

Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung - Techniken zur Analyse und Synthese

Sven Matthiesen, Patric Grauberger, Kevin Hölz, Thomas Nelius,
Frank Bremer, Andreas Wettstein, Annabell Gessinger, Benjamin
Pfleger, Konstantin Nowoseltschenko, Katharina Voß

KIT SCIENTIFIC WORKING PAPERS 58



IPEK – Institut für Produktentwicklung
Kaiserstr. 10
76131 Karlsruhe

www.ipek.kit.edu

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
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>

2018

ISSN: 2194-1629

Abstract

Die Gestaltung ist ein Teil der Produktentwicklung. In ihr wird auf Basis eines Konzepts das funktionierende und herstellbare Produkt erzeugt. Sie lässt sich als iteratives Vorgehen aus Analyse und Synthese beschreiben. Hierbei spielt die Modellbildung eine entscheidende Rolle, da durch sie Zusammenhänge von Gestalt und Funktion abgebildet und genutzt werden können. In diesem Paper wird ein Überblick über die Möglichkeiten der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz sowie Techniken zur Unterstützung in der Analyse, Modellbildung und -verifikation und einen Ausblick in Techniken zur Synthese gegeben. Es werden Visualisierungen des C&C²-Ansatzes und der mit ihm möglichen Modellbildung dargestellt und beschrieben. Dadurch soll ein verbessertes Verständnis des Zusammenhangs zwischen Funktion und Gestalt ermöglicht werden.

Keywords: Gestaltung, C&C²-Ansatz, Modellbildung, Analyse, Synthese

Einleitung

Die Produktentwicklung beschreibt einen Prozess, in dem aus der Produktplanung ein funktionsfähiges und produzierbares Produkt erzeugt wird. Ein generisches Vorgehen dazu wird in der VDI 2221-1:2018-03 beschrieben [1]. In Abbildung 1 ist eine Möglichkeit der Einordnung der Gestaltung in dieses Vorgehen dargestellt. Hier werden die Ziele, Aktivitäten und Ergebnisse der Gestaltung als iterativer Prozess sowie die notwendigen zentralen Eingangsgrößen beschrieben. Der Entwicklungsauftrag sowie die Anforderungen an das Produkt sind als Ziele dargestellt, die für die Gestaltung relevant sind. Diese Ziele werden durch Aktivitäten in Ergebnisse überführt. Hierbei entsteht iterativ beispielsweise die Gestaltdokumentation des herstellbaren Produkts, unter der notwendige Dokumentationen verstanden werden, um letztendlich das herstellbare Produkt zu definieren. Die Aktivitäten der Gestaltung – in der Mitte abgebildet – dienen dazu, eine Gestalt zu finden, mit der die Funktion des Produktes erfüllt werden kann. Um diese Gestalt zu finden und das herstellbare Produkt definieren zu können, ist es notwendig, die Zusammenhänge von Gestalt und Funktion in der Analyse zu verstehen und in der Synthese zu nutzen. Die Aktivitäten der Gestaltung werden in Abbildung 4 detailliert erläutert. Die zentralen Eingangsgrößen der Gestaltung sind Erfahrungen mit verwandten Produkten sowie die Gestaltdokumentation von Vorgänger- oder Referenzprodukten. Die Überführung der Ziele in die Ergebnisse der Gestaltung findet häufig auf Basis von bereits Bekanntem statt.

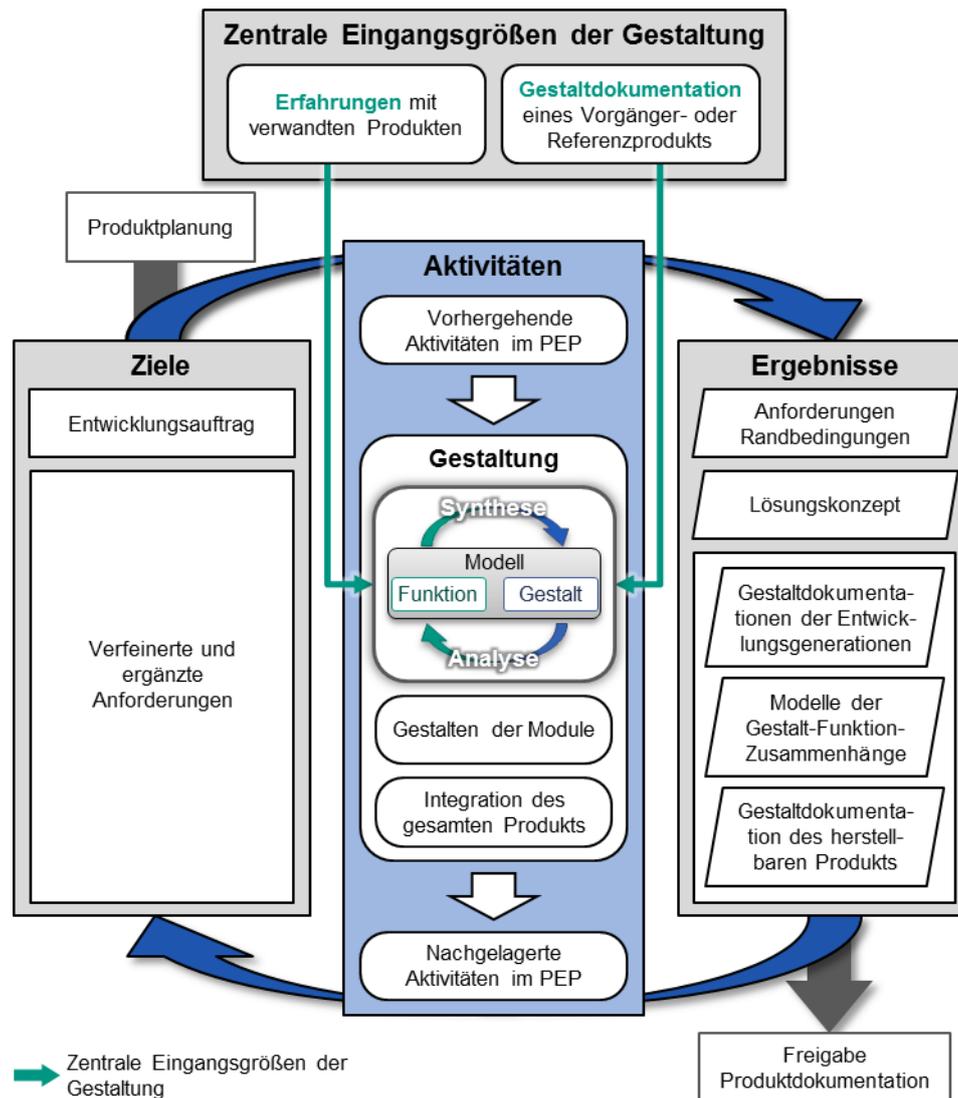


Abbildung 1: Die Gestaltung in der Produktentwicklung, basierend auf der VDI 2221 [1]

In der Regel werden technische Produkte nicht komplett neu entwickelt, sondern basieren auf bereits vorhandenen Produkten. Bei der Gestaltung wird häufig auf Erfahrungen mit verwandten Produkten zurückgegriffen, indem Lösungsprinzipien genutzt und adaptiert werden. [2, 3] In Unternehmen ist die Dokumentation des Vorgängerprodukts ein wichtiger Anhaltspunkt für die Gestaltung. Auch auf die Dokumentation von Referenzprodukten, deren Prinzipien adaptiert werden sollen, wird in der Gestaltung zurückgegriffen.

Aus den vorliegenden zentralen Eingangsgrößen lassen sich die Risiken für die Gestaltung einschätzen. In Abbildung 2 ist dargestellt, wie aus diesen Eingangsgrößen vier Risikocluster entstehen. Die sich ergebende Matrix besitzt zwei Dimensionen. Die Gestaldokumentation (vertikal) unterscheidet sich in dokumentierte Gestalt (beispielsweise aus Vorgängerprodukten im Unternehmen) und nicht dokumentierte Gestalt. Die Erfahrung mit verwandten Produkten wird als Bekanntheitsgrad der Zusammenhänge von Gestalt und Funktion beschrieben und bildet die zweite Dimension (horizontal). Hier kann zwischen unbekanntem, implizit bekanntem und explizit dokumentiertem Gestalt-Funktion-Zusammenhang unterschieden werden. Hier zeigt sich auch, dass ein explizit bekannter Gestalt-Funktion-Zusammenhang immer eine Gestaldokumentation benötigt, weshalb er ohne sie nicht existieren kann.

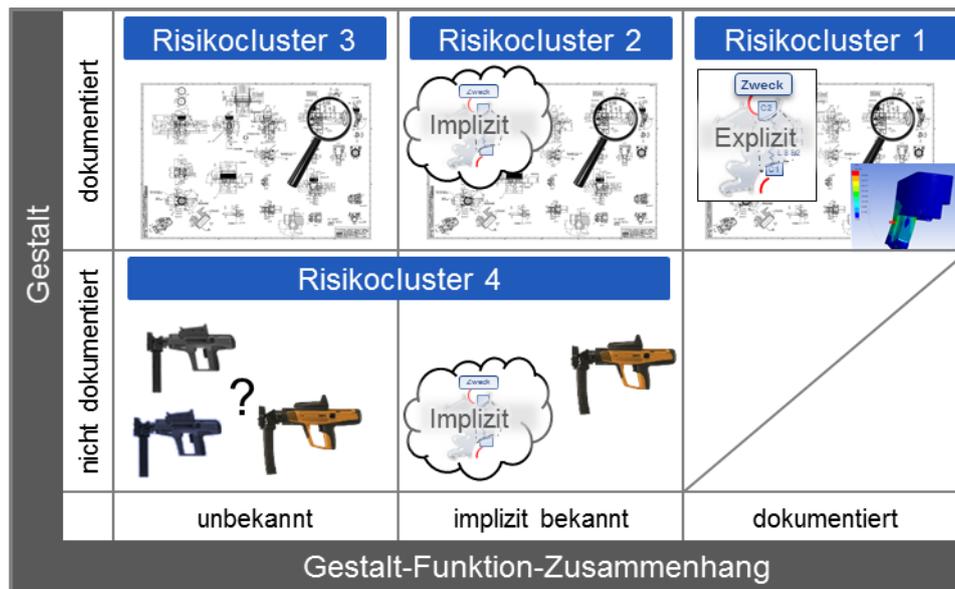


Abbildung 2: Risikocluster in der Gestaltung

Das Risiko für die Gestaltung ist immer hoch, wenn keine Gestaltdokumentation vorliegt (Risikocluster 4). Ist die Gestalt dokumentiert, entscheidet das Wissen über den Gestalt-Funktion-Zusammenhang über das Risiko. Je besser dieser Zusammenhang bekannt und dokumentiert ist, desto geringer ist das Risiko in der Gestaltung. Um Produkte gestalten zu können, müssen die Zusammenhänge von Gestalt und Funktion verstanden werden [4]. Die Funktionserfüllung ist dabei abhängig von den konstruktiven Details der Produktgestalt [5].

Am **Beispiel** von Power-Tools sind beispielhaft konstruktive Details in Abbildung 3 dargestellt. Hier zeigt sich, wie bei verschiedenen Power-Tools, die auf dem gleichen Konzept basieren, Unterschiede in den konstruktiven Details das Systemverhalten beeinflussen.

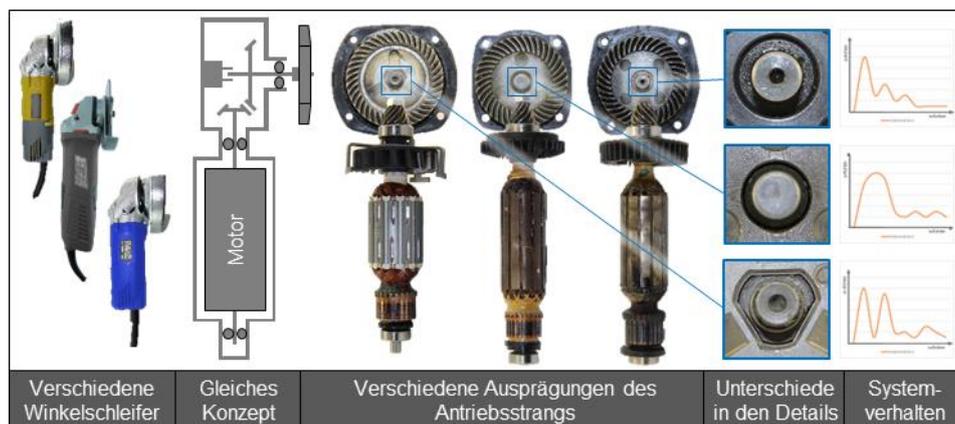


Abbildung 3: Unterschiede in den konstruktiven Details am Beispiel Winkelschleifer

Gestalt-Funktion-Zusammenhänge werden in der Gestaltung durch eine Analyse des technischen Systems identifiziert. Die Umsetzung einer Funktion in eine Gestalt, die sie erfüllen soll, erfolgt durch die Synthese. Hier werden erkannte Zusammenhänge genutzt, um eine Gestalt zu erzeugen, mit der die Funktion erfüllt wird. Die Gestaltung findet im Wechselspiel aus Analyse- und Synthesephasen statt. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 4 veranschaulicht. Zentral in diesem Vorgehen ist das Modell des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs. In diesem Modell liegen Vermutungen und Erkenntnisse dazu

vor, wie die Gestalt (die konstruktiven Details) mit der Funktionserfüllung des Produktes zusammenhängen. Dieses Modell ist häufig implizit, kann aber auch expliziert werden.¹

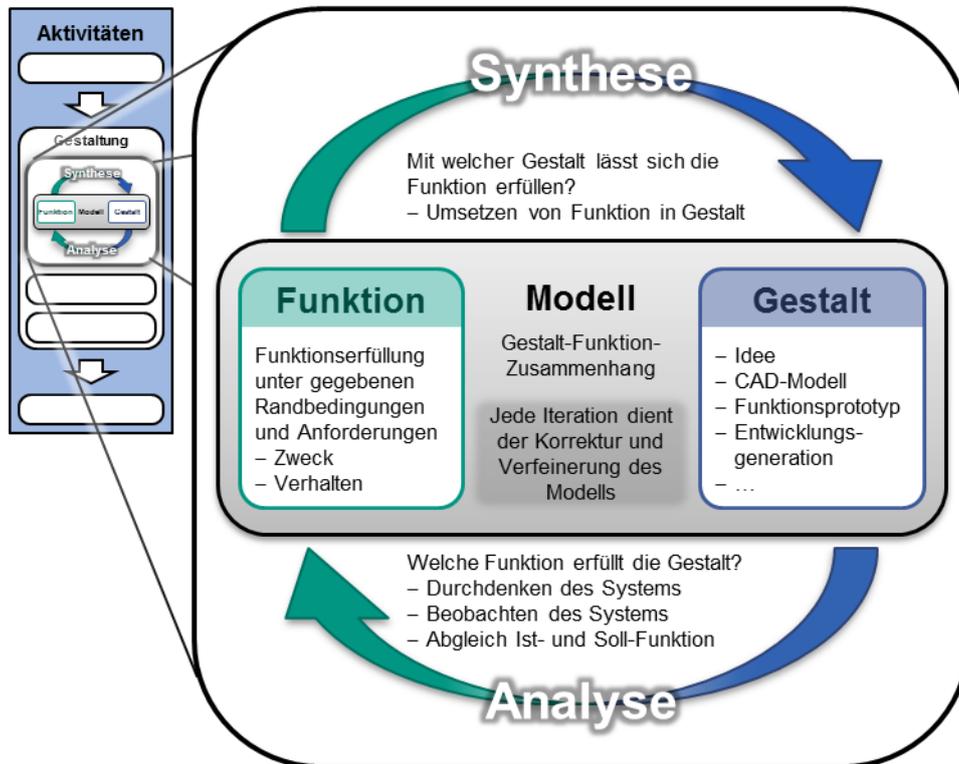


Abbildung 4: Vorgehen in der Gestaltung

Dieses Vorgehen in der Gestaltung wird nachfolgend an einem **Beispiel** beschrieben. In einem Unternehmen, das Power-Tools herstellt, sollte eine neue Generation eines Bolzensetzgeräts entwickelt werden. Ein Bolzensetzgerät ist ein Power-Tool, mit welchem Nägel in Untergründe getrieben werden können. Hallen, wie beispielsweise Sporthallen oder Supermärkte, werden oft mit sogenannten Kassettenblechen gedeckt. Diese Kassettenbleche müssen an den Trägern der metallischen Untergrundkonstruktion befestigt werden. In Abbildung 5 ist die Befestigung von Kassettenblechen mit einem Bolzensetzgerät abgebildet. Es sind dabei unterschiedliche Anwendungsfälle des Bolzensetzgeräts dargestellt. Die Funktionsweise des Power-Tools muss beispielsweise sowohl in horizontaler Arbeitsweise als auch bei Überkopf-Arbeiten zuverlässig gewährleistet sein.



Abbildung 5: Anwendungsfälle des Bolzensetzgeräts

¹ Wissenschaftlicher Austausch von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen und Prof. Dr. Mirko Meboldt im November 2017

Diese Befestigung kann mit speziellen Nägeln durch ein Bolzensetzgerät erfolgen. In Abbildung 6 ist das technische Funktionsprinzip eines Bolzensetzgeräts dargestellt.

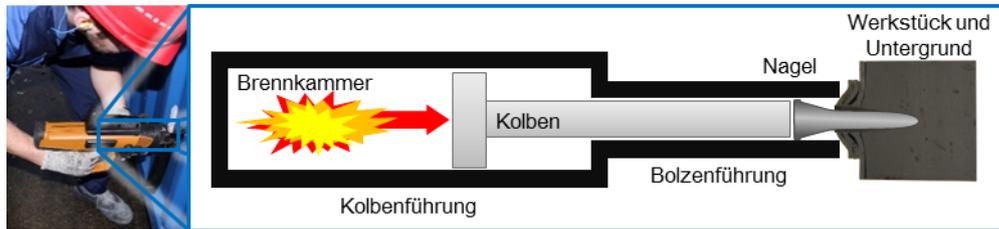


Abbildung 6: Anwendung und Funktionsweise des Bolzensetzgeräts

In der Brennkammer wird ein Treibmittel, wie z.B. Treibladungspulver gezündet. Durch die Explosion wird der Kolben in der Kolbenführung – im Bild nach rechts – beschleunigt. Der beschleunigte Kolben drückt dadurch den Nagel in das Werkstück und den Untergrund.

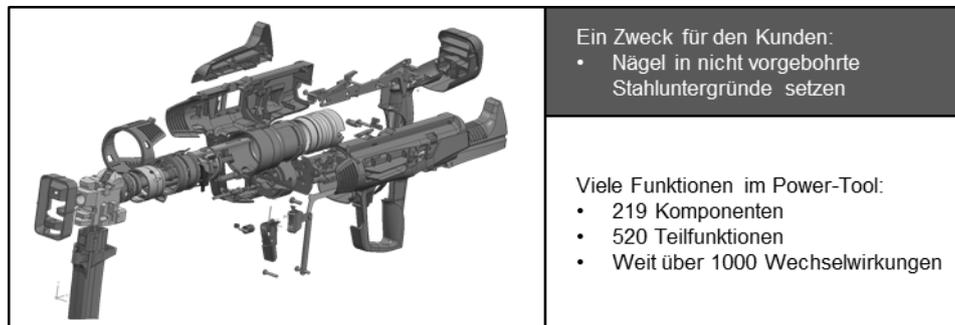


Abbildung 7: Anwendungsfälle des Bolzensetzgeräts nach [4]

Um nun die neue Generation entwickeln zu können (Synthese) musste das Funktionsprinzip zunächst auf einer detaillierten Ebene analysiert und verstanden werden. In Abbildung 8 ist links die Vorgängergeneration und rechts die neue, zu entwickelnde Generation des Bolzensetzgeräts dargestellt.

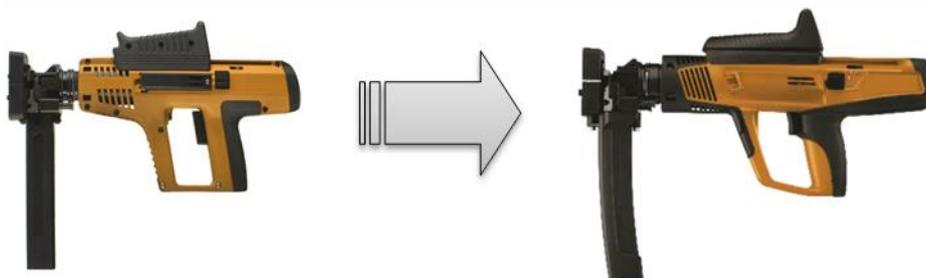


Abbildung 8: Entwicklungsauftrag „neue Generation des Produkts“

In Abbildung 9 ist die Repetiereinheit des Bolzensetzgeräts abgebildet. Innerhalb dieser Repetiereinheit ist die sogenannte „Schiebernase“ ein wichtiges Bauteil. Mit dieser Schieber Nase wird der Kolben nach der Setzung eines Nagels wieder zurückgezogen. Diese Schieber Nase sollte in der neuen Generation auf eine höhere Ausfallsicherheit im Vergleich zum Vorgängerprodukt optimiert werden.

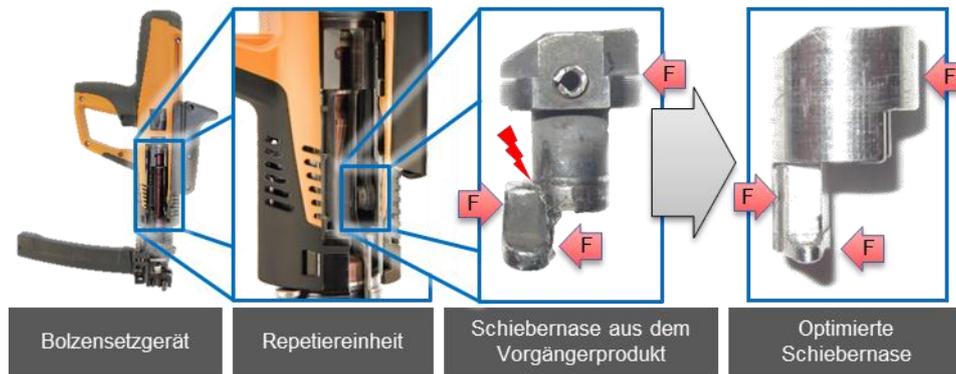


Abbildung 9: gebrochene Schiebernase der Repetiereinheit eines Bolzensetzgeräts

Das Systemverhalten der Schiebernase im Betrieb wurde beobachtet, um die Ursache des Versagens zu finden. Die Kräfte auf die Schiebernase sind in Abbildung 9 in Rot dargestellt. Diese Kräfte erzeugen einen ungünstigen Kraftfluss im Bauteil, weshalb die Schiebernase versagt. Die anschließende Optimierung des Kraftflusses der Schiebernase der neuen Generation ist im rechten Bildbereich erkennbar. Die Ursache des Bauteilversagens wurde in der Analyse ermittelt, wodurch die Synthese einer geeigneteren Gestalt möglich wurde.

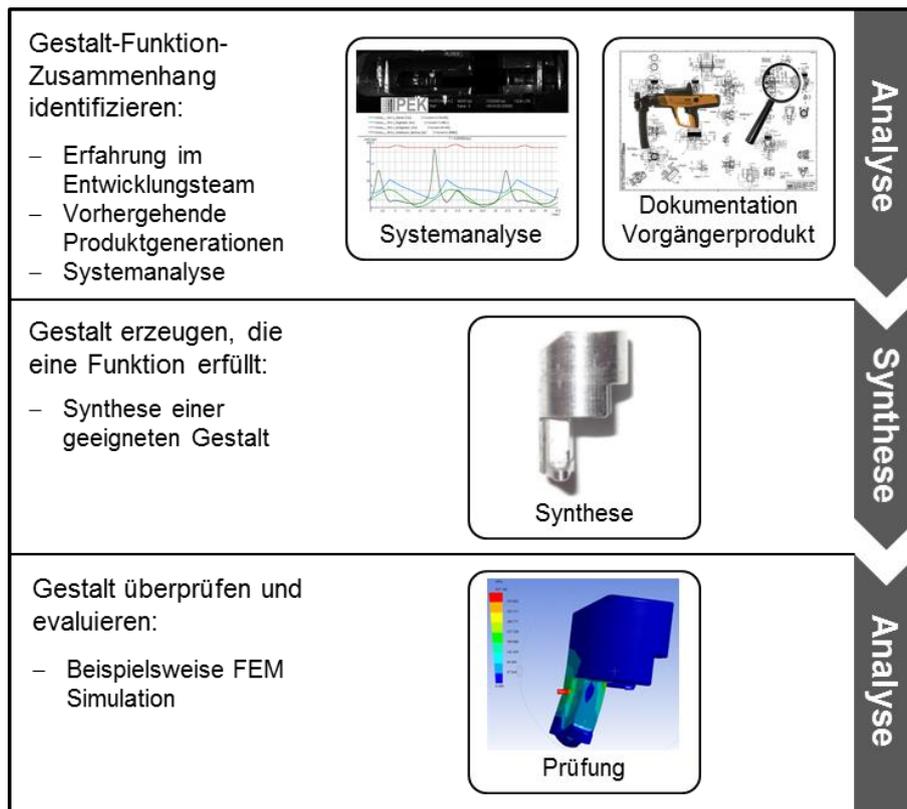


Abbildung 10: Analyse und Synthese am Beispiel der Schiebernase

In Abbildung 10 ist das Wechselspiel von Analyse und Synthese in der Gestaltung am Beispiel des Teilsystems Schiebernase des Bolzensetzgerätes dargestellt. Durch die Analyse konnte die Modellbildung zum Verständnis des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs stattfinden. Auf Grundlage dieses Modells fand die Synthese der Gestalt, welche die Funktion erfüllt, statt. Ob die neue Gestalt die Funktion besser erfüllt, wurde im Anschluss an die Synthese wiederum analysiert.

Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz

Die Modellbildung von Zusammenhängen von Gestalt und Funktion kann mit dem C&C²-Ansatz durchgeführt werden [6, 7]. Er besteht aus Modellelementen und Regeln zu ihrer Anwendung in der Modellbildung. Mit dem C&C²-Ansatz werden C&C²-Modelle erstellt, die konkrete Gestalt-Funktion-Zusammenhänge explizit abbilden. In Abbildung 11 sind die Modellelemente und Anwendungsregeln des C&C²-Ansatzes dargestellt. Die drei Kernelemente Wirkflächenpaar (WFP), Leitstützstruktur (LSS) und Connector (C) verbinden Gestalt und Funktion im technischen System. Die Nebenelemente sind die Wirkfläche (WF), die Reststruktur (RS) und die Begrenzungsfläche (BF). Sie können zusätzlich zu den Kernelementen betrachtet werden, liegen aber nicht im Fokus der Modellbildung. Die Strukturelemente helfen dabei, Struktur in modellierte Zusammenhänge zu bringen, wo dies notwendig ist. Sie sind die Tragstruktur (TS), das Wirknetz und die Wirkstruktur. Die Grundhypothesen beschreiben die Anwendung des C&C²-Ansatz [6].

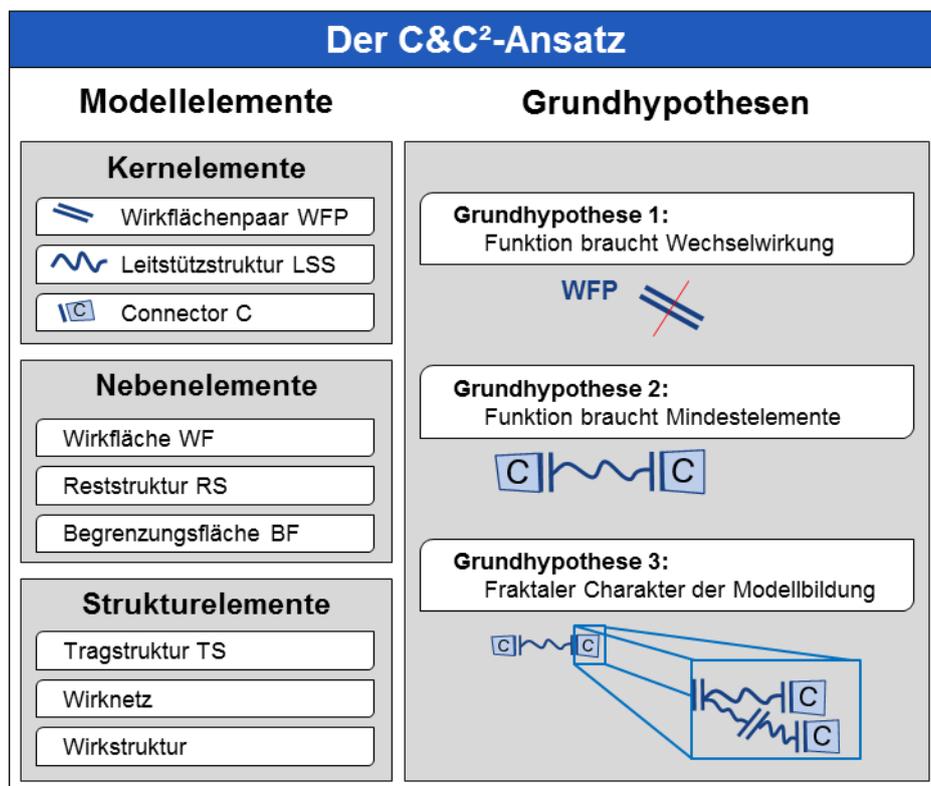


Abbildung 11: Der C&C²-Ansatz - Modellelemente und Grundhypothesen

Der Zusammenhang zwischen den Kern-, Neben- und Strukturelementen ist in Abbildung 12 dargestellt. Ausgehend von den Kernelementen bildet sich ein Wirknetz. Das Wirknetz ist die Summe der Elemente eines C&C²-Modells. Die Nebenelemente können neben den Kernelementen im Wirknetz vorhanden sein. Das Wirknetz ist nur für einen betrachteten Zustand des Systems gültig. Reales Systemverhalten ist meist nur durch mehrere Zustände abbildbar. Dies wird durch die Wirkstruktur dargestellt. Die Wirkstruktur ist die Summe der Wirknetze über alle betrachteten Zustände.

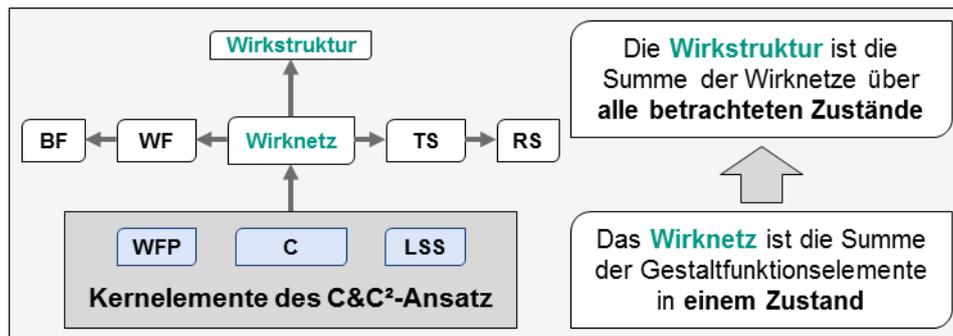


Abbildung 12: Zusammenhang von Kern-, Neben- und Strukturelementen des C&C²-Ansatz

In Abbildung 13 ist die Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz visualisiert. Mittig befindet sich ein C&C²-Modell eines Zahnradpaars. Der Zweck dieses Modells ist das Erklären der Drehmomentübertragung in der universitären Lehre. Links sind die Bestandteile eines C&C²-Modells aufgeführt, rechts die Anwendungsregeln und Hilfestellungen zur Modellbildung.

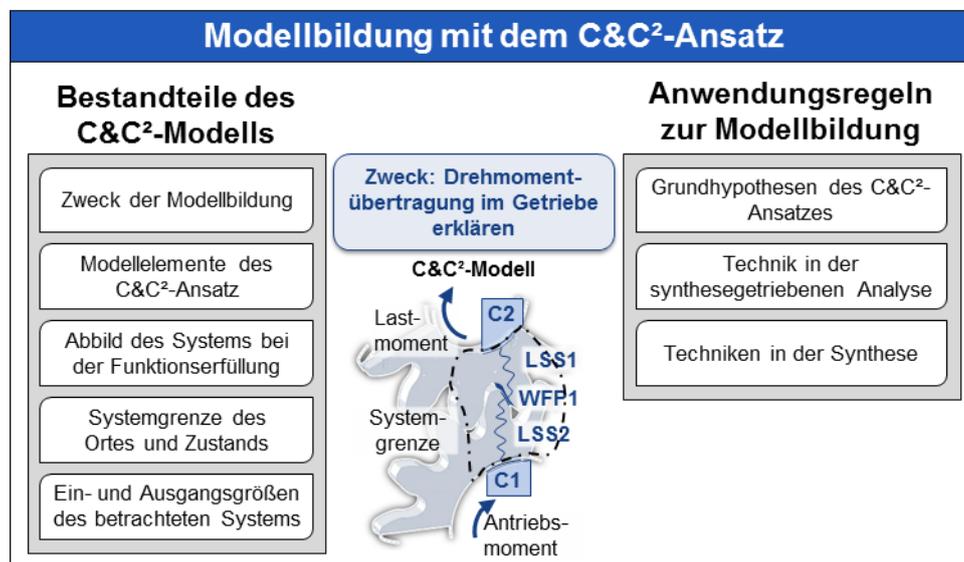


Abbildung 13: Inhalte von C&C²-Modellen

Das Vorgehen zur Modellbildung des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs durch die Erstellung eines C&C²-Modells ist in Abbildung 14 dargestellt. In den Schritten a) bis f) wird das C&C²-Modell erstellt, in Schritt g) wird es verifiziert.

Jedes C&C²-Modell benötigt einen Zweck. Dieser Modell-Zweck wird dokumentiert. Danach muss eine geeignete Visualisierung des technischen Produkts für diesen Modellzweck gefunden werden. Dieses Abbild des Systems bei der Funktionserfüllung kann mit Hilfe von Analysemethoden erstellt werden [8]. Systemgrenzen müssen dazu definiert werden. Diese charakterisiert welche Systemzustände (zeitliche Grenze) und welche Teilsysteme (räumliche Grenze) im Modell betrachtet werden.

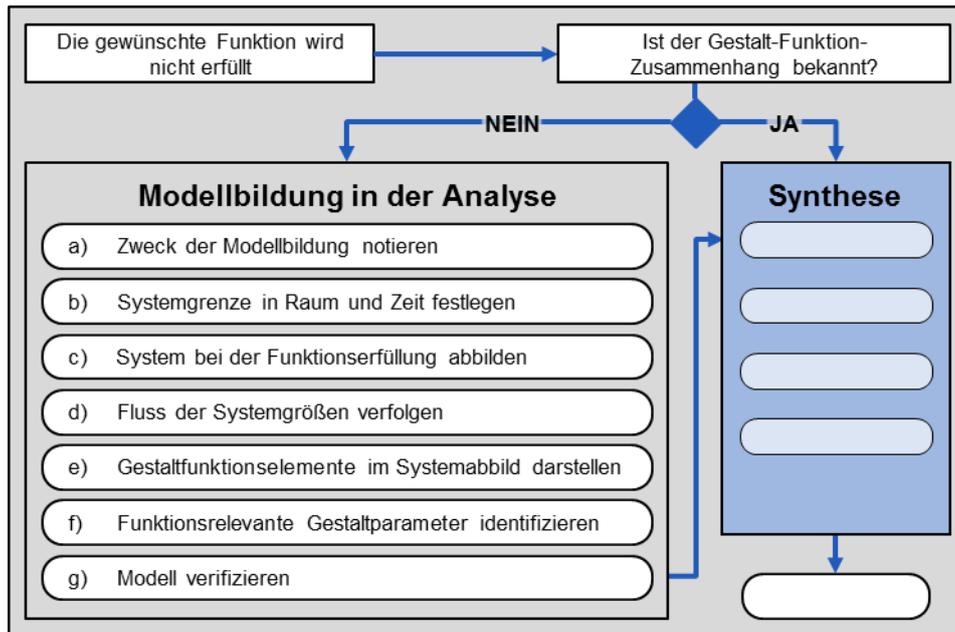


Abbildung 14: Modellbildung in der Analyse

Darauf aufbauend wird der Fluss der Systemgrößen (Energie, Stoff und Information) verfolgt und die Gestaltfunktionselemente im Systemabbild dargestellt. Auf Basis dieses C&C²-Modells können nun die funktionsrelevanten Gestaltparameter identifiziert werden. Eine Verifikation des Modells gewährleistet zum Abschluss der Analyse, dass das gebildete Modell die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge ausreichend korrekt wiedergibt. Abbildung 15 zeigt die an die Modellbildung in der Analyse anschließende Vorgehensweise in der Synthese.

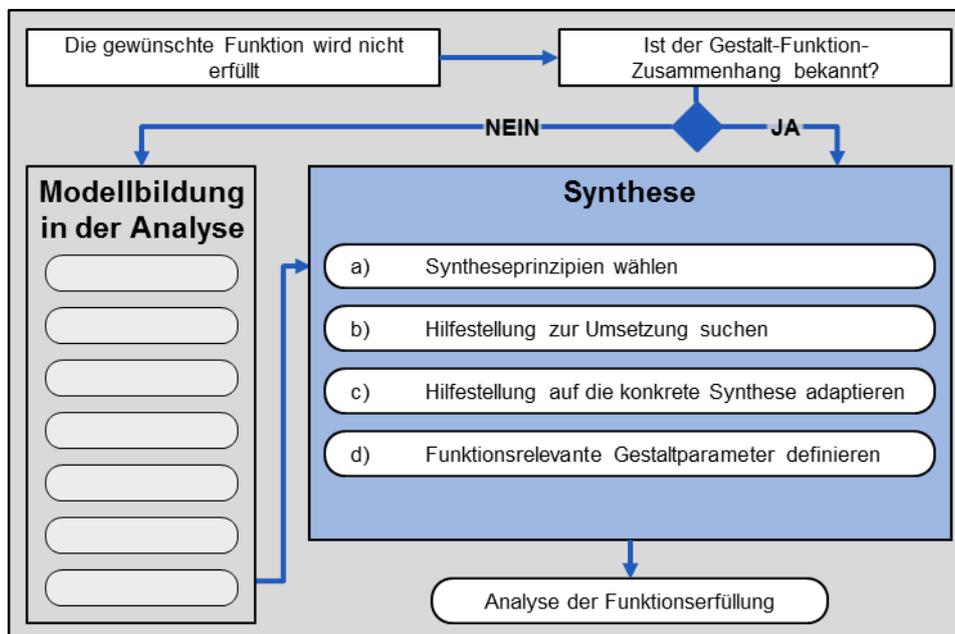


Abbildung 15: Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Synthese

Analyse technischer Systeme als Basis der Modellbildung

Für die Analyse von technischen Produkten und Systemen sind die in Abbildung 16 veranschaulichten Punkte relevant. Das Beschreiben der funktionsrelevanten Gestaltparameter dient der Identifizierung von Gestalteeigenschaften und –merkmalen, die in der Analyse betrachtet werden müssen. Es müssen sowohl die Gestaltparameter der Produktgestalt als auch der Umwelt erfasst werden.

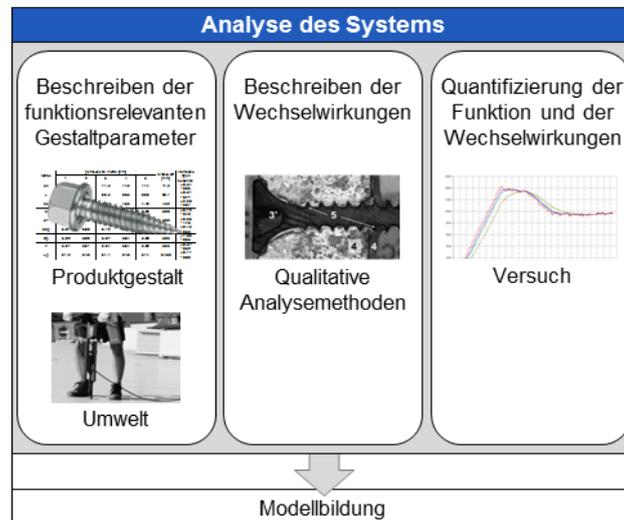


Abbildung 16: Analyse von technischen Systemen und Produkten

Dazu werden qualitative Analysemethoden und eine Quantifizierung im Versuch genutzt. Die qualitativen Analysemethoden dienen zur Beobachtung des realen Systemverhaltens. Durch diese Beobachtung können Ursachen für ein Systemverhalten gefunden werden, die ansonsten unklar bleiben. Die Quantifizierung im Versuch erzeugt ein messbares Kriterium zum Zusammenhang zwischen Gestalt und Funktion. [8] In Abbildung 17 ist der Kraftfluss durch ein Auflager in verschiedenen Zuständen abgebildet. Im linken Bild ist der in der Gestaltung definierte Idealzustand dargestellt. Hier besitzt das WFP 1 (rot dargestellt) seine ideale Größe und Lage. In der Mitte zeigt sich eine Abweichung der gefertigten realen Produktgestalt vom Idealzustand durch das verkleinerte WFP 1. Rechts zeigt sich eine Verschiebung der oberen Komponente durch das verschlissene WFP 1.

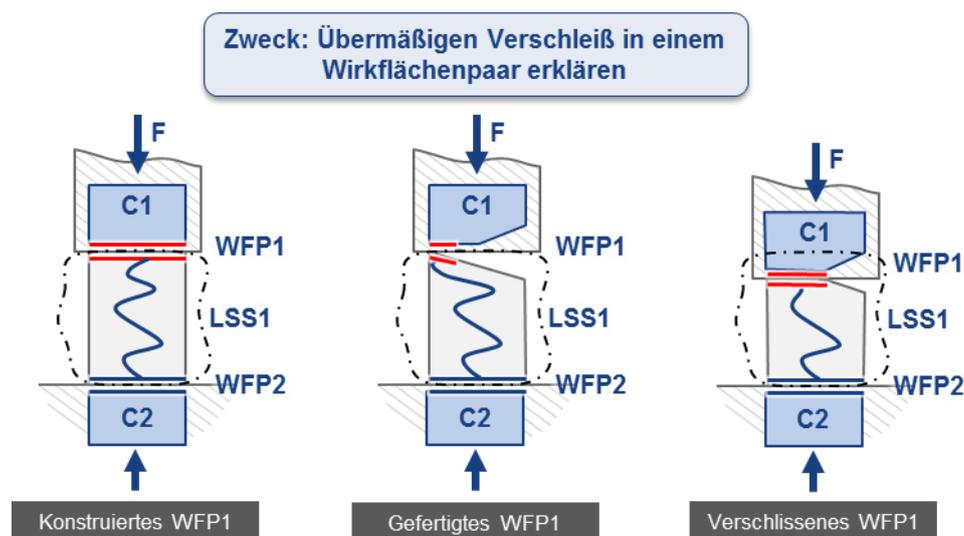


Abbildung 17: Wirkflächenpaare bei verschiedenen Systemzuständen, angelehnt an Lemburg [9]

Erfolgt nun die Modellbildung nur auf Basis des Idealzustands so kann das reale Systemverhalten nicht betrachtet werden. Eine Analyse der realen Gestalt eines Systems kann Systemverhalten erklären, das bei Betrachtung der idealen Gestalt unerkannt bleibt.

Die Vorgehensweise in der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz wird an einem weiteren **Beispiel** verdeutlicht. Die Kassettenbleche – vgl. obiges Beispiel – werden nicht nur mit einem Bolzensetzgerät und Nägeln an den Stahlträgern befestigt, sondern sie müssen auch untereinander verbunden werden, wenn keine Stahlträger darunter liegen. Hierfür sind aufgrund der dünnen Materialien die verwendeten Nägel ungeeignet und es kommen sogenannte Blechbohrschrauben zum Einsatz. Die Besonderheit dieser Schrauben ist, dass eine Verschraubung ohne Vorbohren möglich ist. Die Blechbohrschrauben erzeugen zuerst ihr eigenes Bohrloch und prägen danach ein Gewinde in diesem Bohrloch. Der Nachteil dabei ist, dass durch das Bohren Späne entstehen. Diese Späne korrodieren auf dem Kassettenblechdach und müssen daher entfernt werden. In Abbildung 18 ist im oberen Bildbereich die Blechbohrschrauben und ihre Anwendung dargestellt. In einem Entwicklungsprojekt soll eine neue Generation dieser Schrauben Bleche ohne Spanbildung durchdringen. Es war keine Blechbohrschraube am Markt verfügbar, die ohne Zerspanen die Kassettenbleche durchdringen kann. In diesem Entwicklungsprojekt war die zentrale Eingangsgröße der Gestaltung (vgl. auch Abbildung 1) die Erfahrung mit dem Referenzprodukt „Schnellbauschraube“. Schnellbauschrauben werden vorrangig beim Innenausbau für die Montage von Gipskartonplatten und dergleichen verwendet (Abbildung 18 unten). Sie können Bleche spanlos durchdringen, jedoch nur bei geringen Wandstärken. Die Funktionsweise von Schnellbauschrauben wurde deshalb analysiert, um sie zu verstehen und dann auf Blechbohrschrauben zu übertragen.



Abbildung 18: Anwendung von Blechbohrschrauben

Im Folgenden wird genauer auf die Bildung eines C&C²-Modells der Schnellbauschraube eingegangen. Der jeweilige übergeordnete Modellzweck ist die Identifikation von Gestaltmerkmalen, welche ein spanloses Einschrauben ermöglichen.

In der Analyse wurde zunächst ein initiales C&C²-Modell erstellt. Es ist in Abbildung 19 visualisiert. In diesem und den folgenden Bildern sind die C&C²-Modelle auf die aktuelle Darstellungsform der Elemente angepasst. Die Systemgrenze umfasste WFP1 (Werkstück-Schnellbauschraube) und WFP2 (Schnellbauschraube-Bit), die durch die LSS1-2 verbunden wurden. Die antriebsseitige Axialkraft des

Benutzers, sowie das Drehmoment des Schraubers, werden dabei in Connector C2 berücksichtigt. Die Parameter der Einspannung, wie beispielsweise die Steifigkeit der Wand, werden in C1 abgebildet.

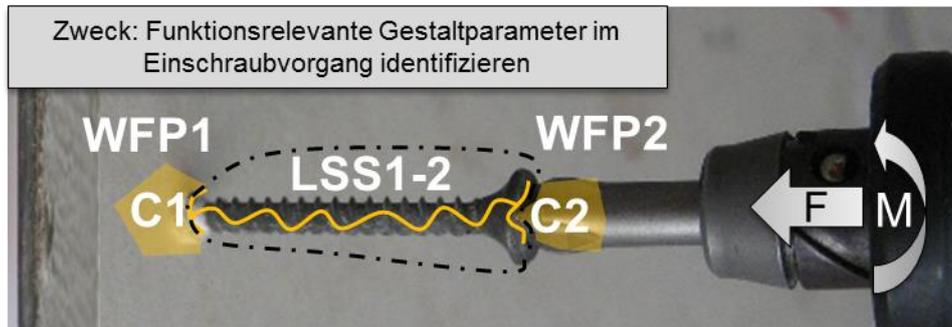


Abbildung 19: Initiales C&C²-Modell der Schnellbauschraube

Es wurde Zoom-In als Technik der synthesegetriebenen Analyse angewandt, um die Gestaltparameter in den konstruktiven Details erfassen zu können. In Abbildung 20 ist ein C&C²-Modell der Kontaktstelle Werkstück-Schnellbauschraube mit erhöhtem Detaillierungsgrad dargestellt.

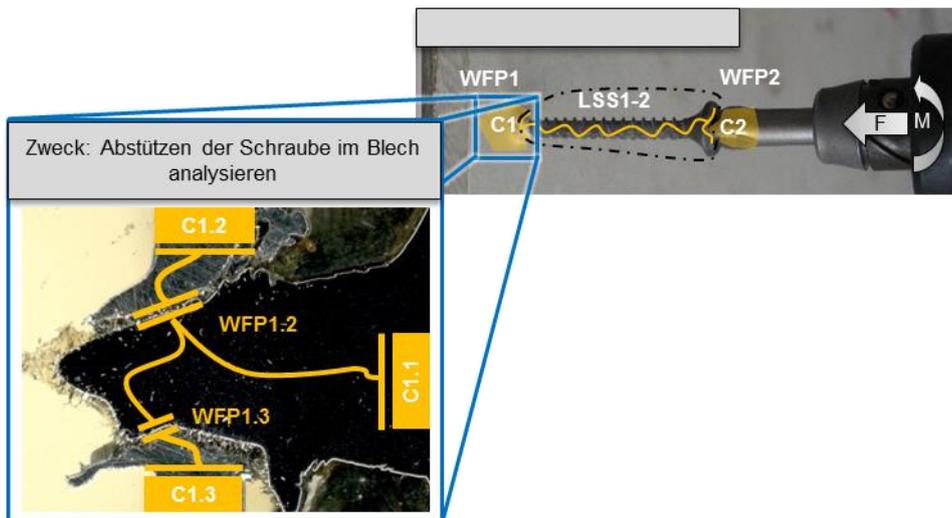


Abbildung 20: Zoom-In am Wirkflächenpaar Schraubenspitze-Blechuntergrund

Ein auftretendes Problem von Schnellbauschrauben ist, dass es während des Einschraubvorgangs oftmals zum Stehenbleiben der Schraube im Werkstück kommt. Die Ursache hierfür wurde nicht an der Schraubenspitze, sondern in einem anderen Teilsystem, dem Schraubenkopf, vermutet. Mit der Technik „Shift“ wurde der Fokus der Analyse entlang des betrachteten Wirknetzes verschoben. In Abbildung 21 ist diese Technik visualisiert und veranschaulicht den verschobenen Fokus von WFP1 zu WFP2 zwischen Schraubenkopf und Bit. Dabei wurde die räumliche Systemgrenze erweitert, da im initialen C&C²-Modell der Bit noch außerhalb der Systemgrenze lag.

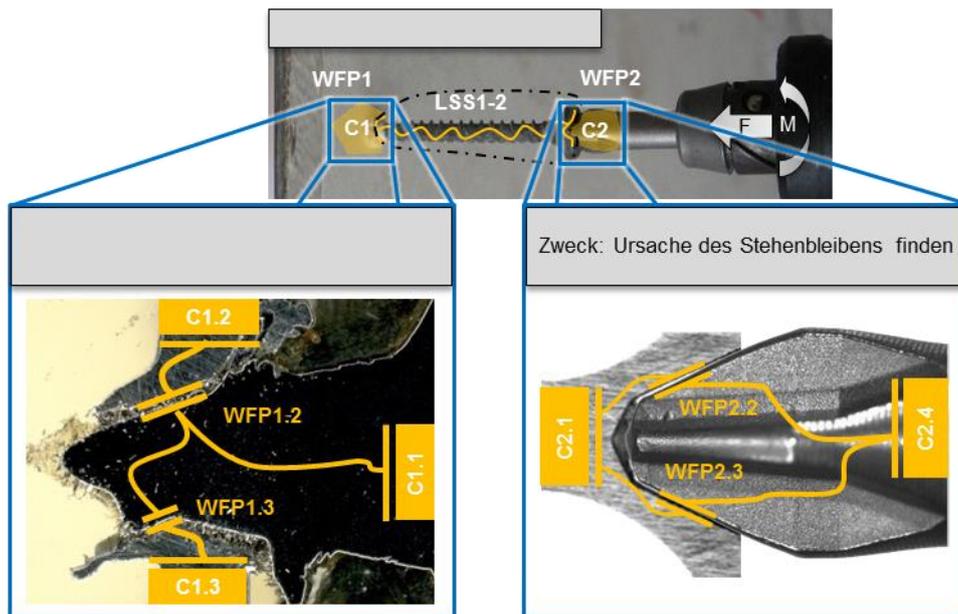


Abbildung 21: Analysemethode Shift

Die Definition von Zuständen zur Betrachtung von dynamischen Systemen ist häufig notwendig, um ihr Verhalten verstehen zu können. Hierzu kann das C&C²-Sequenzmodell genutzt werden, mit dem Zustände, die das System bei der Funktionserfüllung einnimmt, verknüpft werden können [10]. Abbildung 22 zeigt einen Ausschnitt aus einem Sequenzmodell des Eindringvorgangs der Schnellbauschraube. Hier wurden unterschiedliche zeitliche Zustände definiert und die dazu relevanten Gestaltungsfunktionselemente in verknüpften C&C²-Modellen dargestellt.

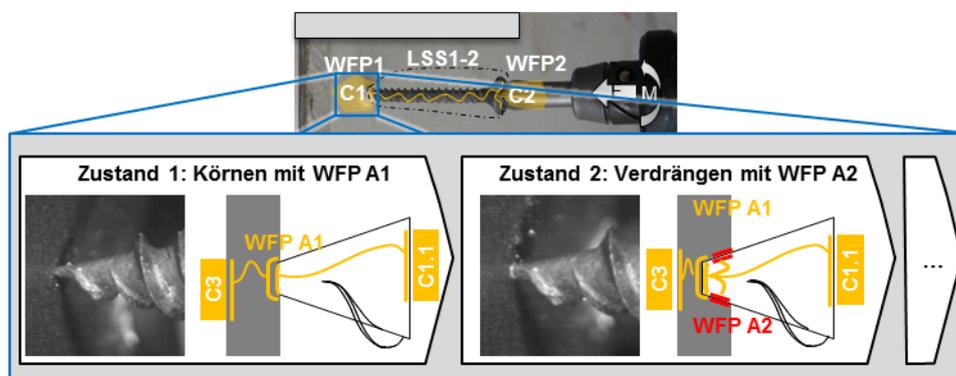


Abbildung 22: Ausschnitt des C&C²-Sequenzmodells im Einschraubvorgang nach Thau [11]

Eine Herausforderung in der Analyse ist die eingeschränkte Beobachtbarkeit des Systemverhaltens in den konstruktiven Details. Häufig finden sich WFP an Stellen im System, die der menschlichen Beobachtung nicht zugänglich sind, was die Analyse erschwert. Die Beobachtung kann in diesem Fall durch geeignete Analysemethoden unterstützt werden.

Ein **Beispiel** hierfür ist die spannungsoptische Analyse, in der WFP und LSS erkannt werden können. Abbildung 23 zeigt die Anwendung dieser Analysemethode zur Untersuchung der auftretenden WFP im Einschraubvorgang eines Dübels. Hier zeigen sich Unterschiede zwischen zwei Varianten von Dübeln in Bezug auf die Kräfteinleitung in den Untergrund.

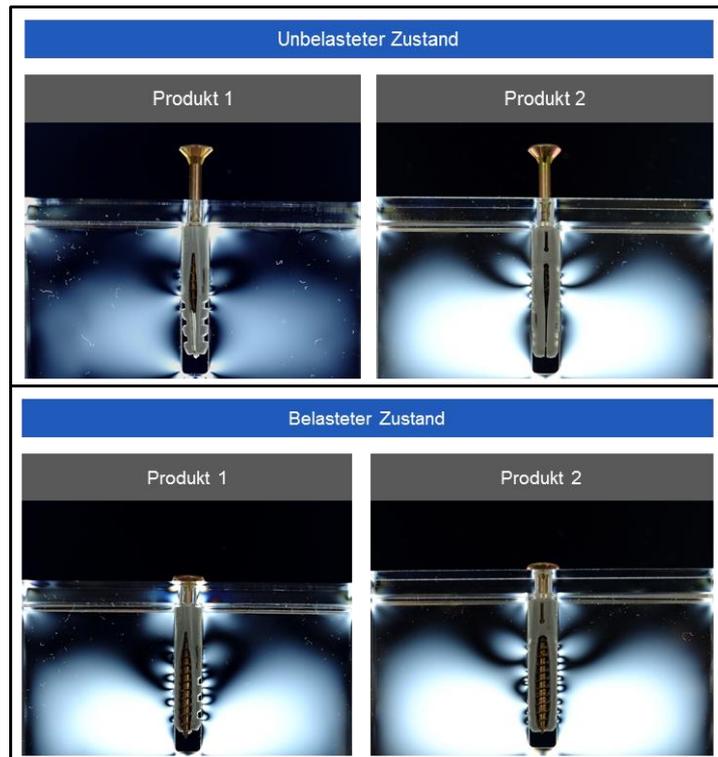


Abbildung 23: Spannungsoptik am Beispiel Kunststoffdübel

Weitere Analysemethoden, um schwer beobachtbare Systeme analysieren zu können, werden von Thau beschrieben [11]. Um Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zu quantifizieren, werden geeignete Analyseumgebungen benötigt. Diese Analyseumgebungen können als Entwicklungsprüfstände ausgeführt sein, in denen das Systemverhalten realitätsnah und reproduzierbar abgebildet und untersuchbar gemacht wird. Die Analyse der Einflüsse des Anwenders auf die Funktionsweise eines Produktes ist durch die Vielzahl an unterschiedlichen Anwendern hierbei eine besondere Herausforderung [12]. Ein **Beispiel** für einen Entwicklungsprüfstand ist in Abbildung 24 gezeigt. Hier wird der Mensch als Anwender in seinem Einfluss auf ein Power-Tool realitätsnah und auch reproduzierbar durch einen Roboter abgebildet. Dieser Roboter besitzt ein Hand-Arm-System, welches sich bezüglich den dynamischen Eigenschaften wirkungsäquivalent zu einem menschlichen Arm verhält. So können Einflussgrößen, die bei Versuchen mit realen Anwendern durch große Streuung schwer identifizierbar sind, untersucht werden.



Abbildung 24: Abbildung des Anwenders in einem Entwicklungsprüfstand

[Bildquelle: IPEK – Institut für Produktentwicklung, 2017]

Modellverifikation des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs

Durch die Analyse wird das Modell des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs aufgebaut und verfeinert. Um zu prüfen, ob dieses Modell die Realität ausreichend genau und richtig abbildet, muss es verifiziert werden.

Ein **Beispiel** aus einem Teilsystem des bereits beschriebenen Bolzensetzgeräts verdeutlicht die Relevanz der Modellverifikation der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge. Das Bolzensetzgerät besitzt neben anderen Sicherheitseinrichtungen ein Teilsystem zur Erkennung der Nagelposition – dieses Teilsystem wird Nageldetektion genannt. Diese sperrt die Benutzung, falls die im Magazin nachrückenden Nägel nicht in korrekter Position über der Mündung stehen. Bei der Validierung des Power-Tools zeigte sich, dass die Nageldetektion bereits nach kurzer Benutzung versagte. Eine Vermutung, dass Kräfte aus der Hauptfunktion „korrekte Position des Nagels erkennen“ das Versagen verursachen, wurde falsifiziert. Die Verschleißspuren an der Nageldetektion weisen auf eine Belastung quer zur Belastung durch die Hauptfunktion hin, siehe auch Abbildung 25. Eine Vermutung lautete: „Diese Belastung könnte durch die Trägheit des Bauteils aus dem Rückstoß des Bolzensetzgerätes erzeugt werden.“ Die Verschleißspuren an der Nageldetektion stützten diese Vermutung. In Fällen, in denen keine eindeutigen Indizien für das Systemverhalten vorliegen, oder eine hohe Unsicherheit darüber herrscht, warum das System sich so verhält, kann eine Bildung von Hypothesen zur Prüfung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge helfen.



Abbildung 25: Funktionsweise und Belastung der Nageldetektion

Eine methodische Unterstützung hierbei bieten Konstruktionshypothesen, mit denen die modellierten Zusammenhänge konkretisiert und überprüft werden [13]. In diesen Hypothesen werden Vermutungen zum Gestalt-Funktion-Zusammenhang, die im C&C²-Modell abgebildet sind, in eine überprüfbare Form gebracht. Dazu werden die einstellbaren Gestaltparameter mit einer messbaren Funktion verknüpft, wodurch der Zusammenhang in einem Experiment überprüft werden kann.

In Abbildung 26 ist das Ergebnis eines geprüften Gestalt-Funktion-Zusammenhangs dargestellt. Links ist der Gestaltparameter an der Schnellbauschraube abgebildet, in der Mitte seine Ausprägung in der Hypothese. Rechts sind die Daten aus dem zur Prüfung durchgeführten Experiment abgebildet. Diese Daten deuteten auf eine Verifizierung der Hypothese hin, da die Schrauben mit kurzer Eindrehzeit alle im Bereich der Gewindehöhe von Y mm lagen. Die gewonnenen Erkenntnisse konnten in die Synthese der nächsten Entwicklungsgeneration einfließen.

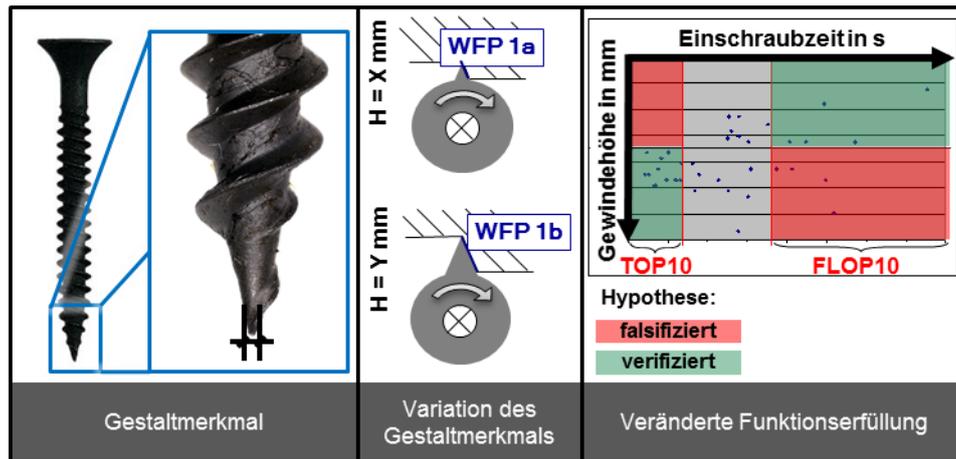


Abbildung 26: Überprüfung des Gestaltmerkmals Gewindehöhe nach Thau [11]

Synthese aus dem gebildeten und verifizierten Modell

In der Synthese können Prinzipien des C&C²-Ansatz genutzt werden, um systematisch Lösungen zu generieren [14]. Diese Prinzipien sind (1) Wirkflächenpaaren und/oder Leitstützstrukturen hinzufügen, (2) entfernen oder (3) ihre Eigenschaften ändern. Abbildung 27 zeigt Beispiele zu diesen drei Syntheseprinzipien [15].

Syntheseprinzip	Beispiel zur Umsetzung	
Hinzufügen von WFP oder LSS	... indem Begrenzungsflächen und Reststrukturen der Blechbohrschraube verändert werden, so dass sie ein zusätzliches Wirkflächenpaar ausbilden können.	
Entfernen von WFP oder LSS	... indem mikroskopische WFP in der Blechbohrschraube entfernt und dadurch die Beanspruchbarkeit der makroskopischen LSS erhöht wird.	
Merkmale von WFP oder LSS verändern	... indem die Härte der Schraubenspitze erhöht wird.	

Abbildung 27: Beispiele von umgesetzten Syntheseprinzipien in der Entwicklung der Blechbohrschraube

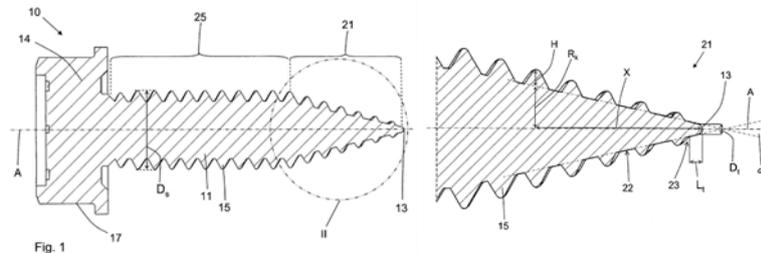
Zusammenfassend können durch die Anwendung von Techniken der Analyse, Modellbildung und -verifikation und der Synthese patentfähige Lösungen in der Produktentwicklung erreicht werden. Abbildung 28 zeigt ein Patent der entwickelten Blechbohrschraube.



United States Patent
Matthiesen et al.

Patent No.: US 8,596,943 B2
Date of Patent: Dec. 3, 2013

CHIPLESS THREAD-FORMING SCREW



Matthiesen, Sven, Peter Hertlein, and Michael Baumgartner. "Chipless thread-forming screw." U.S. Patent 8,596,943, issued December 3, 2013.

Abbildung 28: Patent zur Blechbohrschraube nach [16]

Ausblick: Modellbildung in der universitären Lehre

Die Analyse, als erster Schritt zur Erschließung des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs von realen technischen Systemen mit Hilfe des C&C²-Ansatzes, ist bisweilen jedoch oft nur ungenügend in der Projektarbeit realisiert. Dies kann auf die zentralen Eingangsgrößen der Gestaltung für die Projektarbeit zurückgeführt werden. Wie eingangs beschrieben sind die zentralen Eingangsgrößen, die Erfahrung mit verwandten Produkten sowie Gestaltdokumentation von Vorgänger- und Referenzprodukten. Im frühen Studium haben die Studierenden der Lehrveranstaltungen jedoch meist keine Erfahrung mit verwandten Produkten und können in der Gestaltung daher nicht darauf zurückgreifen. Eine Analyse der Gestaltdokumentation ist in der Projektarbeit oft nicht notwendig und nicht möglich. Dies liegt daran, dass für die Projektarbeit keine Produktdokumentation von Vorgänger- und Referenzprodukten bereitgestellt wird. Am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) werden die Lehrveranstaltungen „Mechatronische Systeme und Produkte“ [17] sowie „Maschinenkonstruktionslehre“ [18] gelehrt. In den Projektarbeiten dieser Lehrveranstaltungen erfolgt nun die Bereitstellung der Produktdokumentation für die Gestaltung. Den Studierenden soll die Gestaltung technischer Produkte dadurch besser vermittelt werden.

Weiterhin gibt es Bestrebungen den C&C²-Ansatz zur Erschließung technischer Systeme auch für Schülerinnen und Schüler im Rahmen des „Naturwissenschaft und Technik“-Unterrichts an Gymnasien zugänglich zu machen. Am KIT lernen die Lehramtsstudierenden dieses Fachs in der Lehrveranstaltung „Technik erleben und vermitteln“ die Grundlagen im Bereich Produktentwicklung [19, 20]. Der C&C²-Ansatz wird dazu erstmalig auch Lehramtsstudierenden dieses Fachs vermittelt.

Literaturverzeichnis

- [1] VDI 2221-1:2018-03 - Entwurf: Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung.
- [2] A. Albers, N. Bursac und E. Wintergerst. "Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive" in Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015, Stuttgart: Fraunhofer, 2015.

- [3] A. Albers, N. Bursac und S. Rapp. "PGE - Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads" in *Forschung im Ingenieurwesen*, vol. 81, Nr. 1, 2017, S. 13–31, DOI: 10.1007/s10010-016-0210-0.
- [4] 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.
- [5] S. Matthiesen. "Gut konstruieren kann nur, wer die Details versteht!" *Die Konstruktion*, vol. 69, no. 7-8, 2017, S. 3.
- [6] S. Matthiesen. "Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme" *Forschungsberichte*, Band 6, Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2002.
- [7] A. Albers und E. Wintergerst. "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*, A. Chakrabarti and L. Blessing, Hrsg., Springer, 2014.
- [8] S. Matthiesen, K. Hölz und P. Grauberger. "Systemverständnis durch Analysemethoden" in *28. DfX-Symposium 2017*, Bamberg, 2017.
- [9] J. Lemburg. "Methodik der schrittweisen Gestaltsynthese" *Dissertation in der Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik*, Band 06, RWTH, Aachen, 2009.
- [10] A. Albers, S. Matthiesen, M. Meboldt, T. Alink und S. Thau. "Systematische Modellbildung und Raum für individuelles Vorgehen mit C&CM in einem Industrieprojekt" in *KT2008*, 6. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2008, Aachen, 2008.
- [11] S. Thau. "Heuristiken zur Analyse und Synthese technischer Systeme mit dem C&C²-Ansatz auf Basis von Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld" *Forschungsberichte*, Band 66, IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2013.
- [12] S. Matthiesen, S. Mangold, T. Bruchmüller und A. Marko. "Der Mensch als zentrales Teilsystem in Wechselwirkung mit handgehaltenen Geräten - Ein problemorientierter Ansatz zur Untersuchung dieser Schnittstelle" in *25. DfX-Symposium 2014*, Bamberg, 2014.
- [13] S. Matthiesen, P. Grauberger, T. Nelius und K. Hölz. "Methodische Unterstützung des Erkenntnisgewinns in der Produktentwicklung durch Konstruktionshypothesen" *IPEK - Institut für Produktentwicklung, KIT Scientific Working Papers*, Band 61, Karlsruhe, 2017.
- [14] M. Ohmer, "Ein Beitrag zur Synthese technischer Systeme auf Basis des Contact & Channel Model C&CM" *Forschungsberichte*, Band 32, IPEK- Institut für Produktentwicklung, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2008.
- [15] A. Albers, N. Burkardt, S. Matthiesen und M. Ohmer. "C&CM – ein konstruktionsmethodisches Denkmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme" in *Berichte aus dem Institut / Institut für Maschinenelemente und Konstruktion*, Technische Universität Ilmenau, *Festschrift zum Ehrenkolloquium anlässlich der Emeritierungen von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Habil. Dr. h.c. Günter Höhne und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Habil. Hans-Jürgen Schorcht*, Ilmenau: ISLE, 2005.
- [16] S. Matthiesen, F. Rieger, P. Hertlein, M. Baumgartner, P. Mugg und M. Schaefer. "Chipless thread-forming screw" *US8342788*, United States 11/804,268, Jan 1, 2013.
- [17] S. Matthiesen, S. Schmidt, J. Ludwig und S. Hohmann. "Iteratives Vorgehen in räumlich getrennten mechatronischen Entwicklungsteams – Das Wechselspiel von Synthese und testbasierter Analyse" in *Fachtagung Mechatronik 2015: Dortmund*, T. Bertram, Hrsg., Aachen: Inst. für Getriebetechnik und Maschinendynamik, 2015, S. 137–142.
- [18] A. Albers, J. Breitschuh, A. Diez, G. Gidion, A. Helmich, K. Klink, S. Matthiesen, U. Rietschel. "Lehre hoch Forschung – Interdisziplinäres Projekt zum Kompetenzausbau bei Studierenden und

Lehrenden der Maschinenkonstruktionslehre” in Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Hochschuldidaktik, Paderborn, 2014.

- [19] S. Matthiesen, A. Woll, K. Hölz, M. Eisenmann und S. Schmidt. “Technik vermitteln und erleben im Naturwissenschaft und Technik-Unterricht” in 12. Ingenieurpädagogische Regionaltagung, Band 12, Ilmenau, 2017.
- [20] S. Matthiesen, K. Hölz, D. Fox, Kollegium des Albertus-Magnus-Gymnasium und M. Eisenmann. “Technikaktivitäten – Herausforderungen in der Ausbildung und vielversprechende Lösungsansätze” in 12. Ingenieurpädagogische Regionaltagung, Band 12, Ilmenau, 2017.

KIT Scientific Working Papers
ISSN 2194-1629

www.kit.edu