

Analysemodell für die Priorisierung von Weiterentwicklungsoptionen zur Sensorintegration

Sven Vogel¹, Gunnar Vorwerk-Handing¹, Eckhard Kirchner¹

¹ *Institute for Product Development and Machine Elements (pmd),
Technische Universität Darmstadt, Germany*

Abstract

This paper discusses the challenges that arise from the need for additional sensory functions in existing systems. These additional functions lead to a wide variety of possible solutions for the *sensor integration* that must be reduced to the most promising ones. Therefore, models for the analysis of technical systems are outlined as a basis for a new model to analyze the sensor retrofit into existing system especially during early stages of the *sensor integration*. The new model is used exemplarily on a disk brake for the development of concepts for the measurement of the applied axial brake force. The results of the analysis lead to a qualitative evaluation of possible sensor locations that can be used to rank and evaluate the possible solutions before the development of concepts starts.

Keywords: C&C²-Approach, Analysis model, Sensor integration, Further Development

1 Einleitung

Steigender Bedarf an Informationen führt zu einer Weiterentwicklung bestehender Produkte oder Baukästen hinsichtlich der Integration von Sensoren, in [1] werden dieser steigende Bedarf und Lösungsansätze aufgezeigt. Diese

Weiterentwicklung kann in Form von Austausch oder lokaler Weiterentwicklung von Baugruppen, Komponenten oder ganzen Modulen erfolgen. [2] Bei einer systematischen Betrachtung der möglichen Messorte und der möglichen Messgrößen entsteht, wie in [3] gezeigt, ein großer Lösungsraum. Aufgrund der Größe des Lösungsraumes führt die Entwicklung von Konzepten für alle Möglichkeiten zu einer nicht handhabbaren Anzahl an Konzepten. Daher muss der Lösungsraum bereits vor der Konzeptentwicklung eingeschränkt werden. Für eine Bewertung oder Festlegung einer Fokussierung fehlen zu Beginn der Sensorintegration jedoch die Informationen die für eine Entscheidung notwendig sind.

In diesem Beitrag wird ein Analysemodell entwickelt, das eine Beschreibung und Bewertung der Lösungsmöglichkeiten für die verschiedenen Messorte, die repräsentativ für eine Gruppe an Lösungsoptionen stehen, noch vor der Entwicklung von Konzepten ermöglicht.

2 Modelle für den Gestalt-Funktions-Zusammenhang

Modelle bilden die Realität nur in einer, für den Zweck der Modellierung ausreichenden Genauigkeit ab. [4] Dies hat zur Folge, dass aufgrund der Vielzahl an Zwecken eine Vielzahl an Modellen existiert. Bei der Sensorintegration handelt es sich häufig um die Entwicklung einer zusätzlichen Funktion eines technischen Systems, das bereits gefertigt oder als fertige Konstruktion (z.B. als CAD oder technische Zeichnung) vorliegt. Dies hat zur Folge, dass die Gestalt bereits festgelegt und nur geringe Änderungen zur Integration der zusätzlichen Funktion gewünscht sind. Für die Analyse und Weiterentwicklung des bestehenden Systems bieten sich daher Modelle, welche den Zusammenhang der Gestalt und der Funktion abbilden und bereits für die Weiterentwicklung von Produkten verwendet werden, an. Mit Modellen wie dem *C&C²-Modell* [5] und dem *Wirkraummodell* [6] können bestehende Produkte beschrieben und in dieser abstrakten Beschreibungsweise analysiert werden, um Ideen für die Verbesserung oder Weiterentwicklung zu generieren. Somit eignen sich diese Modelle potentiell auch für die Beschreibung bestehender Systeme zu Beginn der Sensorintegration. Im Folgenden werden die angesprochenen Modelle und die Modellvorstellung des *Kraftflusses* vorgestellt und hinsichtlich Abbildbarkeit der notwendigen Zusammenhänge zu Beginn der Sensorintegration verglichen.

Die Vorstellung des **Kraftflusses** besagt, dass die Kraft durch die Bauteile fließt und eine Richtungsänderung des Kraftflusses oder eine Änderung der Kraftflussdichte eine Spannungsüberhöhung hervorruft. [7] Aus dieser Beschreibung sind Konstruktionsprinzipien, wie das kraftflussgerechte Konstruieren

ren oder das Prinzip des kurzen Kraftflusses [8], entstanden. In dieser Modellierungsform des mechanischen Systems, werden die Schlussarten zwischen den Bauteilen und die Beanspruchung der Bauteile nicht formalisiert beschrieben und die Darstellung wird weitgehend intuitiv durchgeführt.

Im **C&C²-Modell** wird die Funktion eines Bauteils durch die Gestaltung von drei Elementen realisiert: den Wirkflächenpaaren (WFP), der Leit-Stütz-Struktur (LSS) und den Konnektoren (C). Das Modell dient der Analyse von Bauteilen und technischen Systemen. Die Funktion eines Bauteils kann demnach durch Hinzufügen oder Entfernen von Wirkflächenpaaren und/oder Leitstützstrukturen oder das Ändern der Eigenschaften dieser angepasst werden. [5]

Das **Wirkraummodell** ist zunächst speziell für die Entwicklung von Produkten mit hohen Anforderung hinsichtlich der Hygiene formuliert worden. Dieses Modell identifiziert Wirkflächen, Wirkkörper und definiert Wirkräume und Wirkraumgrenzen. Der Fokus liegt jedoch nicht auf der Beschreibung des Zusammenhangs dieser Wirkflächen und Wirkkörper und der Funktion des Produktes, sondern auf der Identifikation von fehlender Funktionen – Nicht-Funktionen genannt. [6]

2.1 Vergleich der Auswahl

Die Sensorintegration dient dem Zweck gewünschte Größen – Zielgrößen genannt – zu erfassen. Die Zielgröße ist häufig jedoch nicht direkt messbar, kann jedoch über eine messbare Reaktion – eine Messgröße - ermittelt werden. Dies bedeutet, dass eine Zielgröße theoretisch überall dort, wo eine Reaktion in Folge der Zielgröße auftritt, gemessen werden kann. Dies hat zur Folge, dass die Leitung, Wandlung, Verknüpfung und das Umformen der Zusammenhänge zwischen Ziel und Messgröße analog der allgemeinen Operatoren für die Energie nach [7] erfolgt. Ein Modell zur Identifizierung der möglichen Messorte muss somit die Reaktionen auf die Zielgröße oder auch mehrerer Zielgrößen darstellen können. Zielgrößen können in Fluss- und Potentialgrößen differenziert werden. Im Rahmen dieses Beitrags werden Kräfte als ein Beispiel für Flussgrößen betrachtet. In Tabelle 1 wird die Darstellung der Kraftleitung und Überlagerung von Kräften und damit auch der Reaktionen auf die Kräfte mit den verschiedenen Modellen diskutiert.

Tabelle 1: Darstellung von überlagerten Kraftleitungsfunktionen

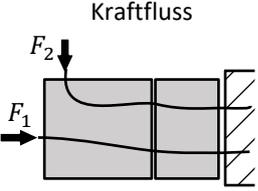
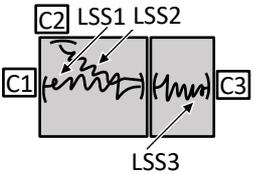
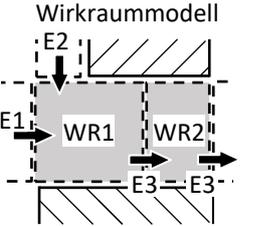
 <p>Kraftfluss</p>	<p>Der Kraftfluss entsteht durch äußere Lasten und wird durch die Bauteile geleitet bis der Kraftfluss durch Gegenkräfte geschlossen ist. Durch das Eintragen des Kraftflusses, werden alle Bauteile gekennzeichnet, die eine Reaktion infolge der Zielgröße erfahren. Somit sind alle Bauteile, die an der Übertragung des Kraftflusses teilnehmen, potentiell zum Messen der Zielgröße geeignet. Die getrennt differenzierte Darstellung der Kräfte ermöglicht es Interaktionen zwischen der Messgröße und potentieller Störgrößen zu erkennen.</p>
 <p>C&C²-Modell</p>	<p>Im C&C²-Modell wird die Leitung von Kräften durch die LSS dargestellt. Sobald eine Leit-Stütz-Struktur mehrere Kräfte leitet (z.B. LSS3), ist eine Differenzierung der unterschiedlichen Kräfte, die durch die Wirkflächenpaare eingeleitet werden (C1 und C2), nicht mehr möglich. Dies hat zur Folge, dass die Überlagerung der Messgröße mit einer potentiellen Störgröße nicht visualisiert wird und eine mögliche Interaktion schwerer erkannt wird.</p>
 <p>Wirkraummodell</p>	<p>Die Leitung mechanischer Lasten kann im weitesten Sinne als eine Leitung des Energieflusses verstanden werden und einem Wirkraum kann eine Bilanzgleichung hinterlegt werden. [6] Daher kann über die Beschreibung der Wirkräume und die Energieleitung zwischen den Wirkräumen eine Leitung der mechanischen Lasten dargestellt werden. Bei einer Überlagerung der Lasten (z.B. E1 und E2) und Leitung in weitere Wirkräume (E3) ist jedoch keine Differenzierung mehr möglich.</p>

Tabelle 2: Darstellung von Verzweigungen von Lastpfaden und Störgrößen

<p>Kraftfluss</p> <p>Störfluss</p> <p>F_{Ziel}</p> <p>F_{Mess}</p> <p>Aufteilung</p>	<p>Die Analyse mittels Kraftfluss greift auf Erfahrung und Intuition zurück. Beim Eintragen des Kraftflusses muss bekannt sein, an welchen Stellen Kraft übertragen wird und wo sich der Kraftfluss infolge von parallelen Lastpfaden aufteilt. Je nach Vorzeichen der Störgröße ist die Messgröße größer oder kleiner als die Zielgröße. Bei vorheriger Kenntnis der Störgröße, kann diese ebenfalls als eigenständige Größe eingetragen werden (Vgl. Tabelle 1).</p>
<p>C&C²-Modell</p> <p>C3</p> <p>C1</p> <p>C2</p> <p>Aufteilung</p>	<p>Das C&C²-Modell reduziert die Geometrie eines Bauteils auf seine Wirkflächen und die Leit-Stütz-Struktur. Durch Prüfen der Bauteilflächen auf Kontakt zu anderen Bauteilen können Wirkflächen identifiziert werden. Jede Wirkfläche, die nicht der Leitung der Zielgröße dient, führt zu einer Veränderung des Zusammenhangs der Ziel- und Messgröße. Da die LSS nur zwischen zwei Wirkflächen definiert ist, kann ein paralleler Lastpfad dargestellt werden, der Ort der Verzweigung ist jedoch immer eine Wirkfläche am Rand des Bauteils. Bereiche in denen ein eindeutiger Lastpfad vorliegt werden nicht explizit sichtbar.</p>
<p>Wirkraummodell</p> <p>E3</p> <p>WR</p> <p>E1</p> <p>E2</p>	<p>Die Suche nach fehlenden Funktionen oder störenden Stoff- oder Energieflüssen entlang der Wirkraumgrenzen ist ähnlich der Suche nach Kontakten mit dem C&C²-Modell und kann auch für die Suche nach störenden Einflüssen hinsichtlich der sensorischen Funktion genutzt werden. Als Ort der Verzweigung wird der komplette Wirkraum beschrieben. Durch Unterteilung des Wirkraumes in mehrere kleine Wirkräume kann der Ort der Verzweigung weiter aufgelöst und genauer bestimmt werden.</p>

Eine im Auswertemodell nicht berücksichtigte Veränderung des Zusammenhangs zwischen Mess- und Zielgröße führt zu einer Ungenauigkeit der Messung und wird im Folgenden als Störgröße bezeichnet. Die Gründe für die Änderungen des Zusammenhangs können zum Beispiel unterschiedliche Reibungsbedingungen oder auch Toleranzeinflüsse sein. Auch die Überlagerung einer für

die mechanische Funktionserfüllung essentielle Größe kann eine Messung innerhalb des Systems stören und wird in diesem Beitrag ebenfalls als Störgröße bezeichnet. Daher muss ein Analysemodell nicht nur die Leitung der Lasten innerhalb der Bauteile, sondern auch die Verzweigung und Überlagerung infolge von Störgrößen darstellen können. Da die Aufteilung der Last an Bauteilkontakten oder aber auch in Bauteilen stattfindet, gibt es innerhalb eines Bauteils unterschiedliche Bereiche in denen die Reaktionen unterschiedlich ausfallen. Ein Analysemodell zur Darstellung der Reaktionen und möglicher Zusammenhänge zwischen Ziel-, Messgröße und Bauteil muss daher auch den Ort einer Verzweigung oder Überlagerung beschreiben können, um Messorte bewerten zu können. In Tabelle 2 wird die Darstellung der Verzweigung von Lastpfaden innerhalb des Systems mithilfe der bereits in Tabelle 1 analysierten Analysemodelle diskutiert.

2.2 Analysemodell für die frühe Bewertung von Messorten

Der vorangegangene Vergleich der Analysemodelle hinsichtlich der Abbildbarkeit von möglichen Messorten und zu berücksichtigender Störgrößen in technischen Systemen hat gezeigt, dass einige Aspekte die für eine Darstellung, die für eine frühe Bewertung von Lösungsmöglichkeiten nötig sind, bereits beschrieben werden können. Keines der beschriebenen Analysemodelle kann jedoch uneingeschränkt zur Bewertung von Lösungsmöglichkeiten genutzt werden. Ein Wechsel des Analysemodells für jeden einzelnen Aspekt führt zu einem erhöhten Aufwand und ist daher nicht anzustreben. Für die Identifikation möglicher Messorte und zu berücksichtigender Störgrößen werden im Folgenden Elemente eines neuen Analysemodells vorgestellt.

Für die Beschreibung mittels neuen Analysemodells wird vorausgesetzt:

1. Die Reaktionen infolge der Kräfte werden, genau wie die Kräfte selbst durch die Struktur der Bauteile geleitet.
2. Die Zielgröße kann an jeder Stelle des Kraftflusses durch Eigenschaftsänderungen infolge der Zielgröße des entsprechenden Bauteils gemessen werden.
3. Bei einer Verzweigung oder eines Zusammenschluss mehrerer Kraftflüsse an einem Knoten wird die Aufteilung der Kraft durch die Bilanz über den Knoten beschrieben:

$$F_{\text{Ziel}} = F_{\text{Mess}} + F_{\text{Stör}}$$

3 Beispiel

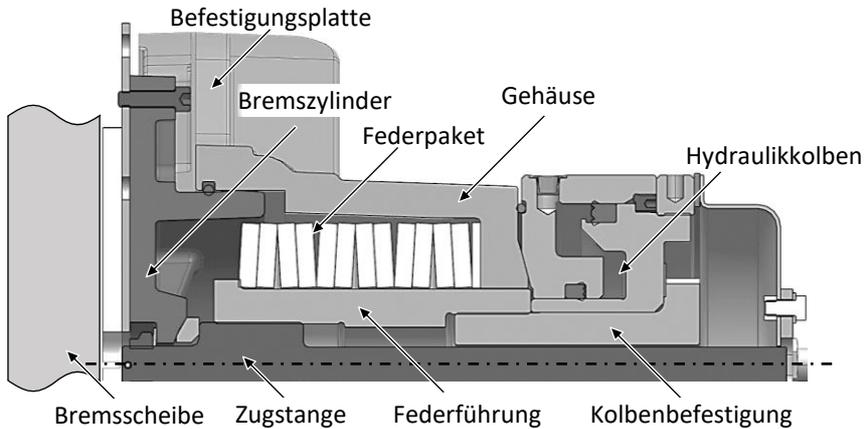


Bild 2: Schnittdarstellung der Industriebremse

Als Beispiel wird eine Scheibenbremse für die industrielle Anwendung verwendet, die in Bild 2 dargestellt ist und deren Weiterentwicklung eine Messung der axialen Bremskraft ermöglichen soll. Die axiale Bremskraft, die zwischen Bremszylinder und Bremsscheibe wirkt, entsteht durch ein vorgespanntes Federpaket. Zum Öffnen wird der Hydraulikkolben unter Druck gesetzt und über die Kolbenbefestigung, Federführung und Zugstange wird die axiale Bremskraft verringert und das Federpaket stärker vorgespannt. Die aktuelle Version der Bremse errechnet die axiale Bremskraft durch die Stellgröße im Schaltblock des Hydraulikaggregats. Um eine zuverlässige Bestimmung der axialen Bremskraft zu gewährleisten, muss zusätzlich zu der Erstellung des Auswertemodells jedes Federpaket vor der Montage vermessen, der Reibkoeffizient zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe bekannt sein und das Auswertemodell nach dem Einbau der Bremse kalibriert werden. Dieser Aufwand wird nötig, weil die Kraft, die durch den Hydraulikkolben eingeleitet wird, sich in eine Kraft, die den Bremszylinder entlastet und eine Kraft, die das Federpaket zusätzlich belastet, aufteilt. Zusätzlich tritt in Dichtungen und Führungen Reibung auf, die zu einer Verringerung der Tatsächlichen axialen Bremskraft führt. Durch die Toleranz der Steifigkeit der Feder muss diese vor der Montage gemessen werden und durch die nichtlineare Kennlinie der Tellerfedern, muss der Federweg bei der Anlage des Bremsbelags an der Bremsscheibe während der Inbetriebnahme der Bremse eingestellt werden.

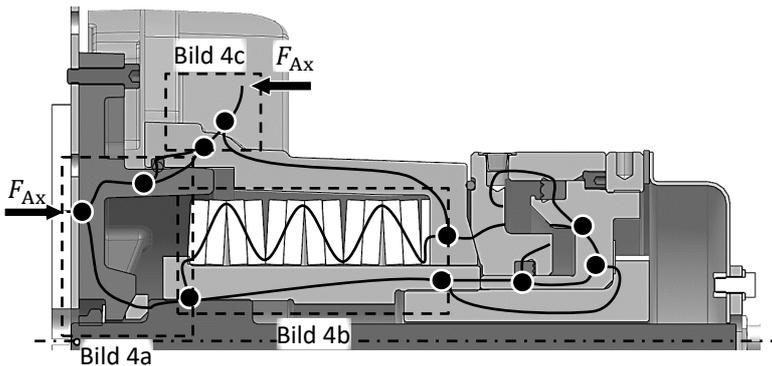


Bild 3: Darstellung des Kraftflusses und der zu modellierenden Knoten

In Bild 3 ist der Kraftfluss der axialen Bremskraft (Zielgröße), für den geregelten Betriebszustand, mittels vorgestellten Analysemodell gezeigt. Die Zielgröße F_{Ax} wird an der *Bremsscheibe* über den *Bremsbelag* in den *Bremskolben* eingeleitet. Die Zielgröße verzweigt auf dem Weg zum *Hydraulikkolben* an mehreren Knoten. Es wird deutlich, dass für eine Berechnung der axialen Betriebskraft durch Messung des hydraulischen Drucks vier Knoten berücksichtigt werden müssen. Im Folgenden werden exemplarisch die in Bild 4 hervorgehobenen Knoten beschrieben, um die Analyse mittels neuem Modell zu erläutern:

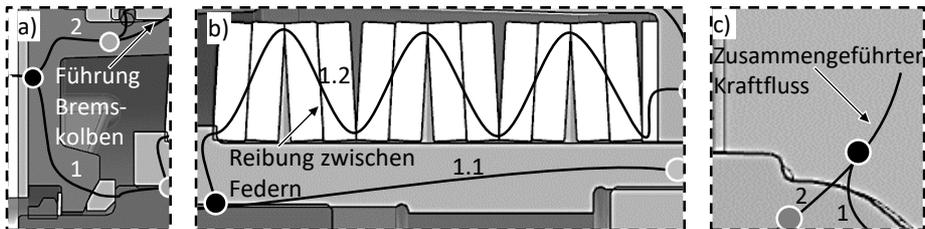


Bild 4: Detailansicht der diskutierten Knoten

Der Knoten der in die Aufteilung der Pfade 1 und 2 führt (Bild 4a), wird hauptsächlich durch die Reibung zwischen *Bremskolben* und *Gehäuse* bestimmt. Die Reibung hängt wiederum von weiteren Parametern, wie Schmierung, Querkraft auf den *Bremskolben*, Passung und Oberflächenbeschaffenheit ab. Manche dieser Parameter können nicht nur zwischen den einzelnen, gefertigten Bauteilen, sondern auch über die Lebensdauer des Bauteils variieren. Die Erstellung eines, über die Lebensdauer gültigen Auswertemodells erfordert viel Entwicklungsaufwand.

Der Knoten, der zur Aufteilung in die Pfade 1.1 und 1.2 führt (Bild 4b), wird hauptsächlich durch die Steifigkeit des *Federpakets* bestimmt. Die Steifigkeit von Tellerfedern ist abhängig von der Einfederung und weist zusätzlich noch eine Hysterese zwischen Ein- und Ausfedern auf. Dies hat zur Folge, dass die Aufteilung des Kraftflusses von der Stellung des *Bremsszylinders* abhängt und somit von der Dicke des *Bremssbelags*. Zusätzlich gibt es Schwankungen in den Kennlinien einzelner *Federpakete*. Daher wird für die aktuelle Berechnung der axialen Bremskraft jedes *Federpaket* vor dem Einbau vermessen und der Federweg bei Anlage des *Bremssbelags* an der *Bremsscheibe* eingestellt. Der Federweg wird während des Betriebs jedoch nicht vermessen, so bleiben die Nichtlinearität und die Veränderungen der Dicke des *Bremssbelags* und der Reibbedingung zwischen den *Federn* weiterhin als Messungenauigkeit vorhanden.

In der *Befestigungsplatte* werden die beiden Pfade 1 und 2 wieder zusammengeführt (Bild 4c), sodass dort die aufgeführten Verzweigungen nicht berücksichtigt werden müssen und somit eine Messung ohne Modellierung und vorherige Vermessung von *Federpaketen* oder Reibungsbedingungen möglich ist. Die Messung der Reaktion, zum Beispiel die Verformung der *Befestigungsplatte* infolge der axialen Bremskraft liefert direkt die gewünschte Information über die Zielgröße.

3.1 Ergebnis der beispielhaften Analyse

Anhand des Verständnisses, das durch die Abbildung des Systems mittels neuem Analysemodell geschaffen wird, kann nun, durch die Anzahl der Knoten zwischen der Ziel- und der Messgröße, eine qualitative Bewertung des Entwicklungsaufwandes hinsichtlich der Modellierung durchgeführt werden. Jeder zusätzliche Knoten bedeutet, dass ein zusätzlicher Zusammenhang modelliert und validiert werden muss.

Die Entwicklung von Lösungen für Messorte, die zu einem hohen Modellierungsaufwand führen, ist nur bei großen Stückzahlen zu rechtfertigen, da dieser Aufwand auf alle verkauften Produkte aufgeteilt werden kann. Die Weiterentwicklung von Bauteilen, die zu einem hohen individuellem Aufwand führen, ist jedoch nur für geringe Stückzahlen sinnvoll.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag ist der Zusammenhang von Ziel- und Messgrößen und die Leitung dieser in technischen Systemen dargelegt worden. Zur Visualisierung dieser Zusammenhänge wurden verschiedene Analysemodelle zur Dar-

stellung des Zusammenhangs der Gestalt und der Funktion verglichen. Aufgrund der Defizite der Analysemodelle aus dem Stand der Forschung ist ein neues Analysemodell entwickelt worden, welches das System auf die für die Sensorintegration wesentlichen Bestandteile, Kraftfluss und Knoten reduziert. Das neue Analysemodell führt zu einem Verständnis des Zusammenhangs von Ziel-, Messgröße und des notwendigen Modellierungsaufwandes und vereinfacht damit eine Reduktion der möglichen Messorte für eine Sensorintegration. Die Eignung des entwickelten Analysemodells zur Identifikation potentieller Messorte ist für die Messung von Kräften an einem Beispiel gezeigt worden. Die Eignung zur Identifikation potentieller Messorte für die allgemeine Messung von Flussgrößen steht im Fokus der weiteren Forschung.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Vulkan do Brasil Ltda. für die gute und erfolgreiche Zusammenarbeit und das zur Verfügung stellen der Informationen.

Literatur

- [1] Martin, G., et al.: "MME - Potentiale mikroinvasiver intelligenter Maschinenelemente". Konstruktion 01-02, 2018, P. 71–82
- [2] Vogel, S. and Kirchner, E.: "Simple Integration of Sensory Functions ". Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design, 2019, P. 3711–3720
- [3] Vorwerk-Handing, G.; Martin, G. and Kirchner, E.: "Integration of Measurement Functions in Existing Systems - Retrofitting as Basis for Digitalization". In: Ekströmer, P.; Schütte, S. and Ölvander, J. (Editor): Proceedings of NordDesign, 2018
- [4] Stachowiak, H.: "Allgemeine Modelltheorie ". Wien: Springer 1973
- [5] Matthiesen, S., et al.: "Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung - Techniken zur Analyse und Synthese". Karlsruhe: KIT 2018
- [6] Beetz, J.-P. and Kirchner, E.: "Das Wirkraummodell – Ein Hilfsmittel bei der Gestaltung sauberkeitsrelevanter Produkte". Forschung im Ingenieurwesen, 2019

-
- [7] Pahl, G., et al.: "Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung". Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer 2007
- [8] Zhao, B. J. and Beitz, W.: "Das Prinzip der Kraftleitung: direkt, kurz und gleichmäßig ". Konstruktion 47, 1995, P. 15–20