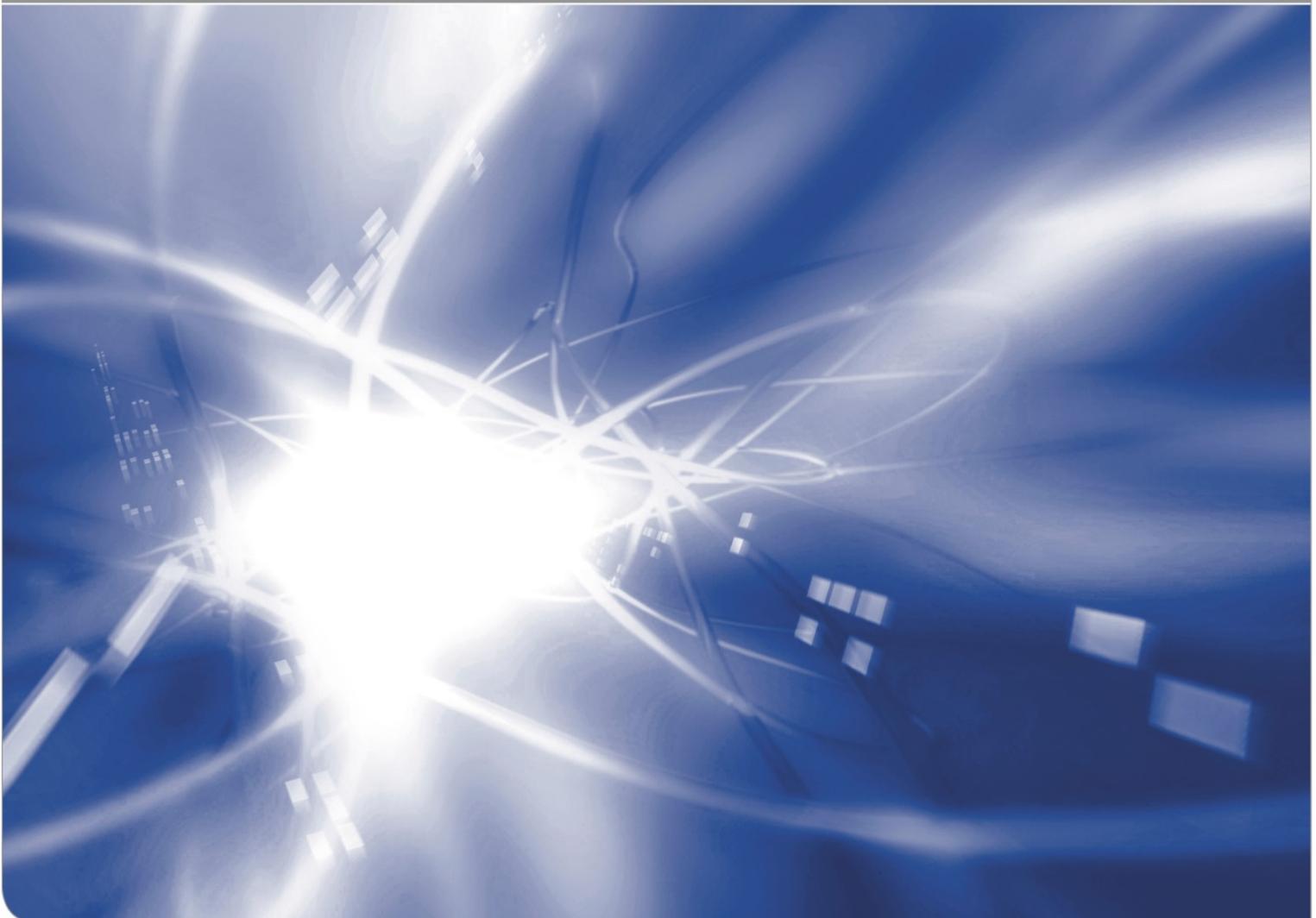


# Methodische Unterstützung des Erkenntnisgewinns in der Produktentwicklung durch Konstruktionshypothesen

Open Access am KIT

Sven Matthiesen, Patric Grauberger, Thomas Nelius, Kevin Hölz

KIT SCIENTIFIC WORKING PAPERS 61



## **IPEK – Institut für Produktentwicklung**

Kaiserstr. 10, Geb. 10.23  
76131 Karlsruhe

[www.ipek.kit.edu](http://www.ipek.kit.edu)

## **Impressum**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
[www.kit.edu](http://www.kit.edu)



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung –  
Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

2017

ISSN: 2194-1629

## **Abstract**

*In product engineering the designer develops ideas how to improve technical systems. However sometimes the intended improvement is not reached, because real system behavior is difficult to understand. The designer tries to find the causes for the unwanted behavior and then refines the system to improve its functionality. While doing so, he creates mental models of the relation of the behavior to the systems design. To gain knowledge of the system, he needs to know, if his model represents the reality correctly. This paper presents a method to support the design engineer in the verification process of these models through hypotheses. In the state of the art, requirements of the method are acquired. A concept of the method is derived and used in a Live-Lab with 70 undergraduate students. The method showed potential to support the design engineer in verification of models of design-function-relations, however it was often used to build these models, where it offered no support. Based on that gained knowledge, the method was optimized. The mental concept of the cause was integrated in the form, therefore it needs the built model and focuses on the verification. The outlook shows the planned verification of the changes in the method and further potential of development and usage.*

In der Produktentwicklung generiert der Konstruktionsingenieur Ideen, wie ein technisches System verbessert werden kann. Die dadurch erwartete Verbesserung wird oft nicht direkt erreicht, da das reale Systemverhalten im Detail schwer vorherzusehen ist. Der Konstruktionsingenieur versucht dann, die Ursache des abweichenden Systemverhaltens zu finden, um sein Produkt weiter verbessern zu können. Dabei bildet er Vorstellungen davon, wie Ursache und Wirkung im System zusammenhängen.

Dieser Beitrag stellt eine Methode vor, mit welcher der Konstruktionsingenieur überprüfen kann, ob seine Vorstellungen von den Ursachen des Systemverhaltens der Realität entsprechen. Im Stand der Forschung wurden Anforderungen an eine solche Methode ermittelt. Aus diesen Anforderungen wurde ein Entwurf der Methode „Konstruktionshypothese“ erstellt und in einem Live-Lab mit 70 Studierenden angewandt. Dabei zeigte sie Potential zur Unterstützung des Konstruktionsingenieurs bei der Verifikation seiner Modellvorstellung. Sie wurde aber auch häufig entgegen ihrem vorgedachten Zweck zur Modellbildung angewendet, in der sie keine Unterstützung bieten konnte. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde die Methode optimiert, indem die Modellvorstellung der Ursache in das Formblatt der Methode aufgenommen wurde, so dass sie explizit die Verifikation der Modellbildung fordert. Sie wird anschließend im Detail vorgestellt. Der Ausblick zeigt die geplante Validierung der Erkenntnisse aus Anwendung und weiteres Entwicklungspotential.

# 1 Einleitung

Technische Systeme erfüllen für den Kunden immer einen bestimmten Zweck. Eine Herausforderung für den Konstruktionsingenieur ist, dass er diesen Zweck nicht direkt erzeugen kann. Er muss den Zweck über viele (Teil-)Funktionen im System erfüllen. Möchte der Konstruktionsingenieur eine dieser Funktionen verändern, kann er das nicht direkt, sondern nur über eine Veränderung der funktionsrelevanten Bauteile und ihrer Eigenschaften. Diese Bauteile und ihre Eigenschaften werden auch als Gestalt bezeichnet. Der Konstruktionsingenieur muss die Auswirkungen einer veränderten Gestalt vorausdenken, um die Funktionserfüllung zu verbessern. Im Vorausdenken bildet er für sich Vorstellungen, wie Gestalt und Funktion im technischen System zusammenhängen. [1]

Die **Herausforderung** dabei ist, dass der Konstruktionsingenieur zunächst nicht weiß, ob seine Vorstellungen dem realen Systemverhalten entsprechen. Bei einem Entwicklungsprojekt am Winkelschleifer könnte folgende Situation auftreten: Der Kunde will den Zweck „gutes Arbeitsgefühl“. Der Konstruktionsingenieur muss nun entscheiden, welche Funktionen für diesen Zweck relevant sind. Er identifiziert die Vibration als unerwünschte Funktion und will sie nun reduzieren, um den Zweck besser zu erfüllen. Er vermutet aus der Analyse, dass die Elastizität der Lagersitze für die Schwingung der Motorwelle und die daraus resultierende Vibration relevant ist. Daraus bildet er eine Vorstellung davon, wie ein Lagersitz beschaffen sein muss, um diese Schwingung zu verringern. Er entscheidet sich, einen weniger elastischen Lagersitz zu konstruieren, um Schwingungen der Motorwelle zu reduzieren. Ob diese Vorstellung richtig ist, weiß er zu diesem Zeitpunkt noch nicht.

Dieser Beitrag stellt die Entwicklung einer Methode vor, die den Konstruktionsingenieur bei der Überprüfung seiner Vorstellungen – dem Erkenntnisgewinn – unterstützt. Dazu werden bereits vorhandene wissenschaftliche Methoden zum Erkenntnisgewinn auf die Bedürfnisse des Konstruktionsingenieurs angepasst und in die Produktentwicklung übertragen. So wird er dazu befähigt, aus Erkenntnissen zu den Zusammenhängen von Gestalt und Funktion zu konstruieren. Dadurch werden Unsicherheiten in Entwicklungsprojekten reduziert.

## 2 Stand der Forschung

Im Folgenden werden Anforderungen an eine Methode ermittelt, die dem Konstruktionsingenieur helfen kann, seine Vorstellungen von Zusammenhängen der Gestalt mit der Funktion zu überprüfen.

### 2.1 Der Zusammenhang von Gestalt und Funktion

In der Produktentwicklung ist eine zentrale Aufgabe des Konstruktionsingenieurs, ein Produkt zu erzeugen, was den vom Kunden gewünschten Zweck erfüllt. Dazu muss er viele Funktionen

in die Gestalt des Produkts hineinkonstruieren [1]. Das Erfassen des Zusammenhangs von der Gestalt des Produkts mit der Funktion ist damit ein Erfolgskriterium seiner Tätigkeit. Um diesen Zusammenhang zu erfassen, analysiert er das technische System und bildet Vermutungen dazu, wie es funktioniert. Das Ziel der Analyse ist die Fähigkeit zur Synthese, d.h. ein ausreichendes Systemverständnis, um das System weiterentwickeln zu können. Je besser das Problem durch die Analyse verstanden ist, desto einfacher wird die Synthese [1], S.4. In der Produktentwicklung wird auch von der synthesegetriebenen Analyse als Aktivität des Konstruktionsingenieurs in der lösungsorientierten Analysephase technischer Systeme gesprochen [2].

Bei der synthesegetriebenen Analyse kann der Konstruktionsingenieur durch ein explizites Modell unterstützt werden, mit dem er seine Vorstellungen zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion abbilden und strukturieren kann. Der C&C<sup>2</sup>-Ansatz beispielsweise ist ein Denkzeug<sup>1</sup>, mit dem solche Modelle erstellt werden können [3]. Zu seiner Anwendung werden konkrete Abbildungen der Gestalt, wie Fotos oder CAD-Modelle verwendet, die durch die C&C<sup>2</sup>-Modellelemente mit der Funktion verknüpft werden. Er kann deshalb die konkreten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge abbilden und strukturieren, welche der Konstruktionsingenieur zur Weiterentwicklung seines Systems benötigt. Durch die Nutzung dieses Denkzeugs zur Modellbildung kann der Konstruktionsingenieur sein Systemverständnis gezielt weiter ausbauen. Um strukturierte Erkenntnisse zu Gestalt-Funktion-Zusammenhängen zu gewinnen, ist ein explizites Modell dieser Zusammenhänge hilfreich, wie es mit dem C&C<sup>2</sup>-Ansatz gebildet werden kann.

Als Anforderung an die Methode ergibt sich die Nutzung einer expliziten **Modellbildung des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs** als Basis für einen Erkenntnisgewinn in technischen Systemen.

## 2.2 Erkenntnisgewinn in der Produktentwicklung

In der Produktentwicklung ist der frühe Markteintritt des entwickelten Produkts ein entscheidender Erfolgsfaktor [4]. Um das zu ermöglichen, ist für den Konstruktionsingenieur eine möglichst frühe Überprüfung des zu entwickelnden Produkts notwendig. Ergibt diese Überprüfung, dass die vorgedachte Funktion nicht ausreichend erfüllt wird, entsteht eine Iteration. Iterationen sind wichtig und häufig nicht vermeidbar, um das System besser zu verstehen. Sie sollten deshalb möglichst früh provoziert werden [5]. Die Provokation von Iterationen wird durch das gezielte Testing unterstützt. Das gezielte Testing nutzt dabei Prototypen, die auf möglichst frühen Erkenntnisgewinn ausgelegt sind und je nach

---

<sup>1</sup> Ein Denkzeug ist ein Werkzeug, um den Konstruktionsingenieur bei seinen Denkvorgängen in der Analyse und Synthese zu unterstützen. [1]

Untersuchungsziel unterschiedlich ausgeprägt sein können [6]. Durch das gezielte Testing können Modellvorstellungen zum Gestalt-Funktion-Zusammenhang bereits in einer frühen Phase der Entwicklung überprüft und daraus Erkenntnisse gewonnen werden.

Als Anforderung an die Methode ergibt sich daraus eine **Nutzung des gezielten Testing**, um die benötigten Erkenntnisse früh zu gewinnen.

### 2.3 Verifikation der Modellvorstellung

Nach Hacker ist das Konstruieren eine besondere Herausforderung für den Menschen. Der Konstruktionsingenieur muss umfangreiche Systeme vordenken und dabei zwischen den zwei qualitativ unterschiedlichen Lösungsbereichen, Gestalt und Funktion, wechseln. Zudem muss der Konstruktionsingenieur ein hohes Fachwissen bei der Problemlösung einbringen und zahlreiche Anforderungen an das zu entwickelnde System berücksichtigen. Dabei geht er, entgegen konstruktionswissenschaftlichen Empfehlungen und denkpsychologischen Konzepten oft opportunistisch vor [7]. Um diesen Herausforderungen zu begegnen bildet sich der Mensch Modelle seiner Realität um die Informationsfülle zu reduzieren. Stachowiak beschreibt, dass Erkenntnisse nur in Modellen erzielt werden [8]. Standardwerke der Konstruktionsmethodik ([9], [10]) zeigen zahlreiche Ansätze, um für unterschiedliche Zwecke zielgerichtete Modelle des zu konstruierenden Systems zu erstellen. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Notwendigkeit geeigneter und gültiger Modelle allgemein anerkannt ist.

Während die Prinzipien und Vorgaben zur Modellbildung einfach sein können, ist die Erstellung dieser Modelle besonders herausfordernd und stark von dem Talent des Konstruktionsingenieurs abhängig [1]. Eine besondere Herausforderung bei der Modellbildung ist die Identifikation der relevanten Systemgrößen, welche die Funktionserfüllung entscheidend beeinflussen. Hierbei können Interpretationsfehler auftreten. Wenn verschiedene Gestaltmerkmale mit einer bestimmten Funktionsausprägung gemeinsam auftreten, ist es schwierig das Merkmal zu identifizieren, welches das Systemverhalten verursacht. Selbst für Experten ist die Identifizierung von kausalen Zusammenhängen schwierig. Scheinkorrelationen sind eine dieser Herausforderungen. Hierbei korrelieren zwei Größen, es liegt aber kein kausaler Zusammenhang vor. Interpretiert der Konstruktionsingenieur die Scheinkorrelation als kausalen Zusammenhang, entstehen Fehler in der Modellbildung. Arnott beschreibt zahlreiche weitere kognitive Verzerrungen, welche die Entscheidungsqualität negativ beeinflussen [11], S. 55-78. Eine konstruktionsmethodische Unterstützung der Modellbildung muss diese Herausforderungen überwinden können. Denkpsychologische Untersuchungen zeigen, dass eine Reflexion die Lösungsgüte von

Ergebnissen im Konstruktionsprozess positiv beeinflusst. Aktuell fehlt häufig die Anregung zum Begründen und Erklären erarbeiteter Lösungen [7], S. 143-152.

Als Anforderung an die Methode ergibt sich daraus die Notwendigkeit zur **Verifikation der Modellvorstellung** zum Gestalt-Funktion-Zusammenhang, um kausale Zusammenhänge zu erkennen und so zu Erkenntnissen zu gelangen.

#### **2.4 Hypothesen zum Erkenntnisgewinn**

In wissenschaftlichen Vorgehensweisen werden Kausalitäten durch Überprüfung von aufgestellten Hypothesen im Experiment identifiziert. Im Experiment werden die betrachteten Variablen in einer kontrollierten Umgebung untersucht. Dabei werden mehrere Arten von Variablen unterschieden: Die unabhängige Variable kann im Experiment direkt beeinflusst werden. Die abhängige Variable kann nicht direkt beeinflusst, aber systematisch beobachtet werden. Störvariablen werden identifiziert und kontrolliert, um vergleichbare Ergebnisse des Experiments zu erhalten [12]. Das Experiment basiert auf einer wissenschaftlichen Hypothese, welche diese Variablen verknüpft. Diese muss einige Anforderungen erfüllen, um mit ihr kausale Zusammenhänge ermitteln zu können. Diese sind neben widerspruchsfreier Formulierung und prinzipieller Widerlegbarkeit auch die Operationalisierbarkeit [12], S.31. Insbesondere diese Operationalisierbarkeit führt in verschiedenen Bereichen der Wissenschaft zu unterschiedlichen Herausforderungen. In der Psychologie beispielsweise werden Untersuchungen im hochkomplexen System der menschlichen Sozialstruktur durchgeführt. Hierbei wurden spezielle Formen von Hypothesen entwickelt, die diese Untersuchungen unterstützen können [13]. Sie besitzen, beispielsweise räumliche, zeitliche oder auf bestimmte Systeme beschränkte Gültigkeit. Mit ihnen ist ein effizienterer Erkenntnisgewinn möglich, da ihre Gültigkeit nur im betrachteten System und Zustand geprüft werden muss.

Im Bereich der Produktentwicklung werden Hypothesen ebenfalls genutzt, um Erkenntnisse zu gewinnen. Die Schadenshypothesen nach VDI3822 werden als Hilfsmittel verwendet, um Ursachen für aufgetretene Schäden zu analysieren [14]. Diese Analyse bezieht sich bereits auf die Zusammenhänge von Gestalt und (Fehl-)Funktion. Für den Konstruktionsingenieur sind sie wichtig, um herauszufinden, an welcher Stelle im System er konstruktiv ansetzen kann, um ein Problem zu lösen. Auch Ehrlenspiel beschreibt die Anwendung von Hypothesen, um die Ursache eines im Entwicklungsprojekt aufgetretenen Problems zu finden [10]. Diese Hypothesen fokussieren ähnlich den Schadenshypothesen der VDI zunächst die Identifikation von Problemursachen im System. Sie gehen aber auch den Schritt in die Synthese weiter. Hier setzen sie auf das vorhandene Expertenwissen, um Lösungskonzepte zu generieren, die das in der Analyse erkannte Problem beheben. Die hier vorgestellte Methode soll dieses Vorgehen

ergänzen und den Konstruktionsingenieur dabei unterstützen, seine Vorstellungen zu konkreten Zusammenhängen von Gestaltparametern und Funktionserfüllung in diesen Konzepten zu verifizieren.

Als Anforderung an die Methode ergibt sich daraus die **Nutzung von Merkmalen der wissenschaftlichen Hypothesen** als Rahmen für den Erkenntnisgewinn des Konstruktionsingenieurs. Sie kann dabei an bereits bestehende Methoden der Hypothesenbildung in der Produktentwicklung anschließen.

### **3 Entwurf und Anwendung der Methode zum Erkenntnisgewinn in der Produktentwicklung**

In diesem Kapitel wird ein Entwurf der Methode vorgestellt und das Live-Lab für die erste Anwendung beschrieben.

#### **3.1 Erster Entwurf der Methode**

Aus den im Stand der Forschung ermittelten Anforderungen wird ein theoretischer Entwurf der Methode erstellt. Dabei wird das bereits validierte Prinzip des Erkenntnisgewinns durch wissenschaftliche Hypothesen genutzt.

Ein zentrales Element in diesem Entwurf ist der Leitsatz, der Gestalt (unabhängige Variable) und Funktion (abhängige Variable) beinhaltet. Diese werden durch eine Wenn-Dann Beziehung verknüpft. So wird der vom Konstruktionsingenieur vermutete Gestalt-Funktion-Zusammenhang explizit notiert. Zu der im Leitsatz aufgestellten Hypothese wird eine Prüfung entwickelt, die eine Kausalität des Zusammenhangs von Gestalt und Funktion aufdecken kann. Diese Prüfung nutzt das gezielte Testing zum frühen Erkenntnisgewinn und prüft genau die Gestalt und Funktion aus dem Leitsatz. Dieser Methodenentwurf wird in einem Live-Lab angewandt.

#### **3.2 Projektarbeit „Mechatronische Systeme und Produkte“ als Live-Lab zur Methodenanwendung**

Nach Albers ist ein Live-Lab im Kontext der Produktentwicklung eine Untersuchungsumgebung, die es ermöglicht, Methoden und Prozesse der Produktentwicklung in einem möglichst realen Entwicklungsprozess zu erforschen und gleichzeitig die Randbedingungen in hohem Maße gestalten zu können. [15], S.287

Im Live-Lab der Projektarbeit „Mechatronische Systeme und Produkte“ entwickeln 70 Studierenden innerhalb einer semesterbegleitenden Entwicklungsaufgabe ein

mechatronisches Produkt. Diese Entwicklungsaufgabe besteht darin, zwei kooperierende mechatronische Systeme zu entwickeln, welche die gestellte Entwicklungsaufgabe autonom und in Interaktion miteinander lösen. Durch die offene Problemstellung, ohne Vorgabe eines Lösungswegs, bildet die Aufgabenstellung eine real-komplexe Aufgabenstellung des Konstruktionsingenieurs ab. Dadurch eignet sich das Live-Lab gut, um die Methodenanwendung in realitätsnahen Entwicklungen zu untersuchen.

Die Fertigung der Systeme sowie der Prototypen und der Validierungsumgebung erfolgt durch die individuelle Herstellung von Bauteilen mithilfe eines Lasercutters sowie durch eine zur Verfügung gestellte Auswahl an Teilen eines Konstruktions-Baukastensystem. Die Studierenden haben somit weitreichende Möglichkeiten, die Gestalt ihres Systems zu entwickeln. Die Studierenden erhalten weiterhin einen programmierbaren Mikrocontroller und eine Vielzahl an Aktoren und Sensoren (Infrarot, Ultraschall, Helligkeit, Farbsensor) zur Regelung und Steuerung ihrer selbst zu entwickelnden mechatronischen Systeme. Die Entwicklungsaufgabe besteht darin, auf einer begrenzten Fläche unterschiedliche Würfel und Zylinder einzusammeln und diese auf vorgegebenen Positionen zu stapeln.

### **3.3 Anwendung der Hypothesen im Live-Lab**

Ähnlich zu realen Entwicklungsprojekten funktioniert auch im Live-Lab nicht jede Idee auf Anhieb. Die entwickelte Methode soll die Studierenden dabei unterstützen, die auftretenden konstruktiven Herausforderungen zu bewältigen. Die Anwendung der Methode wird dabei im realitätsnahen Umfeld geprüft. Die in der Methodenanwendung adressierte Frage ist:

*Kann die Methode den Konstruktionsingenieur beim Erkenntnisgewinn zum Gestalt-Funktion-Zusammenhang und damit bei der Weiterentwicklung des Systems unterstützen?*

Die Methode wurde den Studierenden im Rahmen einer Übung theoretisch an Beispielen vermittelt. In der Projektdokumentation wurde ein Template für die Methodenanwendung bereitgestellt. In der Anwendung der Methode zeigte sich, dass die Entwicklung aus den mit der Methode gewonnenen Erkenntnissen für die Studierenden möglich war, wenn sie korrekt angewendet wurde. Am Beispiel einer Teilsystementwicklung in einer Gruppe wird dies im Folgenden erläutert: Um den Zweck „Würfel sortiert stapeln“ zu erfüllen, muss unter anderem die Teilfunktion „Würfel sortieren“ erfüllt werden. Dazu wurde ein Teilsystem entwickelt, das die Farbe von aufgenommenen Würfeln identifiziert und sie entsprechend sortiert. Eine erste Idee zur Umsetzung war ein Sortierrad, das in Abbildung 1 links als „Paper-Prototyp“ dargestellt ist. Nachdem das Konzept mit Hilfe dieses Prototyps als geeignet bewertet wurde, begann die Umsetzung in ein real funktionsfähiges System, das aus HDF-Komponenten (High Density Fiberboard) bestand, welche mit Hilfe eines Lasercutters erstellt wurden. Hierbei wurde die Funktion nicht ausreichend erfüllt. Die Methode wurde eingesetzt, um die vermutete

Ursache des Systemverhaltens zu finden und die Synthese einer Lösung zu ermöglichen. In Abbildung 1 ist das Vorgehen schematisch dargestellt. Im ersten HDF-Prototyp verklemmten die Würfel in den Sortierfächern. Die Hypothese 1 zum Gestaltparameter „Dicke der Seitenwand“ wurde gebildet, und die Seitenwand von 5mm auf 3mm reduziert. Die Überprüfung zeigte, dass die Würfel immer noch verklemmten, und aus der falsifizierten Hypothese entstand eine Iteration. Mit der gewonnenen Erkenntnis, dass die Seitenwand nicht Ursache des Problems ist, wurde eine weitere Hypothese gebildet. Hypothese 1.1 adressierte den Gestaltparameter „Breite der Öffnung“ in der Rückwand, der vergrößert wurde, um das Verklemmen zu beheben. Die Überprüfung dieser Hypothese ergab eine weitere Falsifizierung, die Würfel blockierten das Sortierrad weiterhin. Aus dieser Erkenntnis entstand Hypothese 1.3, die eine Verbesserung der Förderung durch Veränderung des Gestaltparameters „Seitenwinkel der Bodenfläche“ adressierte. Diese Hypothese wurde verifiziert, die Würfel ließen sich mit einem schräg gestellten Sortierrad, das diesen Parameter als schnellen Prototyp überprüft, fördern. Nach einer Weile blockierte das Sortierrad im Betrieb jedoch wieder und die Lagerung der Antriebswelle wurde als Ursache des Blockierens vermutet. Hypothese 2 wurde gebildet, welche die Reibung im Wirkflächenpaar Welle-Lagerhülse adressierte. Mit einem Nylonfaden als reibungsarme Hülse erfüllte das Sortierrad die Prüfanforderung, mindestens 10 Würfel fehlerfrei zu sortieren und zu fördern. Damit wurde die Funktion dieses Teilsystems nach 4 Iterationen erfüllt.



Abbildung 1: Hypothesenbildung am Teilsystem Sortierrad<sup>2</sup>

Eine Hypothesenanwendung, die nicht zum Erfolg führte, wird im Folgenden zum Vergleich beschrieben. Eine Hypothese adressierte das Konzept einer Verzahnung des Antriebs. Sie lautete: „Wenn eine Getriebeübersetzung von X (Zahlenwert wurde nicht dokumentiert) vorliegt, dann ist das Greiferfahrzeug trotzdem schnell genug“. Eine Prüfung der Hypothese wurde nicht mehr formuliert. Ein Erkenntnisgewinn wurde mit ihr nicht erzielt. Hier zeigt sich

<sup>2</sup> Team 3, MSuP 2016/17

wie durch die fehlende Quantifizierung der Funktion eine Prüfung erschwert wird. Aus dieser Hypothese wäre selbst mit erfolgreicher Prüfung nur eine Entscheidung auf der Ebene „Konzept beibehalten“ oder „Konzept verwerfen“ möglich. Sie half dem Team bei der Entwicklung eines geeigneten Antriebs nicht weiter, da aus ihr keine optimierte Konstruktionslösung abgeleitet werden konnte.

Aus diesen Beispielen zeigt sich, dass die Unterstützung der Konstruktionsingenieure durch die Methode möglich ist, aber nur in Schwierigkeiten weiterhilft, die in konstruktiven Details auftreten. Dort ist die Hypothesenbildung und –prüfung aufwändiger als in der Konzeptbewertung, liefert aber einen Beitrag zum Projektfortschritt.

## **4 Die Konstruktionshypothese – Methode zum Erkenntnisgewinn in der Produktentwicklung**

Im diesem Kapitel werden die Erkenntnisse aus der Anwendung im Live-Lab beschrieben und die daraus weiterentwickelte Methode im Detail vorgestellt.

### **4.1 Erkenntnisse aus der Studie**

In einer Studie wurden die Konstruktionshypothesen anschließend von Teilnehmern aus dem Live-Lab im Rahmen einer Online-Umfrage bewertet. Dabei wurden 25 vollständig ausgefüllte Datensätze zur Auswertung herangezogen. Der Fokus der Umfrage lag auf der in Kapitel 3.3 gestellten Frage zur Unterstützung des Konstruktionsingenieurs. Eine in der Studie aufgedeckte Herausforderung war die Unklarheit darüber, wann eine Hypothese zum Gestalt-Funktion-Zusammenhang für den Projektfortschritt hilfreich ist. Etwa 75% (119 von 160) der von den Teilnehmern gebildeten Hypothesen wurden als weniger oder nicht hilfreich für den Projektfortschritt empfunden. Dabei bildeten Teilnehmer, die diese Aussage trafen, im Durchschnitt 13,2 Hypothesen. Teilnehmer, welche die Hypothesen als hilfreich für den Projektfortschritt sahen, bildeten mit durchschnittlich 6,8 Hypothesen deutlich weniger. Um dieses Phänomen zu verstehen, wurde eine Analyse in der Dokumentation durchgeführt. Sie zeigte, dass sich viele Hypothesen auf ein Konzept zur Funktionserfüllung bezogen, das mehrere Gestaltparameter beinhaltet. Diese Hypothesen waren Ausformulierungen der Konzeptideen und ihre Prüfung zeigte, ob das Konzept an sich Potential bietet. Sie waren einfach zu bilden, da sie direkt aus der Konzeptidee abgeleitet werden konnten, und wurden vermutlich deshalb in großer Anzahl gebildet. Am Beispiel des Sortierrades wäre eine solche Hypothese: „Wenn ein drehbares Rad verwendet wird, dann können die Würfel damit sortiert werden.“ Mit dieser Hypothese wird die Konzeptidee vorgestellt. Sie dienen damit vor allem der **Bildung von Modellvorstellungen** des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs und nicht ihrer Verifizierung. Ob das Konzept die gedachte Funktion wirklich erfüllen kann, entscheidet sich erst in den konstruktiven Details. Beim Lösen der in den konstruktiven Details auftretenden

Probleme konnten diese Hypothesen deshalb nicht unterstützen. Die für den Projektfortschritt hilfreichen Hypothesen wurden zu konkreten Details der Konzepte gebildet (vgl. Abbildung 1). Ihre Erstellung und Prüfung erforderten einen tieferen Blick ins Detail der Konstruktion und dementsprechend einen höheren Aufwand bei deren Erstellung und Prüfung. Die so gewonnenen Erkenntnisse dienen der **Verifizierung von Modellvorstellungen** des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs und konnten für den Projektfortschritt genutzt werden. Um diese Verifizierung der Modellvorstellungen der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge in den konkreten Details von Konzepten in Zukunft besser zu unterstützen, wird der Leitsatz der Hypothese erweitert. Die Modellvorstellung der Ursache wird dort explizit notiert. Dadurch soll die Methode dazu anregen, die Ursache des Problems noch genauer zu durchdenken. So zeigt sich, ob die Modellvorstellung bereits für eine Hypothese ausreicht, oder noch weitere Untersuchungen am Konzept notwendig sind. Aus der Studie zeigt sich, dass der Unterschied zwischen Modellbildung und Modellverifikation nicht immer klar ist. In der Modellbildung ist der Gestalt-Funktion-Zusammenhang zunächst noch unbekannt und wird identifiziert, dabei unterstützen Analysemethoden. Die hier vorgestellte Methode ist für diesen Zweck nicht geeignet. Die Modellverifikation überprüft einen identifizierten Gestalt-Funktion-Zusammenhang auf seine Übereinstimmung mit der Realität. Sie wird durch die hier entwickelte Methode unterstützt.

Damit kann die oben genannte Frage nach der Unterstützung des Konstruktionsingenieurs beantwortet werden:

*Mit der entworfenen Methode konnte eine Weiterentwicklung durch Erkenntnisgewinn in einigen Fällen erreicht werden. Eine Fokussierung auf die Modellverifikation der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge ist notwendig, um eine zielführendere Anwendung zu erreichen.*

#### **4.2 Vorstellung der Konstruktionshypothese**

Die aus den Anforderungen im Stand der Forschung und der Anwendung im Live-Lab entwickelte Methode wird im Folgenden beschrieben. Die Methode erhält die Bezeichnung „Konstruktionshypothese“ und wird anhand eines Formblatts mit ihren Bestandteilen vorgestellt. Abschließend wird sie an dem bereits aus Kapitel 1 bekannten Beispiel des Winkelschleifers erläutert.

Abbildung 2 zeigt das Formblatt der Konstruktionshypothese. Dieses beinhaltet den Leitsatz mit den Bestandteilen „Wenn [konkreter Gestaltparameter], dann [messbare Funktion], weil [Modellvorstellung der Ursache]“. Danach wird der Aufbau des Experiments zur Prüfung der Hypothese beschrieben. Abschließend wird das Ergebnis notiert. Dieser Aufbau folgt prinzipiell der allgemeinen wissenschaftlichen Hypothese (vgl. Kapitel 3.4), ist aber von der Anwendbarkeit bewusst auf die Verknüpfung von konkreten Gestaltparametern und

messbaren Funktionen in technischen Systemen eingeschränkt. Dadurch erhält der Konstruktionsingenieur ein methodisches Werkzeug, mit dem er seine Vorstellungen zum Zusammenhang der konstruktiven Details mit der Funktionserfüllung verifizieren kann.

Hypothesentitel: Nummer und Beschreibung des Gestaltparameters		
Leitsatz	Wenn	Konkreter Gestaltparameter mit Angabe der Referenz
	Dann	erwartete messbare Funktionsveränderung im Vergleich zur Referenz
	Weil	Modellvorstellung der Ursache der Funktionsveränderung
Prüfung	Beschreibung des Experiments mit allen relevanten Randbedingungen	
Ergebnis	Ergebnis der Hypothesenprüfung. Hieraus entsteht eine Handlungsempfehlung	

Abbildung 2: Template der Konstruktionshypothese

Am Beispiel des Winkelschleifers aus Kapitel 1 werden diese Bestandteile der Konstruktionshypothese retrospektiv auf eine Untersuchung angewandt und dabei näher erläutert. Als Ursache von Vibrationen des Winkelschleifers wurde die Schwingung der Motorwelle identifiziert [16]. In Abbildung 3 ist eine Konstruktionshypothese zum Einfluss des Lagersitzes der Motorwelle auf die Schwingung der Motorwelle dargestellt. Sie basiert auf einer Vermutung zum Zusammenhang der Schwingung der Motorwelle mit der Elastizität der Lagersitze. Aus dieser noch allgemein gehaltenen Vermutung kann eine Hypothese abgeleitet werden, welche eine Materialeigenschaft „Shore-Härte“ des Lagersitzes (Gestalt) mit der gemessenen Schwingung (Funktion) im Anwendungsfall Leerlauf verknüpft. Hierbei ist zu beachten, dass der Parameter Shore-Härte eine Kombination von Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften beinhaltet, weshalb ein erweitertes Experiment notwendig ist, um eventuelle Nichtlinearitäten im dynamischen Verhalten zu erfassen. Zur Auswahl von geeigneten Experimenten kann die Literatur zu Versuchsplanung, wie beispielsweise [17] oder [18] unterstützen.

Hypothese: Steifigkeit des Lagersitzes			Gestalt- parameter
Leitsatz	Wenn	der Lagersitz eine erhöhte Härte (75 Shore D) im Vergleich zu seiner Referenz (50 Shore D) besitzt	
	Dann	verringert sich die Bewegungsamplitude der Motorwelle im Leerlauf (Schwingungs-RMS-Wert fällt ab)	
	Weil	die Motorwelle durch höhere Zwangskräfte weniger aufschaukeln kann und geringere Schwingungsamplituden ins Gehäuse überträgt	
Prüfung	Lagerringe herstellen und auf dem Teilkomponentenprüfstand testen. Bewegungsamplitude der Motorwelle messtechnisch erfassen und die Werte von Prototyp und Referenz vergleichen		
Ergebnis	Hypothese ist verifiziert, die Schwingungs-RMS-Werte mit dem härteren Lagersitz sind geringer		

Abbildung 3: Beispielhypothese zum Lagersitz eines Winkelschleifers

In der „Wenn“-Beschreibung des Leitsatzes ist die Gestalt als unabhängige Variable mit dem Parameterwert 75 Shore D konkret beschrieben. Wichtig hierbei ist der Vergleich zur Referenz, deren Parameterwert 50 Shore D ebenfalls definiert wird. Im „Dann“-Teil des Leitsatzes wird die erwartete Änderung der Funktion beschrieben. Die Funktion ist als Schwingungs-RMS-Wert ebenfalls quantifiziert. Im „Weil“-Teil als dem letzten Abschnitt des Leitsatzes wird die Modellvorstellung der Ursache der erwarteten Änderung der Funktion erläutert. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf die Vermutung des Konstruktionsingenieurs ziehen und die Erklärung erarbeiteter Lösungen wird unterstützt (vgl. Kapitel 3.3). Die Prüfung wird mit einem Versuchsaufbau durchgeführt, in dem Prototyp und Referenz sich nur um diesen Parameter unterscheiden. Die hier beschriebene Prüfung stellt nur einen Ausschnitt aus dem in der Untersuchung durchgeführten Gesamtversuch dar. Das Ergebnis der Prüfung zeigt, dass die erwartete Schwingungsänderung der Motorwelle eintrat, womit diese Hypothese verifiziert wäre [19]. Der Konstruktionsingenieur kann damit erkennen, dass die Änderung des Gestaltparameters Shore-Härte in der vorhandenen Ausprägung des Lagersitzes kausal mit einer geringeren Schwingung der Motorwelle im Leerlaufbetrieb zusammenhängt. Seine Modellvorstellung zum Zusammenhang von Gestaltparameter und Funktion ist verifiziert und er kann für diesen Anwendungsfall einen schwingungsoptimierten Lagersitz konstruieren. Die mit einer Konstruktionshypothese gewonnene Erkenntnis kann in den meisten Fällen nicht über die geprüften Zusammenhänge heraus als gültig betrachtet werden. Eine Annahme, dass ein noch härterer Lagersitz weitere Vorteile bringt, kann aufgrund der dynamischen Wechselwirkungen im System ohne Überprüfung nicht getroffen werden. Im Rahmen des Entwicklungsprojekts zur Schwingungsoptimierung sind deshalb viele

Konstruktionshypothesen notwendig, um alle notwendigen Erkenntnisse zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen zu erfassen. Der Fokus der Konstruktionshypothese liegt nicht auf Erkenntnissen zur allgemeinen Eignung von Konzepten, sondern darauf, den Konstruktionsingenieur in besonders kritischen Details der Konstruktion zu unterstützen. Die Anwendung von Konstruktionshypothesen soll dazu dienen, ausreichendes Systemverständnis der konstruktiven Details aufzubauen, um weiter synthetisieren zu können.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Konstruktionshypothesen zeigten im Live-Lab „Mechatronische Systeme und Produkte“ Potential zur Unterstützung des Konstruktionsingenieurs. Die Maßnahme zur Verhinderung der Fehlanwendung in der Konzeptphase wird im nächsten Live-Lab-Durchlauf auf Wirksamkeit überprüft werden. Zu dieser Überprüfung der Wirksamkeit der Konstruktionshypothese ist eine Erweiterung der bislang durchgeführten Studie notwendig. Durch eine vertiefte Schulung soll die Methode den Studierenden verdeutlicht werden. In der Beobachtung einzelner Konstruktionsprozesse werden detailliertere Erkenntnisse zur Anwendung erhoben. Parallel zu dieser vertieften Untersuchung soll die Konstruktionshypothese in einem Entwicklungsprojekt im Unternehmensumfeld angewandt werden, um Potential dieser Methode in diesem Umfeld zu ermitteln.

## 6 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] S. Matthiesen, "SEVEN YEARS OF PRODUCT DEVELOPMENT IN INDUSTRY - EXPERIENCES AND REQUIREMENTS FOR SUPPORTING ENGINEERING DESIGN WITH 'THINKING TOOLS'," in *18th International Conference on Engineering Design ICED 11, Copenhagen, Denmark, 2011*.
- [2] A. Ruckpaul, A. Kritz, and S. Matthiesen, "Using eye tracking to understand the engineering designers' behavior in synthesis-driven analyzing processes: Experiences in study design," in *International conference on human behavior in design HBiD, 2014*.
- [3] A. Albers and E. Wintergerst, "The Contact and Channel Approach (C&C<sup>2</sup>-A) - relating a system's physical structure to its functionality: An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations," in A. Chakrabarti and L. Blessing, Eds.: Springer, 2014.
- [4] D. Hall and J. Jackson, "Speeding up new product development," *Strategic Finance*, vol. 74, no. 4, p. 32, 1992.
- [5] M. Meboldt, S. Matthiesen, and Q. Lohmeyer, "The dilemma of managing iterations in time-to-market development processes," in *2nd International Workshop on Modelling and Management of Engineering Processes MMEP 2012, Cambridge, UK, 2012*, pp. 127–139.
- [6] D. Türk, B. Leutenecker, and M. Meboldt, "EXPERIENCE THE RELEVANCE OF TESTING IN ENGINEERING DESIGN EDUCATION," *Proceedings of the 10th International CDIO Conference, 2014*.

- [7] W. Hacker, Ed, *Denken in der Produktentwicklung: Psychologische Unterstützung der frühen Phasen*. München u.a.: Hampp [u.a.], 2002.
- [8] H. Stachowiak, *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer, 1973.
- [9] J. Feldhusen and K.-H. Grote, *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, 8th ed. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [10] K. Ehrlenspiel and H. Meerkamm, *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*, 5th ed. München: Hanser, 2013.
- [11] D. Arnott, "Cognitive biases and decision support systems development: A design science approach," *Information Systems Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 55–78, 2006.
- [12] W. Hussy, M. Schreier, and G. Echterhoff, *Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften für Bachelor*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [13] N. Groeben and H. Westmeyer, *Kriterien psychologischer Forschung*, 2nd ed. München: Juventa-Verl, 1981.
- [14] *VDI 3822: Schadensanalyse - Grundlagen und Durchführung einer Schadensanalyse*, 3822, Blatt 1, 2011.
- [15] B. Walter, A. Albers, F. Haupt, and N. Bursac, "Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor - Konzipierung und Implementierung eines Live-Lab," in *27. DfX-Symposium 2016*, 2016, pp. 283–295.
- [16] S. Matthiesen, T. Gwosch, and H.-J. Gittel, *Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 18196N - Entwicklung einer beanspruchungsidentischen Prüftechnik für Elektrowerkzeug-Komponenten*.
- [17] K. Siebertz, D. van Bebber, and T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [18] W. Kleppmann, *Taschenbuch Versuchsplanung*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011.
- [19] S. Matthiesen, T. Gwosch, S. Mangold, P. Dültgen, and H.-J. Gittel, "Realitätsnahe Komponententests zur Unterstützung der Produktentwicklung bei der Validierung von Power-Tools," *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe*, vol. 07-08 2017.

KIT Scientific Working Papers  
ISSN 2194-1629

[www.kit.edu](http://www.kit.edu)