

Frank Bremer

**Ermittlung von Erfolgsfaktoren für die Bildung
quantitativer Gestalt-Funktion-Zusammenhang-
Modelle in der Gestaltung anhand einer
Fallstudie zu Sichelmessern**

Derivation of Success Factors for Quantitative
Modelling of Embodiment Function Relations in
Embodiment Design - A Case Study on
Involute Blades

Band 155

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

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

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

ISSN 1615-8113

Ermittlung von Erfolgsfaktoren für die Bildung quantitativer Gestalt-Funktion-Zusammenhang- Modelle in der Gestaltung anhand einer Fallstudie zu Sichelmessern

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M.Sc. Frank Bremer

Tag der mündlichen Prüfung:	30.05.2022
Hauptreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen
Korreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Husung

Vorwort der Herausgeber

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild, sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung, um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

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

Vorwort zum Band 155

Modellbildung ist ein schwieriger Prozess. Vor allem quantitative Modelle zu bilden ist extrem herausfordernd, aber eine wesentliche Voraussetzung für die Funktionsoptimierung technischer Systeme. Damit wird die Fähigkeit, geeignete quantitative Modelle zu bilden, zu einer wichtigen Ingenieurskompetenz.

Eine zentrale Aufgabe in der Produktentwicklung ist die funktionsgerechte Gestaltung. Dabei werden die geometrischen und stofflichen Merkmale des Produktes so festgelegt, dass das Produkt die geforderte Funktion in gewünschter Güte erfüllt. Für diese Festlegung der Merkmale ist Wissen über den Zusammenhang zwischen der Gestalt und der Funktion notwendig. Oft ist dieser Zusammenhang zunächst unbekannt und muss während der Gestaltung erarbeitet werden. Das erarbeitete Wissen wird in Modellen expliziert, um es zugänglich zu machen.

Aus dem Stand der Forschung in den Konstruktionswissenschaften sind viele unterschiedliche Modelle zur Beschreibung des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs (GFZ) bekannt. Für die Festlegung der Gestaltmerkmale und die Verbesserung der Funktionserfüllung auf Basis von Modellen sind insbesondere quantitative GFZ-Modelle geeignet. Mit diesen können Berechnungen und Optimierungen durchgeführt werden. Bisher ist wenig über das Vorgehen bei der Bildung quantitativer GFZ-Modelle während der Gestaltung bekannt.

In der vorliegenden Forschungsarbeit widmet sich Herr M. Sc. Frank Bremer dem Aufdecken von Erfolgsfaktoren für die Bildung sogenannter quantitativer GFZ-Modelle während der Gestaltung. Die von ihm herausgearbeiteten Erfolgsfaktoren beschreiben, welche Aspekte zur erfolgreichen Bildung von quantitativen GFZ-Modellen beitragen können. Erfolgreiche Bildung von Modellen bedeutet dabei zum Beispiel eine höhere Qualität des Modells oder ein geringerer Aufwand zur Bildung des Modells.

Die Erfolgsfaktoren zur Bildung dieser Modelle leitet Herr Frank Bremer aus einer konkreten Fragestellung bei der Entwicklung eines technischen Systems ab. Sein Forschungsgegenstand auf der Systemseite sind Sichelmesser zum Schneiden von Lebensmittelscheiben in industriellen Aufschnittmaschinen, sogenannten Slicern. Sichelmesser in Slicern gibt es schon seit vielen Jahren. Die Gestalt der Sichelmesser und die Eigenschaften der mit dem Sichelmesser wechselwirkenden Umgebungssysteme beeinflussen signifikant die Qualität des geschnittenen Lebensmittels. Es gibt viele Anstrengungen die Funktionserfüllung zu optimieren. So werden die Merkmale der Gestalt von Sichelmessern in der Praxis seit langem variiert. Dies basierte bisher auf Erfahrungswissen. Modelle mit dem explizierten Wissen über die wirkenden Effekte und die Zusammenhänge zwischen Gestaltmerkmalen und Qualität des geschnittenen Lebensmittels gibt es im Stand der Forschung und auch in

den Unternehmen, mit denen Frank Bremer zusammengearbeitet hat, nicht. Die GFZ sind also nicht explizit bekannt. Daher ist die Untersuchung dieser GFZ im Schnittprozess mit Sichelmessern ein geeignetes Fallbeispiel, um die Forschungsziele der Arbeit anzustreben. Die Arbeit von Herrn Frank Bremer liefert neben den Erkenntnissen zur Gestaltung von Sichelmessern und zu den Effekten, die einen Einfluss auf die Qualität der geschnittenen Lebensmittel haben, wichtige Erkenntnisse zur Bildung quantitativer GFZ-Modelle.

Zentrale Ergebnisse der vorgelegten wissenschaftlichen Arbeit sind:

- Eine strukturierte Übersicht von Produktmodellen zur Abbildung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen in der Gestaltung,
- Erkenntnisse zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen bei Sichelmessern und
- Erfolgsfaktoren für die Bildung quantitativer Gestalt-Funktion-Zusammenhang Modelle in der Gestaltung.

Mai 2022

Sven Matthiesen

Kurzfassung

In der Gestaltung werden die geometrischen und stofflichen Merkmale eines Produkts festgelegt. Das dafür notwendige Wissen wird in Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ)-Modellen abgebildet. Für die Festlegung der Gestaltmerkmale und die Verbesserung der Funktionserfüllung sind insbesondere quantitative GFZ-Modelle geeignet, da mit diesen, im Gegensatz zu qualitativen GFZ-Modellen, Berechnungen durchgeführt werden können. Sind die GFZ nicht bekannt, müssen diese ermittelt und in einem GFZ-Modell abgebildet werden. Bisher wurde kaum untersucht, wie quantitative GFZ-Modelle für die Gestaltung in der Praxis gebildet werden. Daher ist wenig über erfolgreiches Vorgehen bei der Bildung dieser Modelle bekannt.

Zielstellung dieser Forschungsarbeit ist es daher, Erfolgsfaktoren für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle in der Gestaltung zu ermitteln. Die Erfolgsfaktoren sollen beschreiben, welche Aspekte zur erfolgreichen Bildung dieser GFZ-Modelle beitragen können. Dies beinhaltet zum Beispiel Aspekte mit Einfluss auf die Qualität oder den Aufwand zur Bildung des GFZ-Modells.

Eine Vielzahl an Modellen kann in der Gestaltung zur Abbildung des Produkts verwendet werden. Die Auswahl geeigneter Modelle ist eine Herausforderung, da es keine Übersicht gibt, welche Modelle wann und wofür eingesetzt werden sollten. Daher wird untersucht welche Modelle für die Abbildung von GFZ in der Gestaltung geeignet sind. In dieser Forschungsarbeit wird zunächst eine allgemeine Übersicht von Modellen in der Gestaltung erstellt. Daraus wird eine Übersicht von Modellen, die für die Abbildung von GFZ geeignet sind, abgeleitet. Auf dieser Grundlage werden in einer Fallstudie die GFZ zu Sichelmessern als Teil eines bilateralen Industrieprojekts untersucht. Es wird untersucht, welche Effekte einen Einfluss auf die Funktionserfüllung von Sichelmessern haben und daher in einem quantitativen GFZ-Modell abgebildet werden sollten. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Analyse der Gestalt und des Prozesses als Teil der Modellbildung.

Aus dem in der Fallstudie beobachteten Vorgehen werden kritische Schritte und Iterationen identifiziert. Basierend auf diesen Informationen werden die Erfolgsfaktoren für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle abgeleitet.

Diese Erfolgsfaktoren für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle für die Gestaltung sind das zentrale Ergebnis dieser Forschungsarbeit. Die ermittelten Erfolgsfaktoren sind 1) Konkretisierung der Frage- und Zielstellung, 2) Definition einer messbaren Funktionserfüllung, 3) Kombinierte Verwendung qualitativer und quantitativer Modelle, 4) Modellierung von Teilsystemen mit variierenden Eigenschaften, 5) Iterative Modellierung und Entwicklung von Versuchsaufbauten, 6) Dokumentation der gewonnenen Erkenntnisse.

Abstract

In embodiment design, the geometric and material characteristics of a product are defined. The knowledge needed for this is represented in embodiment-function-relationship (EFR) models. Quantitative EFR models are particularly suitable for defining the design features and improving functional performance. In contrast to qualitative EFR models, they can be used to perform calculations. If the EFR are not known, they must be determined and represented in an EFR model. To date, research has rarely been done on how quantitative modeling of EFRs is conducted in embodiment design in practice. Therefore, little is known about successful approaches for quantitative modeling of EFRs.

The aim of this work is therefore to identify success factors for quantitative EFR modeling in embodiment design. The success factors should describe which aspects can contribute to the successful quantitative modeling of EFRs. This includes for example aspects with influence on the quality of the EFR model or the effort for modeling.

A large number of models can be used in embodiment design to model the product. But since there is no overview of which models should be used when and for which purpose, the model selection is a challenge. Therefore, the first step in this thesis is to investigate which models are suitable for representing EFRs in embodiment design. A general overview of models in embodiment design is created. From this, an overview of models suitable for modelling EFRs is derived. Based on this, EFRs of involute blades are investigated as part of an industrial project. This serves as a case study for this thesis. In the project, effects which have an influence on the functional performance of involute blades and should therefore be represented in a quantitative EFR model are investigated. The focus is on analyzing embodiment and process as part of the quantitative modeling of EFRs.

From the procedure observed in the case study, critical steps and iterations are identified. Based on this information, the success factors for quantitative modeling of EFRs are derived.

These success factors for the quantitative modeling of EFRs in embodiment design are the main result of this work. The derived success factors are 1) concretization of questions and objectives, 2) definition of a measurable function fulfillment, 3) combined use of qualitative and quantitative models, 4) modeling of subsystems with varying properties, 5) iterative modeling and development of experimental setups, 6) documentation of the knowledge gained.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gerätekonstruktion und Maschinenelemente am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

An dieser Stelle möchte ich mich bei jenen Menschen bedanken, die mich in der Zeit der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen danke ich für die Möglichkeit diese Arbeit zu erstellen und seine vielen Impulse die mir geholfen haben mich persönlich und fachlich weiterzuentwickeln.

Für die Übernahme des Korreferates bedanke ich mich herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Husung. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich danke meinen Kooperationspartnern aus der Industrie durch die unsere gemeinsamen Projekte stets fachlich herausfordernd und persönlich bereichernd waren.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut danke ich für die tolle Zusammenarbeit und die unzähligen Diskussionen zu unseren Forschungsarbeiten und den sonstigen Herausforderungen einer Assistenzpromotion. Dieser Austausch war und ist mir immer eine Freude.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie und Freunden. Danke für den Rückhalt den Ihr mir in dieser Zeit und auf dem Weg hierhin stets gegeben habt.

Vielen Dank!

Karlsruhe, Juni 2022

Frank Bremer

Work it harder, make it better
Do it faster, makes us stronger

Daft Punk
Harder, Better, Faster, Stronger
Discovery - Oktober 2001

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Inhaltsverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xv
Abkürzungsverzeichnis	xvii
Formelzeichen	xix
1 Einleitung	1
1.1 Aufbau der Forschungsarbeit	4
2 Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1 Modelle in der Gestaltung.....	6
2.1.1 Unterscheidung von Modellen in der Produktentwicklung.....	7
2.1.2 Bedeutung von GFZ-Modellen in der Gestaltung.....	10
2.1.3 Einordnung von GFZ-Modellen	12
2.2 Vorgehen zur Bildung von Modellen	14
2.2.1 Bildung von GFZ-Modellen in der Gestaltung	15
2.2.2 Allgemeine Vorgehensweisen zur Bildung quantitativer Modelle	17
2.2.3 Erfolgsfaktoren der Modellbildung	19
2.3 Grundlagen zum Slicing	21
2.3.1 Maschinenaufbau und Prozess	22
2.3.2 Gestalt der Sichelmesser	25
2.3.3 Lebensmittel	28
2.3.4 Mathematische Beschreibung der Schnittkräfte beim Slicing.....	28
2.4 Fazit zu Grundlagen und Stand der Forschung	31
3 Motivation und Zielsetzung	33
4 Forschungsdesign	35
5 Produktmodelle für die Abbildung von GFZ	39
5.1 Vorgehen zur systematischen Literaturrecherche.....	40
5.2 Vorgehen zur Strukturierung der Produktmodelle in der Gestaltung	43
5.3 Ergebnisse der Literaturrecherche und Strukturierung der Produktmodelle	47
5.3.1 Kategorisierung der Produktmodelle	47
5.3.2 Einordnung der Produktmodelle in das PMF	53

5.3.3	Zwischenfazit zur Übersicht der Produktmodelle	55
5.4	Produktmodelle zur Abbildung von GFZ	55
5.5	Diskussion	59
5.5.1	Produktmodell Framework	59
5.5.2	Produktmodelle für die Abbildung von GFZ	60
5.6	Fazit zu Produktmodellen für die Bildung von GFZ-Modellen.....	61
6	Untersuchung der GFZ von Sichelmessern	63
6.1	Arbeitspakete zur Untersuchung der GFZ von Sichelmessern.....	64
6.1.1	Arbeitspaket 1: Problemdefinition.....	66
6.1.2	Arbeitspaket 2: Modellierung.....	67
6.1.3	Arbeitspaket 3: Qualitative Analyse des Schnittprozesses.....	69
6.1.4	Arbeitspaket 4: Aufbau eines Experiments.....	71
6.1.5	Arbeitspaket 5: Durchführung und Auswertung von Experimenten ..	72
6.2	Analyse von Erkenntnissen zum Schneiden von Lebensmitteln.....	72
6.2.1	Schneiden von Lebensmitteln	73
6.2.2	Eigenschaften der Klinge	74
6.2.3	Wechselwirkungen zwischen Klinge und Lebensmittel	77
6.2.4	Zusammensetzung der Lebensmittel.....	79
6.2.5	Ansätze zur Modellierung des Schnittprozesses von Lebensmitteln 79	
6.2.6	Diskussion	81
6.2.7	Zusammenfassung	83
6.3	Experimentelle Untersuchung der Schnittkräfte beim Slicing	84
6.3.1	Material und Untersuchungsmethode.....	86
6.3.2	Ergebnisse.....	88
6.3.3	Diskussion	98
6.3.4	Zusammenfassung	103
6.4	Fazit zur Untersuchung der GFZ von Sichelmessern.....	104
7	Erfolgsfaktoren für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle	107
7.1	Vorgehen zur Ermittlung der Erfolgsfaktoren	107
7.2	Auswertung der Fallstudie	108
7.2.1	Kritische Schritte	108
7.2.2	Iterationen.....	113
7.3	Erfolgsfaktoren.....	114
7.3.1	Konkretisierung der Frage- und Zielstellung	115
7.3.2	Definition einer messbaren Funktionserfüllung.....	115
7.3.3	Kombinierte Verwendung qualitativer und quantitativer Modelle....	116
7.3.4	Modellierung von Teilsystemen mit variierenden Eigenschaften....	117
7.3.5	Iterative Modellierung und Entwicklung von Versuchsaufbauten ...	119
7.3.6	Dokumentation der gewonnenen Erkenntnisse	120
7.4	Diskussion	121
7.4.1	Konkretisierung der Frage- und Zielstellung.....	121
7.4.2	Definition einer messbaren Funktionserfüllung.....	122

7.4.3	Kombinierte Verwendung qualitativer und quantitativer Modelle	122
7.4.4	Modellierung von Teilsystemen mit variierenden Eigenschaften	123
7.4.5	Iterative Modellierung und Entwicklung von Versuchsaufbauten ...	123
7.4.6	Dokumentation der gewonnenen Erkenntnisse	124
7.4.7	Grenzen der Erfolgsfaktoren	124
7.5	Fazit zu den Erfolgsfaktoren der Bildung quantitativer GFZ-Modelle ...	125
8	Zusammenfassung und Ausblick	127
8.1	Zusammenfassung	127
8.2	Ausblick	129
	Literaturverzeichnis	I
	Glossar	XVII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Eingangsgrößen-Ausgangsgrößen Darstellung eines quantitativen Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ)-Modells.	13
Abbildung 2.3:	Prinzipieller Aufbau eines Slicers mit Sichelmesser.	23
Abbildung 2.4:	Skizze der Phasen des Schnittprozesses mit Sichelmessern in Frontalansicht (oben) und Schnittansicht (unten).	25
Abbildung 2.5:	Querschnitt von zwei Messerklingen.	27
Abbildung 2.6:	Anordnung, Koordinatensysteme und Relativgeschwindigkeiten am Sichelmesser zur Berechnung von Schnittkräften.	29
Abbildung 4.1:	Struktur des Vorgehens zum Erreichen der Zielsetzung.	37
Abbildung 5.1:	Vorgehen zur Strukturierung der in der Gestaltung eingesetzten Produktmodelle.	43
Abbildung 5.2:	Produktmodell Framework (PMF) mit zugeordneten Produktmodellen.	54
Abbildung 6.1:	Arbeitspakete und zugehörige Ergebnisse zur Untersuchung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (GFZ) von Sichelmessern.	65
Abbildung 6.2:	Ein- und Ausgangsgrößen für die Abbildung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (GFZ) von Sichelmessern.	67
Abbildung 6.3:	Modelle zur Ermittlung und Abbildung der quantitativen Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (GFZ) von Sichelmessern für das Slicing.	69
Abbildung 6.4:	Teil des C&C ² -Modells zum Schnittprozess.	70
Abbildung 6.5:	Detailansicht der Spitze einer Schneide im Querschnitt.	76
Abbildung 6.6:	Messaufbau zum Messen der Schnittkräfte beim Schneiden mit einem Sichelmesser.	87
Abbildung 6.7:	Mittelwertkurven der Schnittkraftverläufe beim Slicing von Brühwurst und Kochschinken bei 600 U/min und 1200 U/min.	89
Abbildung 6.8:	Schnittkraftverläufe beim Slicing von Brühwurst und Kochschinken bei 600 U/min und 1200 U/min.	90
Abbildung 6.9:	Bilder des Deformations- und Ablöseverhalten von Scheiben beim Schneiden mit einem Sichelmesser.	95

Abbildung 6.10:	Berechneter Schnittkraftverlauf für das Schneiden eines runden Lebensmittels mit einem Sichelmesser.	97
Abbildung 6.11:	Zusammenfassung der vorgeschlagenen Erweiterung des quantitativen Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ)-Modells zur Berechnung von Schnittkräften beim Schneiden mit Sichelmessern.	106
Abbildung 7.1:	Modellierung von Teilsystemen mit variierenden Eigenschaften am Beispiel unterschiedlicher Lebensmittel.	119
Abbildung 7.2:	Übersicht der Erfolgsfaktoren (EF) und die zugehörige Regel zur Anwendung des Erfolgsfaktors (RAEF) für die Bildung quantitativer Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ)-Modelle in der Gestaltung.	126

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.2:	Exemplarische Vorgehensweisen zur Bildung quantitativer Modelle.	18
Tabelle 5.1:	Suchbegriffe und deren Übersetzung für die systematische Literaturrecherche zu Produktmodellen.	41
Tabelle 5.2:	Leitfragen zur Einordnung von Produktmodellen in die Dimension Modellzweck des Produktmodell Frameworks (PMF).	47
Tabelle 5.3:	In der systematischen Literaturrecherche ermittelte Produktmodelle in der Gestaltung.	49
Tabelle 5.4:	Anzahl der Produktmodelle zur Bildung von Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ)-Modellen nach Art der Abbildung und Art der Information.....	56
Tabelle 5.5:	Liste der für die Bildung eines Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ)-Modells geeigneten Produktmodelle, sortiert nach dem Zeck.	57
Tabelle 6.1:	Mittelwerte (MW) und Varianzkoeffizienten (VK) der gemessenen Schnittkräfte in horizontaler Richtung.	92
Tabelle 6.2:	Mittelwerte (MW) und Varianzkoeffizienten (VK) Werte der gemessenen Schnittkräfte in vertikaler Richtung.	92
Tabelle 7.1:	In der Fallstudie identifizierte kritische Schritte (S) und deren Zuordnung zu dem entsprechenden Arbeitspaket.	109
Tabelle 7.2:	In der Fallstudie identifizierte Iterationen (I).....	113
Tabelle 7.3:	Erfolgsfaktoren (EF) für die Bildung quantitativer Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ)-Modelle in der Gestaltung.	114

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BSI	Blade Sharpness Index
BW	Brühwurst
CAD	Computer Aided Design
CPM	Characteristics Properties Model
C&C ² -Model	Contact and Channel Model
C&C ² -Modell	Contact und Channel Modell
DMA	Dynamisch mechanische Analyse
DSM	Design Structure Matrix
EFR	Embodiment Function Relationship
E	Eigenschaft
FBS	Function-Behaviour-Structure
FE	Funktionserfüllung
FEM	Finite Element Method
GFZ	Gestalt-Funktion-Zusammenhang / Gestalt-Funktion-Zusammenhänge
IF	Integrated Function
KS	Kochschinken
M	Merkmal
NLD	Node Link Diagram
NVH	Noise Vibration Harshness

MBS	Multibody Simulation
MVP	Multi-view Product
MW	Mittelwert
PAG	Parametric Associativity Graph
PMF	Produktmodell Framework
PRBM	Pseudo Rigid Body Model
RAEF	Regel für die Anwendung des Erfolgsfaktors
RB	Randbedingung
RM	Remanufacturability Model
SAPPhIRE	State Action Parts Phenomenon Input Organ Effect
SysML	Systems Modeling Language
TPA	Texture Profile Analysis
VK	Varianzkoeffizient
V/W	Verhalten / Wirkung

Formelzeichen

a	Konstante der Archimedischen Spirale
b	Steigung der Archimedischen Spirale
F_n	Schnittkraft normal zur Schneide
F_t	Schnittkraft tangential zur Schneide
O	Drehzentrum des Sichelmessers
P	Beliebiger Punkt auf der Archimedischen Spirale
P_1	Erster Schnittpunkt zwischen Schneide des Sichelmessers und Lebensmittelkontur
P_2	Zweiter Schnittpunkt zwischen Schneide des Sichelmessers und Lebensmittelkontur
r	Radius eines Punktes auf der Archimedischen Spirale
R	Spezifische Bruchenergie eines Lebensmittels
s	Abschnitt der Schneide im Eingriff mit dem Lebensmittel
v_c	Umfangsgeschwindigkeit
v_n	Schnittgeschwindigkeit normal zur Schneide
v_r	radiale Geschwindigkeit
v_t	Schnittgeschwindigkeit tangential zur Schneide
W_B	Bruchenergie
W_E	Elastisch gespeicherte Energie
W_R	Reibungsenergie
W_S	Schnittenergie
W_V	Verformungsenergie

Griechische Symbole

θ	Winkel zwischen dem Radius und der Vertikalen zur Umrechnung der Schnittgeschwindigkeiten
μ	Winkel zwischen dem Radius und der Tangente durch den Punkt P zur Umrechnung der Schnittgeschwindigkeiten
ξ	Zug/Druck-Verhältnis
φ	Winkel zum Ursprung eines Punktes auf der Archimedischen Spirale
ψ	Winkel zwischen der Tangente durch den Punkt P und der Vertikalen zur Umrechnung der Schnittgeschwindigkeiten
ω	Winkelgeschwindigkeit des Sichelmessers
Ω	Verdrehwinkel des Sichelmessers zur Nulllage

1 Einleitung

Die Gestaltung ist ein Teil der Produktentwicklung. In der Gestaltung werden auf Basis des ausgewählten Lösungskonzepts die geometrischen und stofflichen Merkmale eines Produkts festgelegt und so das herstellbare Produkt definiert (Matthiesen, 2021; Ponn & Lindemann, 2011). Die Merkmale werden dabei so festgelegt, dass durch die Ausnutzung physikalischer Effekte das gewünschte Verhalten, die geforderte Funktion, erreicht wird (Feldhusen et al., 2013; Rodenacker, 1991). Neben den bewusst ausgenutzten physikalischen Effekten sind bei der Gestaltung weitere Effekte zu berücksichtigen, sofern sie das Verhalten maßgeblich beeinflussen. Damit das Produkt die gewünschte Funktion erfüllen kann, muss es funktionsgerecht gestaltet werden (Albers & Matthiesen, 2002). Dafür ist Wissen über die Zusammenhänge zwischen der Gestalt und der Funktion, sogenannte Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (GFZ), notwendig. Dieses Wissen kann in sogenannten GFZ-Modellen abgebildet werden. Ist das Wissen über die GFZ nicht ausreichend, muss es durch Analyse ermittelt und in GFZ-Modellen abgebildet werden (Matthiesen, 2021). Daher ist die Bildung von GFZ-Modellen zentraler Bestandteil der Gestaltung.

Modelle die Zusammenhänge zahlenmäßig abbilden werden als quantitative Modelle bezeichnet. Quantitative GFZ-Modelle können für die Durchführung von Berechnungen implementiert werden. So können Zahlenwerte für die Festlegung der geometrischen und stofflichen Merkmale ermittelt werden. Daher sind quantitative GFZ-Modelle insbesondere für die Verbesserung der Funktionserfüllung und die Festlegung der Gestaltmerkmale wichtig. Bisher wurde kaum untersucht, wie quantitative GFZ-Modelle für die Gestaltung in der Praxis gebildet werden. Daher ist wenig über erfolgreiches Vorgehen bei der Bildung von quantitativen GFZ-Modellen in der Gestaltung bekannt. Daher wird in dieser Forschungsarbeit die Bildung von quantitativen GFZ-Modellen anhand einer Fallstudie untersucht.

Die Aktivitäten der Gestaltung werden in den Prozess der Produktentwicklung eingeordnet (VDI2221 Blatt1:2019-11). Meist verfolgt die Gestaltung mehrere Ziele (VDI2223:2004-01), zum Beispiel die Reduzierung von Produktionskosten oder die Verbesserung der Funktionserfüllung. In dieser Forschungsarbeit wird die Gestaltung unter dem Aspekt der Verbesserung der Funktionserfüllung betrachtet. In der Produktentwicklung existieren unterschiedliche Verständnisse des Begriffs Funktion (Erden et al., 2008). In der Gestaltung wird die Funktion als gewünschtes Verhalten zur Erfüllung eines Zweckes definiert (Umeda et al., 1990). Dieses Verhalten wird auch als erwartetes Verhalten bezeichnet (Gero & Kannengiesser, 2004). Diesem erwarteten Verhalten steht das zu beobachtende Verhalten des Produkts unter den

gegebenen Randbedingungen gegenüber (Gero & Kannengiesser, 2004). Eine hohe Funktionserfüllung wird erreicht, wenn das beobachtete Verhalten dem gewünschten Verhalten hinreichend entspricht.

Das Wissen über die GFZ ist erforderlich, um die Gestalt eines Produktes erfolgreich zu definieren. Ist dieses Wissen nicht, oder nur implizit, vorhanden besteht ein erhöhtes Risiko, dass das gewünschte Verhalten nicht erreicht wird (Matthiesen, 2021). In einem iterativen Prozess werden in Synthese-Aktivitäten die Merkmale des Produkts definiert und in Analyse-Aktivitäten das Verhalten des Produkts bestimmt (Weber, 2012). Dabei sollte über die Zusammenhänge erlangtes Wissen in GFZ-Modellen abgebildet werden, damit es zukünftig explizit vorliegt.

Es existieren unterschiedliche Arten von Modellen und Vorgehensweisen zur Bildung von Modellen (Vajna et al., 2018). Die Vielfalt an möglichen Modellen erschwert die Festlegung auf ein Modell, wenn strukturierte Übersichten über Zwecke der Modelle und Erfahrung in der Anwendung der Modelle fehlen. Zudem beeinflussen Eigenschaften von Modellen, wie zum Beispiel ihre Granularität, die Entscheidungen, die auf den Modellen basierend getroffen werden können (Maier et al., 2017).

Vorgehensweisen zur Bildung von Modellen werden in der Literatur allgemein oder spezifisch beschrieben. Allgemeine Vorgehensweisen können in der Gestaltung angewandt werden, bieten aber wenig spezifische Unterstützung. Spezifische Vorgehensweisen beziehen sich auf bestimmte Modelle oder technische Fragestellungen. Es wird beschrieben, wie eine bestimmte Art von Modell gebildet wird, zum Beispiel ein Mehrkörpersimulationsmodell. Für die Modellierung eines bestimmten technischen Problems, wie zum Beispiel die Beschreibung der Schwingungszustände eines Systems, werden einzelne Schritte beschrieben und welche Modelle eingesetzt werden können, siehe (VDI 3843 Blatt1:2018-02). In solchen Fällen liegt meist bereits umfangreiches Wissen über die GFZ, zum Beispiel in Form von bekannten Effekten, vor. Im Fall der Schwingungszustände liegen zum Beispiel Formeln zur Berechnung von Eigenfrequenzen für einfache Strukturelemente vor. Beispiele dafür finden sich in VDI 3843 Blatt1:2018-02. Das allgemeine Vorgehen zur Bildung quantitativer GFZ-Modelle in der Praxis der Gestaltung, insbesondere wenn die Effekte zu den GFZ unbekannt sind, wurde bisher kaum betrachtet. Das heißt konkret die Ermittlung von Zusammenhängen zwischen Gestalt und Verhalten und dessen Abbildung in einem quantitativen Modell. Es ist daher unklar, was hier ein erfolgreiches Vorgehen ausmacht.

Wegener und Cash (2020) beschreiben Ansätze zur Erforschung von Entwicklungsprozessen. Sie stellen heraus, dass narrative Ansätze geeignet sind, um Prozesse

mit ihren inhaltlichen und zeitlichen Abläufen zu betrachten und Momente mit starken Auswirkungen hervorzuheben. Aus diesen Beobachtungen können theoretische Erkenntnisse abgeleitet werden. In dieser Forschungsarbeit wird daher erfolgreiches Vorgehen zur Bildung quantitativer GFZ-Modelle für die Gestaltung anhand einer Fallstudie im Rahmen eines Projekts mit einem Industriepartner untersucht. Ein Ziel des Projekts war es Wissen zu den GFZ und den zugrundeliegenden Effekten aufzubauen und in einem quantitativen GFZ-Modell abzubilden. Das Objekt für die Gestaltung in der Fallstudie sind Sichelmesser für den Aufschnitt von Lebensmitteln im industriellen Maßstab.

In industriellen Aufschnittmaschinen werden Lebensmittel, wie Wurst und Käse, für den Vertrieb als Selbstbedienungsware in Scheiben geschnitten. Die Scheiben werden gestapelt und als Portionen mit einer bestimmten Anzahl Scheiben und einem definierten Gewicht verpackt. Der Prozess des Schneidens wird als Slicing bezeichnet, die Aufschnittmaschinen als Slicer. Die Hauptfunktion der Slicer ist das Schneiden der Scheiben. Als Schneidwerkzeuge werden sogenannte Sichelmesser mit einer sichelförmigen Schneidkante verwendet. Das gewünschte Verhalten ist, dass die Lebensmittelscheiben geschnitten und dabei so beschleunigt werden, dass sie an einer bestimmten Position auf einem Fließband landen. Die Lebensmittelscheiben dürfen dabei nicht zerstört werden. Die Geschwindigkeit, mit der die Scheiben geschnitten werden, sollte möglichst hoch sein, um eine hohe Produktivität der Maschine zu erreichen. Bei der Gestaltung der Messer muss berücksichtigt werden, dass dieses Verhalten für eine große Vielfalt an Lebensmitteln mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften erreicht werden muss. Die Geometrie der Messer, die für diesen Schnittprozess verwendet werden, wurden bisher pragmatisch gestaltet (Atkins, 2009). Das heißt, die Gestaltung der Messer basierte bisher auf Erfahrungswerten und Ausprobieren. Quantitative GFZ-Modelle wurden zur Gestaltung der Sichelmesser bisher nicht eingesetzt. Das erfahrungsbasierte Vorgehen führt zu Iterationen bei der Festlegung der Messergestalt und der Einstellung der Prozessparameter. Die Bildung eines quantitativen GFZ-Modells der Zusammenhänge zwischen Gestaltmerkmalen, Eigenschaften der Lebensmittel und Prozessparametern ermöglicht eine Optimierung der Funktionserfüllung. Zudem sollten Iterationen in der Gestaltung durch das explizit verfügbare Wissen über die Zusammenhänge verringert werden.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, praxisnah zu untersuchen, welche Faktoren erfolgreiches Vorgehen bei der Bildung quantitativer GFZ-Modelle in der Gestaltung ausmachen. Diese Faktoren werden nachfolgend als Erfolgsfaktoren bezeichnet. Dazu wird eine Fallstudie zur Bildung eines quantitativen GFZ-Modells für die Gestaltung von Sichelmessern für den industriellen Aufschnitt von Lebensmitteln

durchgeführt. Anhand von kritischen Schritten und Iterationen im Vorgehen der Fallstudie werden die Erfolgsfaktoren der Bildung quantitativer GFZ-Modelle abgeleitet.

1.1 Aufbau der Forschungsarbeit

Diese Forschungsarbeit ist in acht Kapitel unterteilt. Auf die Einleitung in diesem Kapitel folgen die Grundlagen und der Stand der Forschung in Kapitel 2.

Kapitel 2 besteht aus drei Teilen. Im ersten Teil werden Modelle und deren Verwendung im Kontext der Gestaltung erläutert. Im zweiten Teil werden Vorgehensweisen zur Bildung von Modellen erläutert. Im dritten Teil wird der Slicing Prozess und die Gestalt der Sichelmesser vorgestellt.

In Kapitel 3 werden aufbauend auf dem Stand der Forschung die Motivation und die wissenschaftliche Fragestellung dieser Forschungsarbeit hergeleitet.

In Kapitel 4 wird das Forschungsdesign bestehend aus Forschungsfragen und dem Vorgehen vorgestellt.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse einer systematischen Literaturrecherche zu Produktmodellen in der Gestaltung präsentiert. Die in der systematischen Literaturrecherche ermittelten Produktmodelle werden anhand ihrer Eigenschaften und Zwecke strukturiert. Die Produktmodelle werden anschließend daraufhin analysiert, ob sie für die Bildung von GFZ-Modellen geeignet sind. In Kapitel 5 entstehen so eine allgemeine und eine für GFZ-Modelle spezifische Übersicht von Produktmodellen.

In Kapitel 6 werden die Untersuchung und die Abbildung der GFZ von Sichelmessern vorgestellt. Das Vorgehen und die Ergebnisse werden beschrieben. Dabei wird auf die Randbedingungen und Ziele des Projekts, als dessen Teil die Untersuchungen durchgeführt wurden, eingegangen. Der Fokus liegt auf der Vorstellung der Erkenntnisse zu den GFZ und deren Abbildung in einem quantitativen Modell.

In Kapitel 7 wird das Vorgehen aus Kapitel 6 retrospektiv betrachtet. Kritische Schritte und Iterationen bei der Untersuchung und Abbildung der GFZ von Sichelmessern werden identifiziert. Daraus werden die Erfolgsfaktoren für die Bildung von quantitativen GFZ-Modellen abgeleitet.

Kapitel 8 ist die Zusammenfassung dieser Forschungsarbeit. In diesem Kapitel wird auch ein Ausblick auf weiterführende Forschungsthemen, basierend auf den Ergebnissen dieser Forschungsarbeit gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In dieser Forschungsarbeit werden Erfolgsfaktoren zur Bildung quantitativer GFZ-Modelle anhand einer Fallstudie zur Gestaltung von Sichelmessern untersucht. Dazu werden in diesem Kapitel die notwendigen Grundlagen und der Stand der Forschung erläutert.

In Kapitel 2.1 werden Modelle und deren Verwendung in der Gestaltung erläutert. Die Bedeutung der Modellbildung in der Gestaltung wird aufgezeigt. Es werden verschiedene Ansätze zur Kategorisierung von Modellen erläutert. Darauf aufbauend werden quantitative GFZ-Modelle beschrieben und eingeordnet.

In Kapitel 2.2 wird das Vorgehen zur Bildung von Modellen betrachtet. Es wird aufgezeigt, dass die Bildung von quantitativen GFZ-Modellen in der Gestaltung bisher kaum betrachtet wurde. Es werden daher Beispiele für allgemeine Vorgehensweisen zur Bildung von Modellen gezeigt. Ebenso werden bekannte Beschreibungen für erfolgreiches Vorgehen bei der Bildung von Modellen erläutert.

In Kapitel 2.3 wird der Stand der Forschung zum Schneiden von Lebensmitteln mit Sichelmessern dargestellt. Der Prozessablauf, der Aufbau der relevanten Teile und die Gestalt der Sichelmesser werden erläutert. Zudem wird ein bestehendes mathematisches Modell der Schnittkräfte vorgestellt.

In Kapitel 2.4 wird ein Fazit gezogen und die Forschungslücke, die in dieser Forschungsarbeit adressiert wird, aufgezeigt.

Zur besseren Verständlichkeit werden an dieser Stelle Gestalt, Funktion und Verhalten als zentrale Begriffe im Kontext dieser Forschungsarbeit erläutert.

Gestalt

Gestalt wird in dieser Forschungsarbeit als Überbegriff für die geometrischen und stofflichen Eigenschaften eines Produkts verwendet. Nach der Definition von Weber (2014) werden Merkmale und Eigenschaften der Gestalt unterschieden. Merkmale der Gestalt können in der Gestaltung direkt beeinflusst werden. Merkmale sind beispielsweise Abmaße eines Bauteils wie Länge, Breite oder Höhe. Eigenschaften ergeben sich aus den Merkmalen und Randbedingungen und können nicht direkt beeinflusst werden. Beispiele für Eigenschaften sind das Volumen, die Masse oder die Lage des Massenschwerpunktes. Vergleiche (Ponn & Lindemann, 2011).

Funktion

Der Begriff Funktion hat nach Erden et al. (2008) in der Produktentwicklung verschiedene Ausprägungen. Im Kontext der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge wird die Funktion als ein Zweck des Produkts verstanden. Damit eine Funktion in GFZ-Modellen betrachtet werden kann, muss sie durch ein gewünschtes Verhalten ausgedrückt werden, das nach Matthiesen (2021) auch als Soll-Funktion bezeichnet wird. Wie gut die Funktion erfüllt wird hängt davon ab, wie gut dieses gewünschte Verhalten erreicht wird. Dieses Verständnis von Funktion ist auch angelehnt an die Beschreibung von Gero und Kannengiesser (2004).

Verhalten

Das Verhalten ist die Beschreibung der Interaktion eines Produkts mit der Systemumgebung unter gegebenen Randbedingungen. Das tatsächlich beobachtbare Verhalten wird nach Matthiesen (2021) auch als Ist-Funktion bezeichnet. Ein Beispiel für Verhalten bei Sichelmessern ist die Bewegung der abgetrennten Lebensmittelscheiben aufgrund der Interaktion mit dem Sichelmesser. In einem feineren Detaillierungsgrad ist das Verhalten die Deformation des Lebensmittels aufgrund der eindringenden Schneide. In einem größeren Detaillierungsgrad kann das Verhalten als die resultierende Geometrie der Portion beschrieben werden. Zur Bewertung des Verhaltens muss beobachtetes Verhalten, Ist-Funktion, mit dem gewünschten Verhalten, Soll-Funktion, verglichen werden (Matthiesen, 2021).

Gestalt-Funktion-Zusammenhänge

Der Begriff Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (GFZ) wird im Kontext der GFZ-Modelle in Kapitel 2.1.2 näher erläutert.

2.1 Modelle in der Gestaltung

Modelle sind ein zentrales Element menschlichen Denkens. Daher ist die Modellbildung Teil vieler wissenschaftlicher Disziplinen. In Modellen wird die Wirklichkeit vereinfacht abgebildet. Stachowiak (1973) definiert drei Hauptmerkmale für Modelle:

- Abbildungsmerkmal
- Verkürzungsmerkmal
- Pragmatisches Merkmal

Das *Abbildungsmerkmal* beschreibt, dass Modelle immer die Abbildung von etwas sind. Das bedeutet, dass es zu jedem Modell ein Original gibt. Das *Verkürzungsmerkmal* beschreibt, dass Modelle nie die Gesamtheit des Originals wiedergeben. Das *pragmatische Merkmal* beschreibt, dass Modelle immer zu einem bestimmten Zweck gebildet werden. Modelle bestehen dabei immer in einem zeitlichen Kontext und im Kontext zu einem Benutzer des Modells. Zur Definition und zur Beschreibung eines Modells können die Hauptmerkmale und der Kontext als Fragen formuliert werden (Stachowiak, 1973):

- *Wovon* wird das Modell gebildet?
- *Wozu* wird das Modell gebildet?
- *Wann* wird das Modell gebildet?
- *Für wen* wird das Modell gebildet?

Stachowiak (1973) beschreibt Modelle durch die Hauptmerkmale sehr umfassend. In der Produktentwicklung existiert eine Vielzahl an Modellen, die für unterschiedliche Zwecke eingesetzt werden (Weidmann et al., 2017). Für spezifischere Betrachtungen von Modellen in der Produktentwicklung ist es daher notwendig Modelle weiter zu unterscheiden. Grundlegend werden in der Produktentwicklung zum Beispiel Modelle von Prozessen und Modelle von Produkten eingesetzt (Ponn & Lindemann, 2008; Wynn & Clarkson, 2018). Nachfolgend werden Unterscheidungen von Modellen in der Produktentwicklung erläutert.

2.1.1 Unterscheidung von Modellen in der Produktentwicklung

In der Produktentwicklung existieren unterschiedliche Sichten auf Modelle und wie diese unterschieden werden können. Eine einheitliche Systematik existiert nicht. Folgend werden Beispiele für unterschiedliche Ansätze zur Unterscheidung von Modellen beschrieben. Diese Unterscheidungen beziehen sich auf die Art der Modelle. Andere zusammenfassende Bezeichnungen sind Modellbildungstechnik, Modellierungssprachen oder Modell zur Bildung eines Modells. Die Art des Modells definiert, wie das Produkt abgebildet wird. Daraus resultieren grundsätzliche Eigenschaften der Modelle die, wie nachfolgend beschrieben, zur Unterscheidung herangezogen werden können. Bei der Verwendung des Begriffs Modell wird diese Unterscheidung meist nicht getroffen. Es muss daher immer berücksichtigt werden, ob ein bestimmtes Modell, zum Beispiel ein CAD-Modell, betrachtet wird oder eine bestimmte Instanz eines Modells, zum Beispiel das CAD-Modell eines Sichelmessers. Im ersten Fall werden CAD-Modelle allgemein betrachtet. Im zweiten Fall wird das konkrete CAD-Modell eines Sichelmessers betrachtet.

Andreasen et al. (2015) unterscheiden Modelle anhand von fünf *Zwecken* von Modellen:

- Konzeptionierung
- Definition des Produkts
- Erkenntnisgewinn
- Organisieren
- Kommunikation

Der Zweck *Konzeptionierung* umfasst Modelle, die zur Abbildung einer Idee, eines Konzepts oder eines Wirkprinzips genutzt werden. Ein Beispiel für Modelle mit diesem Zweck sind Skizzen. Der Zweck *Definition des Produkts* umfasst Modelle, die zur Spezifikation des Produkts benötigt werden. In diesen Modellen werden die geometrischen und stofflichen Merkmale eines Produkts festgelegt. Ein Beispiel für Modelle mit diesem Zweck sind technische Zeichnungen. Der Zweck *Erkenntnisgewinn* umfasst Modelle, die gebildet werden, um das Verhalten eines Produkts untersuchen zu können. Ein Beispiel für Modelle mit diesem Zweck sind Mehrkörper-Simulationsmodelle. Der Zweck *Organisieren* umfasst Modelle, die zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses eingesetzt werden. Zum Beispiel indem die Struktur, welche Funktionen durch welche Teilsysteme des Produkts erfüllt werden sollen, in einem Funktionsmodell abgebildet wird. Der Zweck *Kommunikation* umfasst Modelle, die genutzt werden, um den Austausch von Informationen zwischen Personen zu unterstützen. Für diesen Zweck können die meisten der Modelle eingesetzt werden. (Andreasen et al., 2015)

Weidmann et al. (2017) klassifizieren Modelle, die in der Entwicklung mechatronischer Produkte eingesetzt werden. Für die Klassifizierung verwenden sie folgende Charakteristiken eines Modells:

- Disziplin
- Art der Abbildung
- Phase der Entwicklung
- Art der Information

Die *Disziplin* ist die Zuordnung zu einer der Disziplinen der Mechatronik. Die *Art der Abbildung* unterscheidet unterschiedliche Formen der Abbildung des Produkts, zum Beispiel grafische oder textuelle Beschreibungen. Die *Phase der Entwicklung* unterscheidet, wann im Entwicklungsprozess ein Modell eingesetzt werden kann. Die *Art der Information* unterscheidet Modelle anhand der enthaltenen Informationen, zum Beispiel ob Informationen über die Anforderungen, das Verhalten oder die Gestalt abgebildet werden.

Eckert und Hillerbrand (2018) diskutieren die unterschiedliche Sicht von Wissenschaft und Ingenieurwesen auf Modelle. Insbesondere gehen sie auf die philosophische Betrachtung von Modellen ein. Sie schlagen eine Unterscheidung von Modellen anhand der Aspekte *Struktur*, *Funktion* und *Verhalten* eines Produkts vor. *Struktur* umfasst die Gestalt des Produkts. *Funktion* bezeichnet die Anforderungen an das Produkt. Das genaue Verständnis des Begriffs Funktion ist abhängig vom Kontext, siehe zum Beispiel (Vermaas, 2009, 2010). *Verhalten* umfasst das tatsächliche Verhalten des Produkts. Modelle werden in dieser Systematik danach unterschieden, ob sie die *Struktur*, die *Funktion* oder das *Verhalten* abbilden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Zuordnung nicht zwingend eindeutig möglich ist (Eckert & Hillerbrand, 2018).

Zudem schlagen Eckert und Hillerbrand (2018) eine Unterteilung von Modellen in *erzeugende Modelle* und *bewertende Modelle* vor. *Erzeugende Modelle* sind Modelle, die ein potenzielles Produkt abbilden. Dabei wird nicht jedes Modell zum späteren Produkt. Beispiele für *erzeugende Modelle* sind die Skizze eines Konzepts oder die technische Zeichnung eines Produkts. *Bewertende Modelle* sind Modelle, mit denen bewertet wird, ob das Verhalten eines Produkts den Anforderungen entspricht. Das Produkt wurde dabei zuvor durch ein *erzeugendes Modell* definiert. Bewertende Modelle sind zum Beispiel Simulationsmodelle oder physische Modelle. (Eckert & Hillerbrand, 2018)

Die zuvor beschriebenen Ansätze zur Einteilung von Modellen beziehen sich allgemein auf Modelle in der Produktentwicklung. Folgend wird eine spezifische Unterscheidung quantitativer Modelle beschrieben.

Modelle, mit denen Zusammenhänge quantitativ ausgedrückt werden können, werden auch als mathematische Modelle bezeichnet. Mathematische Modelle werden abhängig davon unterschieden, ob sie auf einer Beschreibung der wirkenden physikalischen Effekte beruhen oder ob sie aus Daten ermittelt wurden. Modelle, die rein auf der Beschreibung physikalischer Effekte beruhen, werden als *White-Box-Modelle* bezeichnet. Modelle, die rein auf Daten beruhen, werden als *Black-Box-Modelle* bezeichnet. Mischformen werden übergeordnet als *Grey-Box-Modelle* bezeichnet. (Isermann, 2008)

Ljung (2010) beschreibt Abstufungen von *Grey-Box-Modellen*. Diese Abstufungen unterscheiden sich durch den Grad der Beschreibung des Modells durch physikalische Effekte oder Daten. Für die Beschreibung unterschiedlicher Abstufungen werden Grauton Bezeichnungen wie *light-Grey* verwendet. Entsprechend des dominierenden Anteils werden Abstufungen von dunkel nach hell verwendet.

Häufig werden mathematische Modelle zur Berechnung am Computer implementiert. Die Implementierung eines Modells am Computer wird als Simulation oder Simulationsmodell bezeichnet. Für die Erstellung von Simulationen existiert eine Vielzahl an Werkzeugen und spezialisierten Softwaretools. Dazu zählen Computer Aided Design (CAD) Software, Mehrkörpersimulation und Computational Fluid Dynamics (CFD) (Vajna et al., 2018). Diese Modelle werden in der Gestaltung häufig gebildet, sind aber auf bestimmte Fragestellungen beschränkt.

2.1.2 Bedeutung von GFZ-Modellen in der Gestaltung

In dieser Forschungsarbeit wird die Bildung von GFZ-Modellen im Kontext der Gestaltung betrachtet. Daher werden diese hier näher erläutert.

Die Gestaltung ist ein elementarer Bestandteil der Entwicklung mechatronischer Produkte. In der Gestaltung wird durch die Festlegung der geometrischen und stofflichen Merkmale das Lösungskonzept in eine herstellbare Gestalt überführt (Ponn & Lindemann, 2011).

Um diesen Prozess zu unterstützen, werden in der Gestaltung Modelle des Produkts eingesetzt. Diese werden als Produktmodelle bezeichnet. Deren zentrales Merkmal ist, dass sie das Produkt abbilden. Häufig werden Produktmodelle erstellt bevor das Produkt physisch existiert. Die Modelle dienen hier als Ersatz für das Produkt in den Aktivitäten der Gestaltung.

Zentrale Aktivitäten der Gestaltung sind die Analyse und die Synthese. In der Analyse werden die Merkmale und Eigenschaften der Gestalt betrachtet und bewertet. Dabei werden unter anderem die Zusammenhänge im Kontext des Systems betrachtet. Durch Beobachtung oder Vorhersage wird ein Abgleich zwischen erwartetem und beobachtetem, beziehungsweise vorhergesagtem, Verhalten durchgeführt. In der Synthese werden ausgehend von dem vorhandenen, gegebenenfalls in der Analyse gewonnenen, Wissen die Merkmale der Gestalt festgelegt. (Weber, 2012)

Die Festlegung der Merkmale in der Synthese erfordert Wissen über die Zusammenhänge zwischen Gestalt und Funktion. Dieses Wissen kann implizit oder explizit vorliegen. Implizites Wissen liegt in Form von mentalen Modellen vor und wird auch als Erfahrungswissen bezeichnet. Explizites Wissen liegt in Form von Modellen des GFZ vor. Sind in GFZ-Modellen sowohl Gestalt als auch Funktion messbar, werden diese als quantitative GFZ-Modelle bezeichnet. (Matthiesen, 2021)

In der Literatur existieren weitere grundlegende Bezeichnungen die eine ähnliche Art Modell beschreiben. Nach Ponn und Lindemann (2008) werden in einem Wirkmodell des Produkts die Wirkprinzipien abgebildet, die zur Erfüllung der Teilfunktionen notwendig sind. Zusätzlich existiert ein Baumodell, in dem das Produkt auf Ebene der Gestalt definiert ist.

Nach Rodenacker (1991) werden in der Gestaltung physikalische Gesetze genutzt, um Funktionen zu erfüllen. Der Fokus liegt dabei auf der Konzipierung von Produkten. Dabei werden physikalische Prinzipien als Lösungskonzept ausgewählt. Eine ähnliche Darstellung existiert im Axiomatic Design. Hier wird der mathematische Zusammenhang zwischen Gestaltparametern und der Funktionserfüllung in Matrizen abgebildet (Suh, 1990). In beiden Fällen sind sowohl die Gestalt als auch die Funktion berücksichtigt. Allerdings liegt der Fokus auf der Auswahl bekannter Effekte, um eine Funktion zu erfüllen.

Bei GFZ-Modellen im Kontext dieser Forschungsarbeit liegt der Fokus darauf die Zusammenhänge im Kontext der Anwendung des Produkts zu betrachten und die relevanten Zusammenhänge zu ermitteln und abzubilden. Das Finden geeigneter Wirkprinzipien wird nicht betrachtet. Das Wirkprinzip stellt sicher, dass die Funktion grundsätzlich erfüllt wird. Wie gut die Funktion erfüllt wird, also die Qualität der Funktionserfüllung, wird durch die in der Gestaltung festgelegten Details der geometrischen und stofflichen Merkmale bestimmt. Das für die Festlegung dieser Details notwendige Wissen kann nicht in Effektkatalogen für eine Funktion abgebildet sein, da hier eine idealisierte Gestalt angenommen wird und keine ungewollten Einflüsse berücksichtigt werden. Daher muss dieses Wissen entweder aus der Erfahrung vorhanden sein, bereits in spezifischen Modellen abgebildet sein oder es muss ermittelt werden.

Patzak (1982) bezeichnet im Kontext der Systemtechnik Modelle, die Wirkzusammenhänge abbilden, als Erklärungsmodelle. Erklärungsmodelle werden als gültig angenommen, bis sie falsifiziert werden. Dazu werden Hypothesen oder Wahrscheinlichkeitsaussagen formuliert und geprüft. Basierend auf solchen Erklärungsmodellen können Vorhersagemodelle aufgebaut werden. Diese dienen dazu künftiges Verhalten, zum Beispiel nach Veränderung eines Parameters, vorherzusagen. (Patzak, 1982)

GFZ-Modelle können als Erklärungs- und Vorhersagemodelle in der Gestaltung verstanden werden. Wenn diese daher in ausreichender Qualität vorliegen, ist das notwendige Wissen zur Gestaltung in Bezug auf die Funktionserfüllung des Produkts vorhanden. Ist dies nicht der Fall, muss dieses Wissen bei der Gestaltung gewonnen

werden. Dadurch entsteht zusätzlicher Aufwand für die Gestaltung und ein potenziell erhöhtes Risiko für einen Misserfolg. Dies macht GFZ-Modelle zu einer wichtigen Eingangsgröße der Gestaltung (Matthiesen, 2021). Insbesondere quantitative GFZ-Modelle bieten einen Mehrwert, da mit ihnen konkrete Aussagen zum Verhalten der Gestalt getroffen werden können. Dennoch wird die Bedeutung der Bildung von GFZ-Modellen in der Gestaltung häufig unterschätzt (Matthiesen, 2021).

2.1.3 Einordnung von GFZ-Modellen

Abbildung 2.1 stellt die Ein- und Ausgangsgrößen eines GFZ-Modells dar. Der Zweck von GFZ-Modellen ist es, den Zusammenhang zwischen der Gestalt und der Funktion unter gegebenen Randbedingungen abzubilden. Die Gestalt wird dabei durch festlegbare Merkmale und sich aus den Merkmalen und Randbedingungen ergebenden Eigenschaften repräsentiert. Randbedingungen sind dabei alle Parameter, die außerhalb des Gestaltungsraums liegen und damit nicht durch die Festlegung der Merkmale beeinflusst werden können.

Für die Funktion muss aus dem GFZ-Modell hervorgehen, wie gut die Funktion erfüllt wird. Ob eine Funktion erfüllt wird, kann zum Teil nur indirekt anhand eines Verhaltens oder einer erzielten Wirkung bewertet werden, zum Beispiel ob eine notwendige Kraft zur Erfüllung einer Funktion erreicht wird oder eine Bewegung hinreichend genau ausgeführt wird. GFZ-Modelle sollen es ermöglichen das gewünschte Verhalten mit dem tatsächlichen Verhalten zu vergleichen und die Gestalt bei Abweichungen gezielt anzupassen zu können. Der Begriff GFZ-Modell ist dabei nicht an eine bestimmte Art von Modell gebunden. Es ist vielmehr ein Sammelbegriff für Modelle, die in der Gestaltung mit dem Ziel gebildet werden, um eine Gestalt synthetisieren zu können (Matthiesen, 2021). Das GFZ-Modell eines Produkts ist daher die Gesamtheit der Modelle, die notwendig sind, um die Zusammenhänge zwischen der Gestalt und der Funktionserfüllung des Produkts abzubilden.

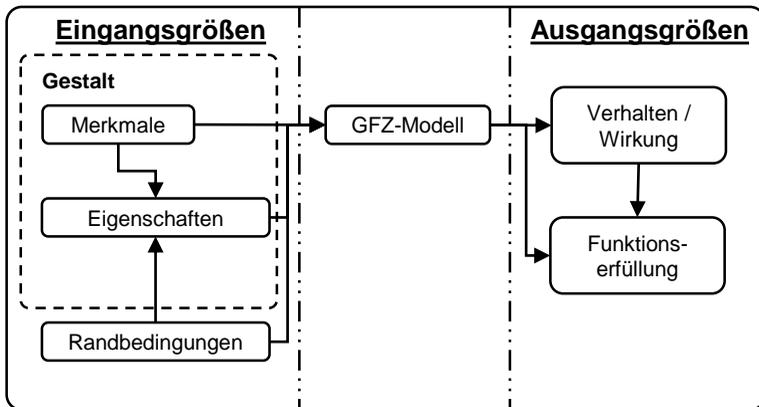


Abbildung 2.1: Eingangsgrößen-Ausgangsgrößen Darstellung eines quantitativen Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ)-Modells. Ein GFZ-Modell ermöglicht eine Aussage über die Funktionserfüllung, beziehungsweise das Verhalten, der Gestalt. Die Gestalt ist durch Merkmale und Eigenschaften charakterisiert, wobei sich die Eigenschaften der Gestalt aus Merkmalen und Randbedingungen ergeben und nicht direkt festgelegt werden können.

Ein einfaches Beispiel ist die Darstellung von Wirkprinzipien. Das physikalische Wirkprinzip wird hier in Form einer analytischen Gleichung angegeben. Diese bildet den Zusammenhang zwischen den relevanten Gestaltmerkmalen und dem Verhalten ab. Um die Gestalt im Systemkontext darzustellen oder die Zusammenhänge zu kommunizieren, sind allerdings häufig weitere Modelle notwendig, zum Beispiel technische Zeichnungen, Skizzen oder 3D-Modelle.

Folgend wird der Begriff GFZ-Modell in die vorgestellten Unterscheidungen nach Andreasen sowie Eckert und Hillerbrand eingeordnet.

Nach den Zwecken von Andreasen et al. (2015) handelt es sich bei GFZ-Modellen hauptsächlich um Modelle zum Erkenntnisgewinn. Eine eindeutige Zuordnung ist allerdings nicht möglich, da ein GFZ-Modell auch für die anderen Zwecke eingesetzt werden kann, zum Beispiel zur Kommunikation der Zusammenhänge. Nach der Einordnung von Eckert und Hillerbrand (2018) sind quantitative GFZ-Modelle der Abbildung von *Verhalten* zuzuordnen. Allerdings wird die *Struktur*, die Gestalt, als Eingangsgröße benötigt. In der Unterscheidung zwischen *erzeugenden Modellen* und *bewertenden Modellen* sind quantitative GFZ-Modelle als *bewertende Modelle* einzuordnen.

Über die Merkmale nach Stachowiak (1973) können quantitative GFZ-Modelle wie folgt beschrieben werden:

- **Wovon** wird das Modell gebildet?
 - Von den für die GFZ relevanten Teilen der Gestalt
- **Wozu** wird das Modell gebildet?
 - Zur Festlegung der geometrischen und stofflichen Merkmale der Gestalt, basierend auf dem Wissen zu den GFZ
- **Wann** wird das Modell gebildet?
 - Während der Gestaltung, bis es hinreichend genau ist für die Synthese
- **Für wen** wird das Modell gebildet?
 - Für die Ingenieurin / den Ingenieur

Zusammenfassend zeigt die Auseinandersetzung mit Modellen in der Literatur deren allgemein große Bedeutung. Für die Gestaltung sind insbesondere GFZ-Modelle von großer Bedeutung, um die GFZ einer Gestalt abzubilden. Dazu kann eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle gebildet werden. Allerdings existieren unterschiedliche Systematiken zur Beschreibung der Modelle, aber keine Übersicht über existierende Modelle oder wie diese in die Systematiken einzuordnen sind. Für eine systematische Auswahl von Modellen, zum Beispiel anhand ihres Zwecks, existiert aktuell keine Unterstützung. Die Auswahl geeigneter Modelle stellt damit in der Praxis einen großen Aufwand dar.

2.2 Vorgehen zur Bildung von Modellen

In diesem Kapitel wird das Vorgehen zur Bildung von Modellen, auch als Modellbildung bezeichnet, betrachtet. Zunächst wird die Bildung von GFZ-Modellen betrachtet. Im Weiteren werden allgemeinere Vorgehen beschrieben. Zudem werden erfolgreiche Vorgehensweisen zur Bildung von Modellen beschrieben.

2.2.1 Bildung von GFZ-Modellen in der Gestaltung

Matthiesen (2021) beschreibt, dass die Bildung von GFZ-Modellen bei der Gestaltung in Zyklen, bestehend aus Analyse und Synthese, stattfindet.

Die Bildung eines quantitativen GFZ-Modells umfasst die Ermittlung der GFZ und die Abbildung in einem geeigneten quantitativen Modell. Mit diesem Modell sollen die Gestaltmerkmale so festgelegt werden können, dass die Funktionserfüllung sichergestellt ist. Welche Modellart dazu verwendet wird, ist abhängig von der Problemstellung. Entsprechend sind für die Betrachtung der quantitativen GFZ-Modellbildung übergeordnete Vorgehen zur Modellbildung, unabhängig vom System oder der Problemstellung, relevant. Dennoch sei erwähnt, dass für bestimmte Systeme und Fragestellungen spezifische Vorgehensweisen und Richtlinien zur Modellbildung existieren. Ein Beispiel dafür ist die VDI 3843 Blatt1:2018-02 zur Modellbildung schwingungsfähiger Systeme. Diese Richtlinie gibt neben einem allgemeinen Vorgehen auch geeignete mathematische Methoden an, die abhängig vom Problem genutzt werden können. Diese sind allerdings limitiert auf die Beschreibung von Schwingungen.

Im Kontext der Bildung von GFZ-Modellen wird häufig das Vorgehen zur Bildung von Contact and Channel Modellen (C&C²-Modelle) beschrieben. C&C²-Modelle sind Teil des C&C²-Ansatzes, der als Denkzeug für die Gestaltung entwickelt wurde (Albers & Matthiesen, 2002). In Weiterentwicklungen des C&C²-Ansatzes wird dessen kombinierte Verwendung mit quantitativen Modellen beschrieben. Thau (2013) beschreibt zum Beispiel die Verknüpfung von C&C²-Modellen mit mathematischen Modellen oder Simulationsmodellen zur Bestimmung der Zusammenhänge. Ein weiteres Beispiel ist die Nutzung von C&C²-Modellen zur qualitativen Identifikation von Parametern für die Optimierung von Simulationsmodellen (Wettstein et al., 2021). Diese Arbeiten fokussieren sich allerdings auf die Bildung oder Nutzung der C&C²-Modelle.

Die VDI2223:2004-01 definiert das methodische Entwerfen technischer Produkte. Diese Richtlinie ist der VDI2221 Blatt1:2019-11 untergeordnet, die den Produktentwicklungsprozess beschreibt. Schwerpunktmäßig wird die Gestaltung dabei den Aktivitäten „Gliedern in Module“, „Gestalten der Module“ und „Integrieren des gesamten Produktes“ aus der VDI 2221 zugeordnet (VDI2223:2004-01). Die Bedeutung von quantitativen Modellen wird darin unter dem Begriff Berechnungsmodell hervorgehoben. Diese werden für Vorausberechnungen oder zum Nachrechnen eingesetzt, also zum Festlegen oder zum Überprüfen der Gestaltmerkmale. Es wird auf eine Vielzahl bestehender Berechnungsmodelle für bekannte Probleme verwiesen. Für diese existieren häufig Softwareumgebungen für die Simulation. Deren Einsatz

erfordert zum Teil die Beratung durch Berechnungsingenieure, die auf die Anwendung von Berechnungsmodellen spezialisiert sind. Für die Bildung von Modellen wird dabei auf die VDI 2211 Blatt 2:2003-03 verwiesen, auf die in Kapitel 2.2.2 eingegangen wird. (VDI2223:2004-01)

Neben den in erster Linie für den deutschsprachigen Raum relevanten VDI-Richtlinien existieren Prozessmodelle, die den Produktentwicklungsprozess und damit auch die Gestaltung abbilden. Systematische Analysen unterschiedlicher Prozessmodelle finden sich unter anderem in (Bobbe et al., 2016; Gericke & Blessing, 2011, 2012; Howard et al., 2008). Howard et al. (2008) identifizieren aus der Analyse unterschiedlicher Prozessmodelle übergeordnete Phasen. Die Gestalt wird in den identifizierten Phasen *conceptual design*, *embodiment design* und *detailed design* vom Konzept bis zur ausdetaillierten Lösung weiterentwickelt. Gericke und Blessing (2012) konnten in einer systematischen Analyse, basierend auf der von Howard et al. (2008), die Phasen für die Definition der Gestalt bestätigen. Bobbe et al. (2016) definieren die Phasen *define*, *design* und *finalise* aus einer Analyse von Prozessmodellen aus der Wissenschaft und der industriellen Praxis. Die Gemeinsamkeit der Beschreibungen ist, dass die Gestalt in diesen Phasen von einer abstrakten Lösung zu einer detaillierten Festlegung der Merkmale konkretisiert wird. Die Gestaltung wird häufig in Phasen unterteilt, die den Prozess vom abstrakten Konzept zur konkreten Umsetzung beschreiben. Die Verwendung von Modellen oder die Bildung von Modellen wird dabei nicht beschrieben.

Obwohl die Bedeutung und der Nutzen von Modellen für die Gestaltung unumstritten sind, wird der Ablauf für deren Bildung in der Gestaltung bisher kaum betrachtet. Dies zeigt sich dadurch, dass die Bildung von Modellen in Prozessmodellen der Gestaltung nicht berücksichtigt wird. Vielmehr wird die Bildung von Modellen als eigenständiger Prozess betrachtet. Es fehlt daher an Erkenntnissen und praktischer Unterstützung zur Bildung von GFZ-Modellen in der Gestaltung.

Zusammenfassend besteht eine Diskrepanz zwischen der Verwendung von Modellen in der Gestaltung und der Betrachtung der Modellbildung in der Gestaltung. Die Bildung von GFZ-Modellen wird in der Literatur als notwendiger Teil der Gestaltung beschrieben, insbesondere die Bildung quantitativer GFZ-Modelle. Eine Beschreibung der Bildung von GFZ-Modellen oder Erkenntnisse aus der Praxis, wie zum Beispiel erfolgreiche Vorgehensweisen, liegen im Kontext der Gestaltung nicht vor. Daher werden nachfolgend Vorgehen zur Bildung von Modellen aus anderen Disziplinen betrachtet.

2.2.2 Allgemeine Vorgehensweisen zur Bildung quantitativer Modelle

Es existiert eine Vielzahl von Modellen und Vorgehensweisen zur Bildung dieser Modelle. Das Vorgehen zur Bildung dieser Modelle wird dabei häufig spezifisch betrachtet. Entsprechend existiert umfassende Literatur zu diesen Modellen und deren Bildung.

Im Bereich der quantitativen Modellbildung werden zwei Arten unterschieden (Isermann, 2008; Schmitt & Andres, 2019; Vajna et al., 2018):

- Theoretische Modellbildung
- Experimentelle Modellbildung / Systemidentifikation

Diese Modellbildungsbegriffe stellen die jeweilige Reinform dar. Theoretische Modellbildung beruht auf der Abbildung durch bekannte physikalische Gesetze. Experimentelle Modellbildung beruht auf in Experimenten erfassten Daten zu definierten Ein- und Ausgangsgrößen. Ein Modell zur Abbildung der Zusammenhänge wird aufgestellt und über die Daten parametrisiert. In der Regelungstechnik wird diese Parametrierung des Modells als Systemidentifikation bezeichnet. Zwischen der rein theoretischen und rein experimentellen Modellbildung bestehen beliebig ausgeprägte Mischformen. Zu beiden Arten der Modellbildung existiert eine große Anzahl an Literatur. Zur allgemeinen mathematischen Modellbildung siehe zum Beispiel (Günther & Velten, 2014). Ljung (2010) gibt einen Überblick über Themen und Techniken der Systemidentifikation.

An dieser Stelle werden exemplarisch vier Vorgehensweisen und deren Schritte zur Modellbildung aus der Literatur betrachtet, siehe Tabelle 2.1. *Balci* beschreibt eine Vorgehensweise zur Durchführung von Simulationsstudien (Balci, 1998). Die Vorgehensweise bezieht sich allgemein auf die Simulation von Systemen. Bei der Vorgehensweise *MoSim* handelt es sich um das Modellierungs- und Simulationsschema von Günther und Velten (2014). Es beschreibt das Vorgehen zur Bildung mathematischer Modelle. Die Vorgehensweise nach *VDI 2206* (VDI 2206:2004-06) beschreibt eine Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Als Teil dieser Entwicklungsmethodik wird ein Vorgehen zur Modellbildung beschrieben (VDI 2206:2004-06). Das hauptsächlich adressierte Ziel dieses Vorgehens ist die Bildung eines domänenübergreifenden Gesamtmodells des Systems. Die Vorgehensweise nach *VDI 2211* (VDI 2211 Blatt 2:2003-03) beschreibt die Erstellung eines Berechnungsmodells zum Nachrechnen oder Auslegen eines Bauteils.

Tabelle 2.1: Exemplarische Vorgehensweisen zur Bildung quantitativer Modelle. In den Zeilen sind die im jeweiligen Vorgehen benannten Schritte aufgeführt.

Balci	MoSim	VDI 2206	VDI 2211
Definition des Problems	Definition	Planen und Klären der Aufgabe	Problemabgrenzung und Problemdefinition
Analyse von Lösungsmöglichkeiten	Systemanalyse	Theoretische Modellbildung / Experimentelle Modellbildung	Konzipieren des Berechnungsmodells
Analyse des Systems	Modellierung	Identifikation	Auswählen der Berechnungsmethode
Formulierung des Modells	Simulation	Verifikation / Validierung	Abbilden der Problemstellung auf das Berechnungsverfahren
Repräsentatives Modell	Validierung		Festlegen der Modellparameter
Programmierung			Dokumentieren des Berechnungsmodells
Versuchsplanung			Modellkontrolle
Versuchsdurchführung			
Neudefinition des Problems			

Alle Vorgehensweisen beginnen mit der *Definition der Problemstellung*. Neben der Klärung des zu lösenden Problems müssen in diesem Schritt auch Randbedingungen geklärt werden. Beispiele für Randbedingungen sind die Modellgüte oder die zu berücksichtigenden Parameter.

Die *Auswahl eines Modells* ist eine weitere Gemeinsamkeit der Vorgehensweisen. Diese ist nur im MoSim-Schema nicht explizit enthalten. In diesem Schritt wird eine geeignete Art der Modellierung gewählt. Dabei sind Aspekte wie die Eignung des Modells, der Modellierungsart oder das erwartete Verhältnis zwischen Kosten und Nutzen zu berücksichtigen.

Die *Umsetzung des Modells* ist der zentrale Schritt aller Vorgehensweisen. Dieser Punkt ist abhängig davon was für ein Modell gebildet wird. In diesem Schritt gibt es zu vielen Modellen und Modellierungsarten sowohl weitreichende Literatur als auch Software zur Unterstützung. Beispiele dafür sind statistische Methoden und deren Umsetzung im Bereich des Machine Learning und etablierte Software für die numerische Strömungsmechanik.

Die Modellbildung endet mit der *Validierung des Modells*. In dieser wird das Ergebnis aus der Modellberechnung, die sogenannte Vorhersage, mit dem Original verglichen. Anhand dieses Vergleichs kann eine Aussage über die Modellgüte und den Gültigkeitsbereich des Modells getroffen werden. Werden die Anforderungen aus der Problemstellung erfüllt, ist die Modellbildung abgeschlossen. Werden sie nicht erfüllt, wird das Modell iterativ verbessert.

Eine Besonderheit des Vorgehens nach Balci ist die Bildung eines *repräsentativen Modells*. In diesem Schritt werden Modelle mit dem Zweck der Kommunikation erstellt.

Die aufgeführten Vorgehensweisen zur Bildung von Modellen bieten allgemeine Beschreibungen der durchzuführenden Schritte. Konkrete Handlungsunterstützungen für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle in der Gestaltung lassen sich daraus nur bedingt ableiten. Häufig wird davon ausgegangen, dass die abzubildenden Effekte bereits bekannt sind und Berechnungsmethoden und Werkzeuge zur Modellierung, zum Beispiel Software, existieren. Die Bildung von quantitativen GFZ-Modellen in der Praxis sollte daher untersucht werden, um Erkenntnisse zu erfolgreichen Vorgehensweisen abzuleiten.

2.2.3 Erfolgsfaktoren der Modellbildung

Praxisnahe Erkenntnisse zur Bildung von Modellen, zum Beispiel zu erfolgreichem Vorgehen, scheinen im Kontext der Gestaltung bislang nicht vorzuliegen. Jedoch existieren im Bereich der Modellbildung und Simulation Beschreibungen worauf bei der Bildung von Modellen zu achten ist. Im Folgend werden Beispiele dazu vorgestellt.

Golomb (1971) beschreibt „*Do's and Don'ts of Mathematical Modeling*“, also wie (*Do's*) und wie nicht (*Don'ts*) bei der mathematischen Modellbildung vorzugehen ist. Für diese Forschungsarbeit relevante *Do's* und *Don'ts* nach Golomb (1971) sind wie folgt:

- Kein Modell ist eine perfekte Abbildung der Realität. Auf einem Modell basierende Schlussfolgerungen müssen mit angebrachtem Argwohn betrachtet werden.
 - Extrapoliere nicht über den Gültigkeitsbereich des Modells.
 - Verwende kein Modell, bevor du nicht die vereinfachenden Annahmen verstanden hast, auf denen es beruht und du deren Anwendbarkeit testen kannst.
- Unterscheide immer zwischen Modell und Realität.
 - Glaube nicht, dass das Modell die Realität ist.
 - Beuge nicht die Realität, damit sie dem Modell entspricht.
 - Beschränke dich nicht auf ein einzelnes Modell. Es kann mehr als ein Modell hilfreich sein, um unterschiedliche Aspekte des gleichen Phänomens zu verstehen.
- Ein Modell muss an veränderte Bedingungen oder neue Daten angepasst werden.
 - Halte nicht an einem diskreditierten Modell fest.
 - Verliebe dich nicht in dein Modell.
 - Verwirf keine Daten, die im Widerspruch mit dem Modell stehen. Benutze diese Daten, um das Modell zu widerlegen, zu modifizieren oder zu verbessern.

Pidd leitet sechs Prinzipien für die Modellierung von Prozessen und Organisationen ab (Pidd, 1999). Die sechs Prinzipien nach Pidd (1999) sind:

- Modelliere einfach, denke kompliziert.
- Sei sparsam. Beginne einfach und füge hinzu.
- Teile und herrsche. Vermeide übergroße Modelle.
- Verwende Metaphern, Analogien und Ähnlichkeiten.
- Verliebe dich nicht in Daten.
- Modellierung kann sich zäh anfühlen.

Pidd (1999) unterlegt diese Prinzipien mit Beispielen und verweist auf weitere Literatur.

Musselman (1998) formuliert Richtlinien für die Bildung von Simulationsmodellen. Beispiele für diese Richtlinien sind:

- Konzentriere dich auf das Problem.
- Beginne einfach.
- Dämme Komplexität ein.

Diese Richtlinien decken sich mit den ersten drei Prinzipien von Pidd (1999). Hieraus lässt sich das Grundprinzip ableiten, dass das einfachste Modell zur Lösung eines Problems das beste Modell ist. Das Finden der richtigen Granularität und deren Beschreibung für ein Modell ist allerdings eine Herausforderung (Maier et al., 2017).

Im Stand der Forschung gibt es unterschiedliche Richtlinien und Grundsätze, was bei der Bildung von Modellen beachtet werden sollte. Es ist anzunehmen, dass diese Grundsätze zumindest teilweise auf die Bildung quantitativer GFZ-Modelle anwendbar sind. Spezifische Aspekte aus dem Kontext der Gestaltung wurden bisher allerdings nicht betrachtet.

2.3 Grundlagen zum Slicing

In dieser Forschungsarbeit soll das Vorgehen zur Bildung quantitativer GFZ-Modelle in der Gestaltung anhand des Beispiels von Sichelmessern untersucht werden. In diesem Kapitel werden daher die Grundlagen des Schnittprozesses mit Sichelmessern in industriellen Aufschnittmaschinen, sogenannten Slicern, erläutert und der Stand der Forschung zur Modellierung dieses Prozesses erläutert. Das Schneiden von Lebensmittelscheiben mit Sichelmessern wird nachfolgend als Slicing bezeichnet.

Viele Lebensmittel werden als Selbstbedienungsware vertrieben. Vor allem Wurst und Käse werden aufgeschnitten und als Portion mit einem definierten Gewicht und einer definierten Anzahl Scheiben abgepackt. Im industriellen Maßstab soll dieser Prozess mit einem möglichst hohen Durchsatz bei möglichst hoher Ausbeute durchgeführt werden.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Grundlagen und der Stand der Forschung zum Slicing dargelegt.

2.3.1 Maschinenaufbau und Prozess

Die Klinge von Sichelmessern ist sichelförmig. Durch diese Form ist eine Schnittbewegung in der Geometrie des Messers integriert. Diese Besonderheit ermöglicht, dass Messer in Slicern um eine stehende Achse rotieren können. Es muss keine zusätzliche Schnittbewegung erzeugt werden. Zusätzlich besteht während eines Teils der Messerumdrehung kein Kontakt zwischen Messer und Lebensmittel. Dies ermöglicht einen kontinuierlichen Vorschub des Lebensmittels. Nachfolgend werden der Aufbau eines Slicers mit Sichelmesser und der Schnittprozess beschrieben.

Abbildung 2.2 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Slicers mit Sichelmesser. Im linken Teil der Abbildung ist eine Frontansicht auf das Sichelmesser dargestellt. Das Sichelmesser dreht mit einer konstanten Geschwindigkeit um das Drehzentrum. Die Lebensmittelstange wird, wie in der Schnittansicht im mittleren Teil der Abbildung eingezeichnet, mit konstantem Vorschub in die Schneidebene gefördert. Mit jeder Umdrehung wird pro Lebensmittel in der Schneidleiste eine Scheibe abgeschnitten. Die Details der Gestalt des Messers können unterschiedlich sein. Bei üblichen Messerformen wird die Klinge durch eine archimedische oder logarithmische Spirale beschrieben. Die Schneidleiste fungiert als Scherkante für den Schnittprozess. Durch sie werden auch die Position und die Anzahl parallel geschnittener Lebensmittelstangen festgelegt. Im in Abbildung 2.2 dargestellten Aufbau werden vier runde Lebensmittel parallel geschnitten. Dies ist vor allem bei Wurstwaren üblich. Die Form der Schneidleiste und die Anzahl parallel geschnittener Lebensmittel hängen vom zu schneidenden Lebensmittel ab. Entsprechend variieren die Dimensionen der Schneidleiste und auch des Messers. Diese können nach Bedarf getauscht werden. Häufig kann der Abstand des Drehzentrums zur Schneidleiste verändert werden. Dies ermöglicht ebenfalls eine Anpassung an die Dimensionen des Lebensmittels.

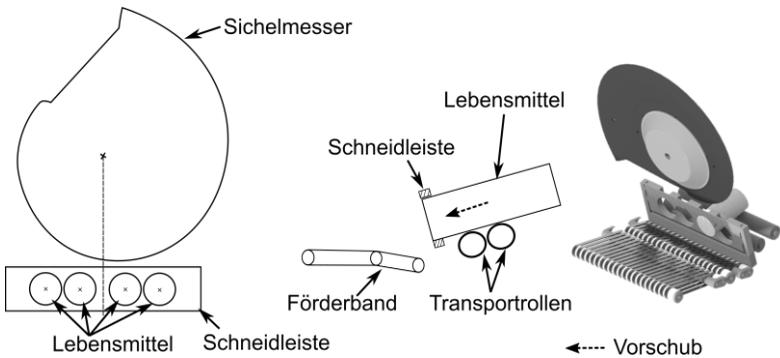


Abbildung 2.2: Prinzipieller Aufbau eines Slicers mit Sichelmesser. Frontalansicht (links), Seitenansicht (mittig) und 3D-Ansicht (rechts). Übersetzt und angepasst nach (Bremer & Matthiesen, 2020, 2021).

Im mittleren Teil von Abbildung 2.2 ist ein Schnitt des Aufbaus dargestellt. Durch die schräge Anordnung von Messer, Schneidleiste und Förderband fallen die Scheiben nach dem Schnitt auf das Förderband. Abhängig von der Form der Portion werden die bereits geschnittenen Scheiben während der verbleibenden Umdrehung des Messers bewegt. Um eine Portion mit versetzt liegenden Scheiben zu erzeugen, werden die bereits geschnittenen Scheiben um einen definierten Abstand bewegt, bevor die nächste Scheibe landet. Dieser Prozess läuft kontinuierlich mit mehreren Lebensmittelstangen gleichzeitig ab. Um die gewünschte Scheibendicke zu erreichen, wird die Vorschubgeschwindigkeit des Lebensmittels auf die Drehzahl des Messers angepasst. Die rechte Seite der Abbildung zeigt zur Veranschaulichung eine vereinfachte 3D-Ansicht des Aufbaus.

Bei den Schnittgeschwindigkeiten wird unterschieden zwischen der Geschwindigkeit tangential und normal zur Messerschneide. Der Anteil tangential zur Messerschneide wird als ziehende Bewegung bezeichnet. Der Anteil normal zur Messerschneide wird als drückende Bewegung bezeichnet. Durch die Überlagerung einer ziehenden und drückenden Bewegung, bezeichnet als ziehender Schnitt, können die Schnittkräfte im Vergleich zu einem ausschließlich drückenden Schnitt reduziert werden (Atkins et al., 2004).

Die Schnittbewegung ist bei Sichelmessern durch die Geometrie gegeben. Dies ermöglicht, wie beschrieben, einen kontinuierlichen Schnittprozess. Durch den zunehmenden Radius der Messerschneide ergibt sich zudem ein ziehender Schnitt. Das

Verhältnis von ziehender Schnittgeschwindigkeit zu drückender Schnittgeschwindigkeit wird als Zug/Druck-Verhältnis bezeichnet. Die Kontur der Messerschneide kann so definiert werden, dass sich das Zug/Druck-Verhältnis über den Verlauf eines Schnittes ändert (Reifenhäuser, 1989).

Abbildung 2.3 zeigt die Phasen eines Schnittes über eine Drehung des Sichelmessers in Frontalansicht (oben) und Schnittansicht (unten). In der Abbildung ist das parallele Schneiden von vier Lebensmitteln dargestellt. Der Schnitt beginnt, wenn das Messer auf eines der Lebensmittel trifft. Die Reihenfolge, in der die Lebensmittel geschnitten werden, ergibt sich aus der Position relativ zum Drehzentrum des Messers. Während das Sichelmesser durch die Lebensmittel bewegt wird, löst sich der bereits abgeschnittene Teil der Scheibe von der Oberfläche des Sichelmessers. Der Schnitt endet, wenn das letzte Lebensmittel vollständig geschnitten wurde und kein Kontakt mehr zwischen den Lebensmitteln beziehungsweise den Scheiben und dem Messer besteht. Die Scheibe fällt nach dem vollständigen Abtrennen auf das Förderband. In der Schnittansicht ist dargestellt, wie die Scheibe durch die Form der Schneide vom restlichen Lebensmittel und dem Sichelmesser weg beschleunigt wird. In Slicern ist die Anordnung zudem zur Horizontalen geneigt. Dadurch werden die Scheiben zusätzlich durch die Schwerkraft beschleunigt. Die Schrägstellung ist in der Abbildung zur Vereinfachung nicht dargestellt. Details zur Geometrie der Schneide werden in Kapitel 2.3.2 beschrieben.

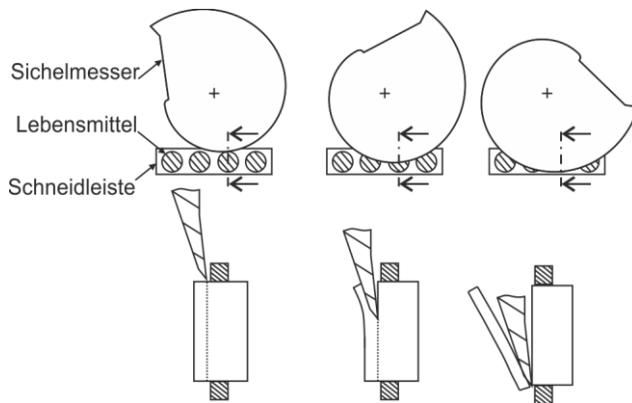


Abbildung 2.3: Skizze der Phasen des Schnittprozesses mit Sichelmessern in Frontalansicht (oben) und Schnittansicht (unten). Nach (Bremer & Matthiesen, 2020).

Die Größe der Sichelmesser ist abhängig von der Baugröße der Maschine. Übliche Radien bei den in dieser Forschungsarbeit untersuchten Sichelmessern liegen in der Größenordnung 200 mm, kleinster Radius der Sichel, und 500 mm, größter Radius der Sichel. Übliche Drehzahlen liegen zwischen 600 U/min und 1600 U/min. Daraus ergibt sich eine Umfangsgeschwindigkeit am größten Radius zwischen 13 m/s und 84 m/s.

2.3.2 Gestalt der Sichelmesser

Neben der Kontur der Schneide sind unter anderen die Oberflächenbeschaffenheit, die Klingenwinkel und der Messerwerkstoff wichtige Parameter der Messergestalt.

Die Wahl des Messerwerkstoffs ergibt sich aus einem Kompromiss zwischen verschiedenen Anforderungen. Anforderungen sind zum Beispiel Gewicht, Schärffähigkeit und Steifigkeit. Neben diesen technischen Anforderungen haben auch ökonomische Anforderungen und Fertigungsmöglichkeiten einen Einfluss auf die Werkstoffwahl. Üblicherweise werden Sichelmesser aus Werkzeugstahl hergestellt. Die Oberflächenbeschaffenheit der Sichelmesser wird meist über Beschichtungen eingestellt, die abhängig vom Lebensmitteltyp gewählt wird. Ziel der Beschichtung ist unter anderem die Reibung zwischen Messer und Lebensmittel zu optimieren. Ein weiteres

Ziel kann der Schutz des Messerwerkstoffs vor Reinigungsmitteln sein. Details zu den Eigenschaften der Beschichtungen sind nicht veröffentlicht.

In dieser Forschungsarbeit wird in erster Linie der Einfluss der geometrischen Parameter von Sichelmessern auf den Schnitt untersucht. Der Messerwerkstoff und die Oberflächenbeschaffenheit werden nicht weiter betrachtet.

Abbildung 2.4 zeigt den Querschnitt von zwei Messerklingen. Dargestellt ist der Querschnitt eines Sichelmessers (links) und eines herkömmlichen Messers mit typisch symmetrischer Klinge (rechts). Herkömmliche Messer mit symmetrischer Klinge sind zum Beispiel Ausbeinmesser oder Rasierklingen (McGorry et al., 2005). Die Schneidkante bei herkömmlichen Messern ist durch einen Schneidenwinkel definiert, der symmetrisch zur Mittelachse des Querschnitts ist. Bei handgeführten Messern wird der Schneidenwinkel auch als Keilwinkel bezeichnet (Stüdemann & Mühler, 1956). Die Klingengeometrie von Sichelmessern wird durch drei Winkel bestimmt, den Klingewinkeln. Diese Klingewinkel beziehen sich auf die Schnittebene des Messers und werden als Druckwinkel, Freiwinkel und Schneidenwinkel bezeichnet. Die Schnittebene ist im Slicer durch die Oberfläche der Schneidleiste gegeben, an der das Sichelmesser vorbeidreht.

Der Zweck des Freiwinkels ist, den Kontakt zwischen Messer und erzeugter Schnittfläche zu reduzieren (Williams, 1998). Der Zweck des Schneidenwinkels ist es die Scheibe vom Lebensmittel wegzudrücken, siehe Abbildung 2.3. Der Druckwinkel bestimmt die mechanische Steifigkeit des Messers, da er einen Großteil des Messerquerschnitts im Bereich der Schneide bestimmt. Durch den asymmetrischen Aufbau des Sichelmessers soll sichergestellt werden, dass nur die Scheibe beim Schnitt deformiert wird. Bei den herkömmlichen Klingen wird das Lebensmittel symmetrisch zur Klinge deformiert. Daraus resultieren auch symmetrisch auf die Klinge wirkenden Schnittkräfte.

Die Klingewinkel werden in der Praxis abhängig vom Lebensmittel gewählt. Abhängig von der Festigkeit, der adhäsiven Eigenschaften und potenziell weiterer Faktoren eines Lebensmittels kann es dazu kommen, dass die Scheibe mit der Oberfläche des Messers im Bereich des Druckwinkels in Kontakt kommt. Dies beeinflusst, wie sich die Scheibe vom Messer löst und damit die Flugphase der Scheibe.

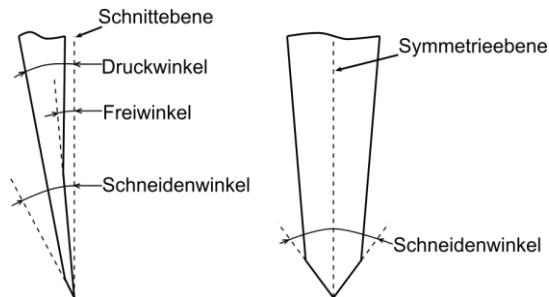


Abbildung 2.4: Querschnitt von zwei Messerklingen. Definition der Klingenwinkel bei Sichelmessern (links) und bei typischen symmetrischen Klingen (rechts). In Anlehnung an (Bremer & Matthiesen, 2020).

Der Schneidenwinkel der Sichelmesser hat einen direkten Einfluss auf die Beschleunigung der Scheibe. Daher gibt es Sichelmesser mit variierendem Schneidenwinkel über den Schnittverlauf (Müller et al., 2014).

Die Schneidkante von Messern kann durch Verzahnungen zusätzlich modifiziert werden. Ist keine Verzahnung vorhanden, wird von einer geschlossenen oder glatten Schneidkante gesprochen. Wird die Schneidkante mit einer Verzahnung versehen, wird dies als offene Schneidkante bezeichnet. Es existieren verschiedene Verzahnungen bei Sichelmessern, zum Beispiel Sägeverzahnungen. Nach welchen Kriterien Verzahnungen bei Sichelmessern ausgewählt werden oder welchen Effekt sie haben, ist nicht bekannt. Üblicherweise werden verzahnte Klingen bei weniger steifen Lebensmitteln eingesetzt, um Deformation zu reduzieren und die Positionierung der Ablage zu verbessern (Kahl et al., 2017). Kahl et al. (2017) schlagen in ihrem Patent eine Verzahnung mit alternierendem Schneidenwinkel bei Zähnen vor. Dadurch soll der Kontakt und damit die zwischen Scheibe und Messer wirkende Adhäsion reduziert werden.

Die Gestaltmerkmale der Sichelmesser werden bisher basierend auf Erfahrungswerten festgelegt. Entsprechend erfolgt die Parametrierung des Prozesses anhand von Erfahrungswerten und Versuchen.

2.3.3 Lebensmittel

Dieser Abschnitt soll einen kurzen Überblick zu Lebensmitteln geben, die mit Slicern verarbeitet werden.

Beispiele, die einen großen Anteil ausmachen, sind Käse, Wurst und Schinken. Weitere Lebensmittel sind frisches Fleisch, Fisch, Bacon und vegetarische Wurst. Der Aufschnitt von Gemüse oder Süßwaren mit Slicern ist unüblich. Die mechanischen Eigenschaften von Lebensmitteln variieren zwischen unterschiedlichen aber auch zwischen gleichen Lebensmitteln, siehe zum Beispiel (Halmos et al., 2003). Das liegt unter anderem an Variationen in der Struktur und dem Einfluss unterschiedlicher Parameter im Herstellungsprozess. Die Gestalt der Sichelmesser muss, zusammen mit Prozessparametern wie der Drehzahl des Messers oder der Lebensmittelperatur, auf die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Lebensmittel angepasst werden. Ohne ein Modell, das beschreibt wie diese Größen die Funktionserfüllung beeinflussen, müssen die Gestalt des Sichelmessers und die Prozessparameter für jedes Lebensmittel einzeln gefunden werden.

2.3.4 Mathematische Beschreibung der Schnittkräfte beim Slicing

Im Stand der Forschung existiert ein mathematisches Modell der Schnittkräfte beim Slicing. Das von Atkins und Xu (2005) vorgeschlagene Modell basiert auf der Annahme, dass beim Schneiden von dünnen, flexiblen Scheiben die Bruchenergie des Lebensmittels und die Schnittgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Sichelmesser- und Lebensmittelgeometrie ausreichend sind, um die Schnittkräfte vorherzusagen. Die Schnittgeschwindigkeiten sind dabei abhängig von der Geometrie des Messers, der Geometrie des Lebensmittels und der Anordnung von Messer und Lebensmittel. Dieses Modell wurde bislang nicht validiert. Im Folgenden werden die Grundlagen der Berechnung dargestellt. Das Berechnungsmodell wird nachfolgend als Schnittkraftmodell nach Atkins und Xu bezeichnet und in Kapitel 6.3 für eine Vorhersage von Schnittkräften am Slicer verwendet. Die hier dargestellten Geometrien und die Anordnung basieren auf dem für diese Forschungsarbeit verwendeten Aufbau.

Abbildung 2.5 zeigt die Anordnung des Sichelmessers zu einem runden Lebensmittel. Dargestellt ist die Frontalansicht auf das Messer, vergleiche Abbildung 2.2. In der Abbildung sind die für die Berechnung relevanten Koordinatensysteme und Variablen eingezeichnet.

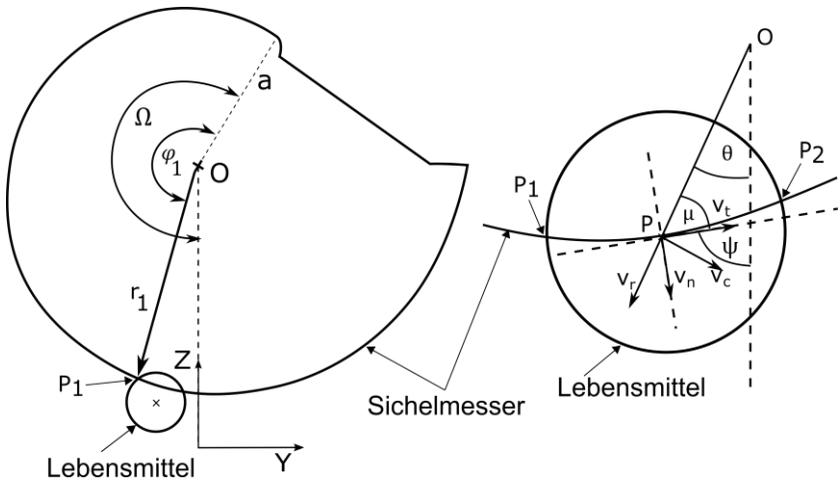


Abbildung 2.5: Anordnung, Koordinatensysteme und Relativgeschwindigkeiten am Sichelmesser zur Berechnung von Schnittkräften. Grundsätzliche Anordnung links, Detailansicht mit Relativgeschwindigkeiten rechts. Übersetzt übernommen aus (Bremer & Matthiesen, 2021).

Das Sichelmesser rotiert mit der Winkelgeschwindigkeit ω um das Drehzentrum O . Die Position des Messers zu einem bestimmten Zeitpunkt wird über den Verdrehwinkel zur Nulllage Ω angegeben. In der Nulllage liegt der kleinste Radius des Sichelmessers in der Z -Achse. Die Kurvengeometrie der Schneide ist mathematisch durch eine Archimedische Spirale definiert. Für diese gilt der Zusammenhang zur Berechnung des Radius $r = a + b \cdot \varphi$. Dabei ist a der Radius am Ursprung der Spirale. Die Zunahme des Radius ist definiert als b . Der Winkel φ ist relativ zum Ursprung der Spirale angegeben. Die Spirale ist mathematisch positiv, gegen den Uhrzeigersinn, definiert. Die Punkte $P_1(r_1, \varphi_1)$ und $P_2(r_2, \varphi_2)$ sind die Schnittpunkte zwischen dem Rand des Lebensmittels und der Klinge. Der Abschnitt der Schneide zwischen P_1 und P_2 ist im Kontakt mit dem Lebensmittel. Die Winkel θ , μ und ψ werden für die Transformation der Schnittgeschwindigkeiten benötigt.

Die Schnittgeschwindigkeit in einem beliebigen Punkt P auf der Messerklinge kann in die Umfangsgeschwindigkeit $v_c = r \omega$ und die Radialgeschwindigkeit $v_r = dr/dt = b \omega$ zerlegt werden. Die Umfangsgeschwindigkeit ist demnach abhängig davon, wo auf der Sichel der Punkt P liegt. Die Radialgeschwindigkeit ist hingegen rein von der Steigung der Sichel abhängig.

Für das Schneiden mit Messerklingen ist das Zug/Druck-Verhältnis ξ definiert. Dieses Verhältnis wird aus der Geschwindigkeit tangential zur Klinge v_t , ziehende Schnittgeschwindigkeit, und der Geschwindigkeit normal zur Klinge v_n , drückende Schnittgeschwindigkeit, berechnet (Atkins et al., 2004). Es gilt $\xi = v_t/v_n$. Die Geschwindigkeiten zur Berechnung des Zug/Druck-Verhältnis werden durch Transformation der Umfangsgeschwindigkeit und der Radialgeschwindigkeit berechnet (Atkins & Xu, 2005). Unter der Annahme, dass keine Reibung vorliegt, können die Schnittkräfte normal F_n und tangential F_t zur Klinge für ein Element ds der Schneide im Kontakt mit dem Lebensmittel wie folgt berechnet werden (Atkins et al., 2004; Atkins & Xu, 2005):

$$dF_n = R \frac{1}{1 + \xi^2} ds \quad 2.1$$

$$dF_t = R \frac{\xi}{1 + \xi^2} ds \quad 2.2$$

R ist die spezifische Bruchenergie des Lebensmittels. Um die Schnittkräfte zu berechnen, werden die Gleichungen 2.1 und 2.2 über die Länge der Schneide im Kontakt mit dem Lebensmittel integriert. Das Element ds der Schneide ist definiert als (Bronštejn & Semendjaev, 2001, S.233 ff):

$$ds = \sqrt{r^2 + \left(\frac{dr}{d\varphi}\right)^2} d\varphi = \sqrt{r^2 + b^2} d\varphi \quad 2.3$$

Die Integrationsgrenzen ergeben sich durch die Schnittpunkte P_1 und P_2 zwischen Klinge und Rand der Lebensmittelgeometrie. Durch Einsetzen von Gleichung 2.3 in Gleichung 2.1 und 2.2 können die Kräfte mit den Winkeln φ_1 und φ_2 als Integrationsgrenzen berechnet werden. Die Schnittpunkte zwischen Lebensmittel und Messer werden durch die mathematische Definition der Konturen im mit drehenden Polarkoordinatensystem des Messers berechnet. Da sich die Orientierung zwischen Messer und Lebensmittel während der Drehung verändert, muss die Berechnung der Kräfte für die Positionen einer Umdrehung des Messers berechnet werden.

Abschließend werden die Schnittkräfte in das kartesische Y-Z Koordinatensystem transformiert. Dieser Schritt erfolgt, da sich die Ausrichtung der normalen und tangentialen Kräfte stetig verändert. Durch die Transformation in ein festes Bezugssystem ist der Vergleich mit entsprechenden Messdaten möglich, sofern diese das gleiche Bezugssystem verwenden.

2.4 Fazit zu Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen und der Stand der Forschung für diese Forschungsarbeit vorgestellt. Aus dem Stand der Forschung wird deutlich, dass die Bildung quantitativer GFZ-Modelle für die Synthese notwendig ist. Das Vorgehen zur Bildung dieser Modelle in der Praxis wird jedoch kaum betrachtet. In Bezug auf die Strukturierung bestehender Modelle, bestehende Vorgehensweisen zur Modellbildung und das Fallbeispiel wurden die nachfolgend zusammengefassten Forschungslücken identifiziert.

Eine Vielzahl an Modellen kann in der Gestaltung eingesetzt werden. Zwar existieren unterschiedliche Systematiken zur Beschreibung von Modellen, aber keine Übersicht über Modelle oder wie diese in die Systematiken einzuordnen sind. Eine Auswahl von Modellen, zum Beispiel anhand ihres Zwecks, ist daher aktuell nicht möglich. Ebenso besteht keine Übersicht an Modellen, die für die Abbildung von GFZ geeignet sind.

Existierende Vorgehen zur Modellbildung beziehen sich auf bestimmte Modelle, bestimmte technische Fragestellungen oder sind allgemein gehalten. Die Bildung quantitativer GFZ-Modelle im Kontext der Gestaltung ist in der Praxis kaum empirisch untersucht worden. Daher fehlen aus der Praxis abgeleitete Erkenntnisse zu erfolgreichen Vorgehensweisen. Entsprechend gibt es wenig konkrete Unterstützung für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle in der Gestaltung.

Das für diese Forschungsarbeit gewählte Fallbeispiel sind Sichelmesser zum Schneiden von Lebensmittelscheiben in industriellen Aufschnittmaschinen, so genannten Slicern. Aus dem Stand der Forschung zu Sichelmessern und Slicern wurde gezeigt, dass bisher nur ein nicht validiertes quantitatives Modell zur Berechnung der Schnittkräfte existiert. Aus dem Stand der Technik ist bekannt, dass Merkmale der Gestalt von Sichelmessern in der Praxis variiert werden, um die Funktionserfüllung zu optimieren. Dies basiert allerdings auf Erfahrungswissen. In Modellen expliziertes Wissen über die wirkenden Effekte und den Zusammenhang mit den Gestaltmerkmalen existieren für Sichelmesser nicht. Demnach sind die GFZ nicht explizit bekannt. Die Untersuchung der GFZ von Sichelmessern ist daher ein geeignetes Fallbeispiel für diese Forschungsarbeit.

3 Motivation und Zielsetzung

Wie im Stand der Forschung gezeigt wird, besteht eine Diskrepanz zwischen der Bedeutung quantitativer GFZ-Modelle für die Gestaltung und verfügbarer Unterstützung zu deren Bildung. Es existiert eine Vielzahl an Modellen, die für unterschiedliche Zwecke in der Gestaltung gebildet werden. Darunter sind Simulationsmodelle, mit denen in der Gestaltung häufig auftretende GFZ abgebildet und analysiert werden können. Dies ist allerdings nur möglich, da die in den Simulationsmodellen bereits ermittelte GFZ abgebildet sind. Ein Beispiel dafür sind Simulationsmodelle zur Berechnung der Festigkeit von Bauteilen. Wenn die GFZ unbekannt sind oder nur implizit als Erfahrungswissen vorliegen, ist die Bildung eines GFZ-Modells notwendig. Die Bildung quantitativer GFZ-Modelle bei der Gestaltung wurde in der Praxis bisher aber kaum untersucht. Daher sind für das Vorgehen zur Bildung von GFZ-Modellen keine Erfolgsfaktoren bekannt.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist zu ermitteln, was erfolgreiches Vorgehen zur Bildung quantitativer GFZ-Modelle in der Gestaltung ausmacht. Die Erkenntnisse sollen als Erfolgsfaktoren formuliert werden. Dazu werden als Fallbeispiel die GFZ von Sichelmessern untersucht und in einem quantitativen GFZ-Modell abgebildet. Das Vorgehen in der Fallstudie wird ausgewertet, um auf Erfolgsfaktoren für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle in der Gestaltung zu schließen. Erfolgsfaktoren beschreiben im Kontext dieser Forschungsarbeit Merkmale erfolgreichen Vorgehens. Diese sollten bei der Planung und Durchführung von Projekten berücksichtigt werden.

Für die Gestaltung von Sichelmessern ist es entscheidend, die Gestalt des Sichelmessers auf die Eigenschaften des zu schneidenden Lebensmittels anzupassen. Ziel ist dabei die Maximierung der Drehzahl unter Einhaltung der Anforderungen an die Qualität der Scheiben und Portionen. Die Gestalt und die Prozessparameter wurden bisher iterativ basierend auf Erfahrungswerten festgelegt. Da eine Vielzahl unterschiedlicher Lebensmittel mit wechselnden mechanischen Eigenschaften mit Slicern verarbeitet wird, ist die Abhängigkeit von Erfahrung und das iterative Vorgehen ein Risiko für hohe Kosten und häufige Iterationsschleifen. Um dieses Risiko zu reduzieren ist die Ermittlung quantitativer GFZ notwendig. Damit kann die Qualität der Funktionserfüllung wissenschaftlich sichergestellt und verbessert werden. Zudem wird dadurch Wissen für die Synthese alternativer Messergestalten aufgebaut. Daraus motiviert sich der Bedarf eines quantitativen GFZ-Modelles für die Gestaltung von Sichelmessern.

4 Forschungsdesign

In diesem Kapitel wird das Forschungsdesign bestehend aus Forschungsfragen und dem Vorgehen zu deren Beantwortung beschrieben. Um erfolgreiches Vorgehen für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle zu untersuchen und Erfolgsfaktoren dafür abzuleiten, werden drei Forschungsfragen bearbeitet.

Die Forschungsfragen lauten:

Forschungsfrage 1:

Welche Produktmodelle können in der Gestaltung zur Abbildung von GFZ eingesetzt werden?

Forschungsfrage 2:

Welche Zusammenhänge müssen in einem quantitativen GFZ-Modell von Sichelmessern berücksichtigt werden?

Teilforschungsfrage 2.1:

Welche zum Schneiden von Lebensmitteln bekannten Zusammenhänge sind für das Slicing relevant?

Teilforschungsfrage 2.2:

Hat die Drehzahl des Sichelmessers einen Einfluss auf die Schnittkräfte beim Slicen von Brühwurst und Kochschinken?

Forschungsfrage 3:

Welche Erfolgsfaktoren für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle folgen aus der Untersuchung der Zusammenhänge beim Slicing?

Abbildung 4.1 zeigt das Vorgehen zur Erreichung der Zielstellung und die Zusammenhänge zwischen den Forschungsfragen und der Fallstudie.

Die Forschungsfrage 1 adressiert das aus dem Stand der Forschung identifizierte Fehlen einer strukturierten Übersicht von Modellen in der Gestaltung. Hier wird die Betrachtung auf Produktmodelle eingeschränkt, da diese die Gestalt abbilden. Durch die Beantwortung der Forschungsfrage 1 wird eingegrenzt, welche Produktmodelle für die Abbildung von GFZ in der Gestaltung eingesetzt werden können. Dazu wird zunächst allgemein betrachtet, welche Produktmodelle in der Gestaltung eingesetzt werden. Diese Produktmodelle werden anhand einer systematischen Literaturrecherche ermittelt. Aufbauend auf bekannten Systematiken zur Kategorisierung von Produktmodellen wird ein Framework zur Strukturierung der Produktmodelle erarbeitet. Dieses Framework wird im Folgenden als Produktmodell Framework (PMF) bezeichnet. Die ermittelten Produktmodelle werden in das PMF eingeordnet. Dazu werden die Eigenschaften der Produktmodelle, der Zweck und

die Phase der Gestaltung, in der sie eingesetzt werden, betrachtet. Zur Beantwortung der Forschungsfrage 1 wird das PMF eingegrenzt. Das Ergebnis ist eine Auswahl an Produktmodellen aus dem PMF, die für die Abbildung von GFZ geeignet sind. Diese Auswahl wird in Forschungsfrage 2 verwendet, um die Auswahl von Modellen für die Abbildung der GFZ bei Slicern zu unterstützen.

In Forschungsfrage 2 werden die GFZ von Sichelmessern als Teil eines bilateralen Industrieprojekts untersucht. Die ermittelten GFZ sollen in einem quantitativen GFZ-Modell abgebildet werden. Das Vorgehen zur Bildung des Modells wird aus den im Stand der Forschung gezeigten allgemeinen Vorgehensweisen zur Bildung von Modellen abgeleitet, siehe Kapitel 2.2.2. Als Teil des Vorgehens werden die Teilforschungsfragen 2.1 und 2.2 beantwortet.

Im Rahmen von Teilforschungsfrage 2.1 werden bekannte Zusammenhänge zu Schnittprozessen identifiziert. Zur Beantwortung wird der Stand der Forschung zum Schneiden von Lebensmitteln betrachtet. Für das Slicing relevante Zusammenhänge werden genutzt, um Fragestellungen zu den GFZ von Sichelmessern für die experimentelle Untersuchung zu priorisieren.

Basierend auf dem Ergebnis von Teilforschungsfrage 2.1 wird in Teilforschungsfrage 2.2 der Einfluss der Drehzahl des Sichelmessers auf die Schnittkräfte beim Schneiden von Brühwurst und Kochschinken untersucht. Als Teil dieser Teilforschungsfrage wird das Schnittkraftmodell nach Atkins und Xu, siehe Kapitel 2.3.4, validiert. Dazu werden in einem mit Messtechnik ausgestatteten Slicer Schneidversuche durchgeführt und die Schnittkräfte gemessen. Zur Unterstützung der Interpretation der Messdaten werden Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen des Schnittes aufgenommen.

Das Ergebnis der Forschungsfrage 2 sind die ermittelten Zusammenhänge zu den GFZ von Sichelmessern.

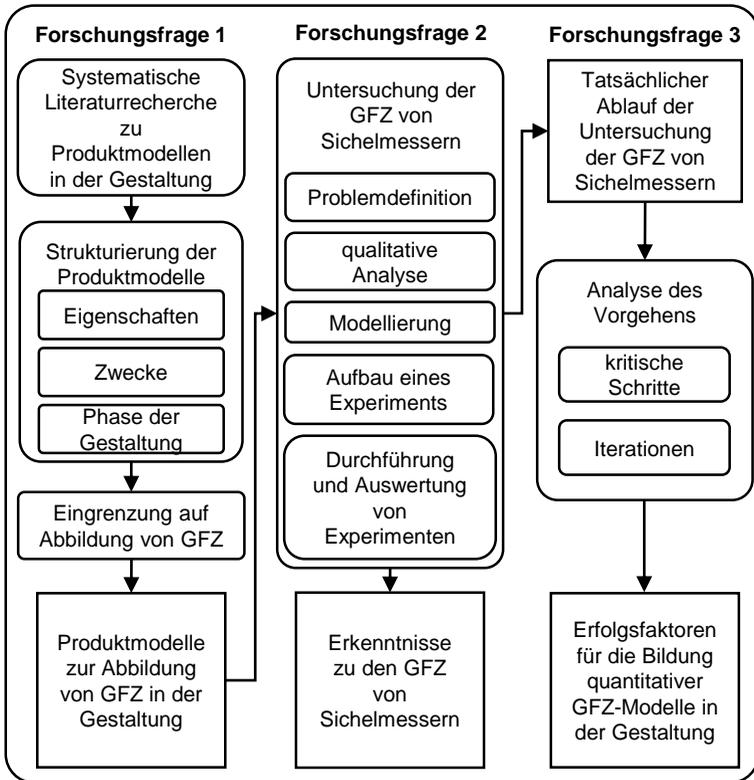


Abbildung 4.1: Struktur des Vorgehens zum Erreichen der Zielsetzung. Ansätze in abgerundeten Kästen. Ergebnisse in eckigen Kästen.

Die Forschungsfrage 3 wird beantwortet, indem kritische Schritte und Iterationen, die bei der Beantwortung der Forschungsfrage 2 aufgetreten sind, analysiert werden. Um die kritischen Schritte und Iterationen zu identifizieren, wird der tatsächliche Ablauf der Untersuchung retrospektiv betrachtet. Hieraus werden argumentativ die Erfolgsfaktoren für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle abgeleitet und diskutiert.

5 Produktmodelle für die Abbildung von GFZ

Es existiert eine Vielzahl an Produktmodellen die zur Abbildung von GFZ gebildet werden können. Wie im Stand der Forschung gezeigt, existieren unterschiedliche Systematiken die zur Kategorisierung von Produktmodellen angewandt werden können. Es gibt aber keine Übersicht der Produktmodelle und wie diese in die Systematiken einzuordnen sind. Daher wird die Auswahl von Produktmodellen wenig unterstützt.

In diesem Kapitel wird daher die *Forschungsfrage 1* bearbeitet:

Welche Produktmodelle können in der Gestaltung zur Abbildung von GFZ eingesetzt werden?

Durch die Beantwortung der Forschungsfrage soll eine strukturierte Übersicht über Produktmodelle erarbeitet werden, die zur Abbildung von GFZ eingesetzt werden können. Wie in Kapitel 2.1.1 allgemein für den Begriff Modell beschrieben, muss auch bei dem Begriff Produktmodell unterschieden werden, ob ein als Abbild eines Produktes gebildetes Produktmodell oder eine Art Produktmodell gemeint ist. Wobei die Art eines Produktmodells beschreibt, welche Aspekte des Produkts im Produktmodell abgebildet werden und wie das Produktmodell zu bilden ist. Die hier durchgeführte Betrachtung bezieht sich mit dem Begriff Produktmodell auf Arten von Produktmodellen. Beispiele für Produktmodelle sind Skizzen, Prototypen oder CAD-Modelle.

Mit einer systematischen Literaturrecherche werden zunächst in der Gestaltung eingesetzte Produktmodelle identifiziert. Dazu wird ein Framework zur Strukturierung der Produktmodelle erarbeitet, dieses wird nachfolgend als Produktmodell Framework (PMF) bezeichnet. Die Produktmodelle werden anhand ihrer Eigenschaften charakterisiert und anschließend in das PMF eingeordnet. Dazu werden der Zweck und die Phase der Gestaltung, in der das jeweilige Produktmodell eingesetzt wird, für jedes der Produktmodelle bewertet.

Auf Grundlage des PMF werden die Produktmodelle identifiziert, die für die Abbildung von GFZ geeignet sind.

Die systematische Literaturrecherche und das PMF wurden im Kontext dieser Forschungsarbeit erarbeitet und als Teil der folgenden Veröffentlichung veröffentlicht:

- *„Product models in embodiment design: an investigation of challenges and opportunities“ (Matthiesen et al., 2019)*

Teile der Kapitel 5.1 bis 5.3 sind ohne Veränderung in übersetzter Form aus der Veröffentlichung übernommen. Sie werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet. Die systematische Literaturrecherche wurde 2018 durchgeführt.

5.1 Vorgehen zur systematischen Literaturrecherche

Das Vorgehen für die systematische Literaturrecherche ist an das von Dresch et al. (2015) beschriebene Vorgehen angelehnt. Es besteht aus fünf Schritten: (1) Forschungsfrage und Herangehensweise, (2) Strategie, (3) Recherche und (4,5) Auswahl. Das Ergebnis der systematischen Literaturrecherche ist eine Tabelle mit Produktmodellen.

In Schritt (1) werden Forschungsfrage und Herangehensweise formuliert. Als Forschungsfrage wurde „Welche Produktmodelle werden in der Gestaltung eingesetzt?“ verwendet. Die Herangehensweise ist die Identifikation von Produktmodellen durch eine Literaturrecherche und deren Strukturierung anhand bestimmter Eigenschaften.

In Schritt (2) wird die Strategie für die systematische Literaturrecherche definiert. Die Suchbegriffe und Plattformen werden in diesem Schritt festgelegt. Für die verwendete Suche wird das Verständnis von Gestaltung nach Matthiesen (2021) zugrunde gelegt. Die Literaturrecherche wurde auf Englisch durchgeführt. Die originalen Suchbegriffe und ihre Übersetzung sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Tabelle 5.1: Suchbegriffe und deren Übersetzung für die systematische Literaturrecherche zu Produktmodellen.

Suchbegriff	Übersetzung
Embodiment design	Gestaltung
Product model	Produktmodell
Embodiment function relation	Gestalt-Funktion-Zusammenhang
Function model*	Funktionsmodell
System* modeling	Systemmodellierung
Embodiment design AND model	Gestaltung UND Modell
Embodiment design AND analysis	Gestaltung UND Analyse
Embodiment design AND synthesis	Gestaltung UND Synthese

Die Suchbegriffe wurden sowohl in offenen Datenbanken als auch in Datenbanken mit begrenztem Zugriff verwendet. Zugang auf die Datenbanken mit begrenztem Zugriff erfolgte über die KIT Bibliothek. Die verwendeten Datenbanken waren:

- Researchgate
- Scopus
- TEMA
- IEEE
- ASME digital collection
- Web of Science

In Schritt (3) wurde die Recherche wie in Schritt (2) definiert durchgeführt. In zwei weiteren Schritten, Schritt (4) und Schritt (5), wurden die für die Auswertung relevanten Veröffentlichungen ausgewählt. In Schritt (4) wurde über Suchkriterien in den Suchmaschinen die Veröffentlichungen weiter eingegrenzt. Die Suchkriterien sind:

- Veröffentlichung nach 2008
- Veröffentlichung im Bereich Produktentwicklung (design engineering)

Es wurden nur Veröffentlichungen nach 2008 einbezogen, um die Aktualität der Produktmodelle sicherzustellen. Zum Zeitpunkt der Recherche sollten die Veröffentlichungen nicht älter als 10 Jahre sein. Zudem wurden nur Veröffentlichung im Bereich Produktentwicklung einbezogen, um den Bezug zur Gestaltung sicherzustellen. Durch die Suche mit englischen Stichworten wurde eine Einschränkung auf englischsprachige Veröffentlichungen getroffen. Dadurch ist die internationale Relevanz der betrachteten Produktmodelle sichergestellt.

In Schritt (5) wurden die Inhalte der Veröffentlichungen bewertet. Dazu wurden zunächst Titel und Kurzfassung der Veröffentlichungen gelesen. Für die weitere Betrachtung musste eine Veröffentlichung die folgenden Kriterien erfüllen:

- Erwähnung eines Produktmodells oder Modellbildungsprozesses in Titel oder Kurzfassung
- Die Inhalte deuten auf den Kontext Produktentwicklung hin

Die nach dieser Auswahl verbleibenden Veröffentlichungen wurden auf Grundlage des Volltextes ausgewertet. Ziel der Auswertung war die Erstellung einer Liste der Produktmodelle. Die Entscheidung, ob ein Produktmodell für die Auswertung übernommen wurde, basierte auf folgenden Kriterien:

- Das beschriebene Modell ist ein Produktmodell
- Es wird beschrieben, wie das Produkt im Modell abgebildet und was für Informationen das Modell enthält
- Die Veröffentlichung wurde in einer Zeitschrift oder Konferenz mit peer-review Qualitätssicherung veröffentlicht

Die aus dieser Auswahl verbliebenen Produktmodelle wurden für die Einordnung im PMF berücksichtigt.

5.2 Vorgehen zur Strukturierung der Produktmodelle in der Gestaltung

Zur Strukturierung der Produktmodelle wurden zwei Schritte durchgeführt. Im ersten Schritt wurden die Produktmodelle bezüglich Art der Abbildung und Art der enthaltenen Informationen kategorisiert. Im zweiten Schritt wurden die Produktmodelle zur Einordnung in das PMF einem Zweck und einer Phase der Gestaltung zugeordnet. Daraus ergibt sich der Bereich des Frameworks, dem ein Produktmodell zuzuordnen ist. Die Ergebnisse aus beiden Schritten wurden in einer Tabelle zusammengeführt. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 5.1 zusammenfassend dargestellt.

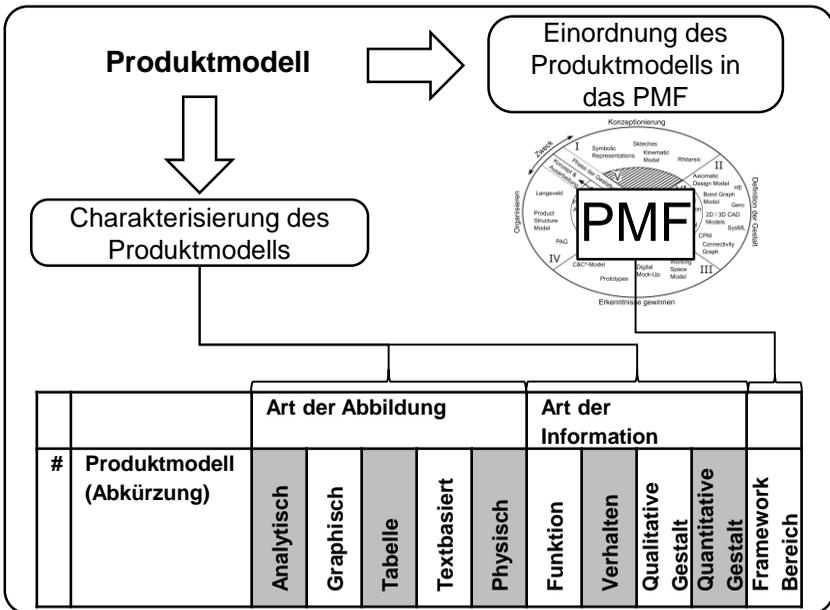


Abbildung 5.1: Vorgehen zur Strukturierung der in der Gestaltung eingesetzten Produktmodelle. Die Einordnung der Produktmodelle in das Produktmodell Framework (PMF) erfolgt anhand des Zwecks und der Phase der Gestaltung.

Für die Kategorisierung nach Art der Abbildung im ersten Schritt der Strukturierung wurde zwischen den folgenden Abbildungsarten nach Weidmann et al. (2017) unterschieden:

- Analytisch
- Graphisch
- Tabelle oder Matrix
- Textbeschreibung
- Physische Nachbildung

Analytische Abbildung bezeichnet die Abbildung durch mathematische Gleichungen oder einer Implementierung als Programmcode. *Graphische Abbildung* umfasst originalgetreue visuelle Abbildungen ebenso wie vereinfachte Skizzen und Symbole. *Tabelle oder Matrix Abbildungen* umfasst eine Abbildung durch Kategorien zur Strukturierung des Modells. Dabei muss sowohl die Art der Struktur als auch das Vorgehen zum Füllen der Struktur, zum Beispiel durch ein Vorgehen zur Analyse, für das Produktmodell beschrieben sein. *Textbeschreibungen* als Abbildungsart umfasst jegliche rein textbasierte Beschreibung. *Physische Nachbildung* umfasst physische Modelle, zum Beispiel Prototypen.

Für die Kategorisierung nach Art der Informationen werden die folgenden Informationsarten unterschieden:

- Funktion nach Weidmann et al. (2017),
- Verhalten nach Weidmann et al. (2017),
- Qualitative Gestalt nach Matthiesen (2021),
- Quantitative Gestalt nach Matthiesen (2021).

Durch die unterschiedliche Sichtweise auf die Produktmodelle als bei Weidmann et al. (2017) sind für die Art der Information in diese Forschungsarbeit nur Funktion und Verhalten übernommen worden, da Funktion und Verhalten eine große Bedeutung für die Gestaltung haben. Diese Kategorien wurden um die Unterscheidung zwischen qualitativer und quantitativer Gestalt nach Matthiesen (2021) ergänzt. Diese Unterscheidung ist in Bezug auf die spätere Einordnung im PMF von Bedeutung.

Funktion umfasst Informationen bezüglich des Zwecks des Produkts. Nicht alle Funktionen eines Produkts müssen mit der Gestalt des Produkts zusammenhängen. Für die Gestaltung kann es notwendig sein, eine Funktion als ein gewünschtes Verhalten auszudrücken. Dies entspricht der Verwendung von Funktion im Kontext der Function-Behaviour-Structure (FBS) Ontologie (Gero & Kannengiesser, 2004,

2014). Verhalten umfasst Informationen über ein beobachtetes oder vorhergesagtes Systemverhalten. Es ist abhängig von der Gestalt des Produkts und wird meist durch Messgrößen beschrieben, anhand derer die Qualität der Funktionserfüllung bestimmt werden kann. Die Qualität der Funktionserfüllung ist hier ein Maß dafür wie sehr das beobachtete Verhalten dem, aus der definierten Funktion abgeleiteten, gewünschten Verhalten entspricht. Die Unterscheidung zwischen qualitativen und quantitativen Informationen zur Gestalt ist wichtig für die Einordnung in die Phasen der Gestaltung. Die benötigten und vorliegenden Informationen unterscheiden sich in den verschiedenen Phasen der Gestaltung. Dabei findet eine Konkretisierung von qualitativ zu quantitativ statt, siehe zum Beispiel (Bobbe et al., 2016). Dies ist für die zweite Stufe der Strukturierung, die Einordnung in das PMF, relevant.

Für die Kategorisierung wird jeweils entschieden, welche der Kategorien aus Art der Abbildung und Art der Information für ein Produktmodell zutreffen. Dieses Vorgehen ist angelehnt an Weidmann et al. (2017), da dort eine ähnliche Fragestellung untersucht wird.

In der zweiten Stufe der Strukturierung wird das PMF aufgebaut. Dieses Framework beruht auf einer Strukturierung von Prozessmodellen für Gestaltungs- und Entwicklungsprozesse von Wynn und Clarkson (2018). Das Framework von Wynn und Clarkson unterscheidet Prozessmodelle der Produktentwicklung nach ihrem Einsatzzweck und Detaillierungsgrad. Dieses Konzept wird auf die Produktmodelle in der Gestaltung übertragen. Das Framework ist eine graphische Darstellung in Quadranten mit einer Zuordnung der Modelle in Abhängigkeit von zwei Dimensionen. Diese Dimensionen sind die Phase des Gestaltungsprozesses und der Zweck.

Die erste Dimension ist die Phase des Gestaltungsprozesses, in dem das Produktmodell vorwiegend eingesetzt wird. Diese Dimension ist angelehnt an die Entwicklungsphasen nach Weidmann et al. (2017), im ursprünglichen Wortlaut *engineering phase*. Es wird zwischen der Konzeptphase (concept) und der Ausarbeitungsphase (design) unterschieden. In der Konzeptphase werden Ideen zur Produktgestalt erarbeitet. Eine vollständig parametrisierte Gestalt liegt in dieser Phase nicht vor. In der Ausarbeitungsphase wird davon ausgegangen, dass ein parametrisiertes Produkt vorliegt oder erstellt wird. Die beiden Phasen gehen meist fließend ineinander über. Produktmodelle aus der Konzeptphase können auch in der Ausarbeitungsphase verwendet werden. Produktmodelle, die quantitative Informationen benötigen, können hingegen nur in der Ausarbeitungsphase verwendet werden. Daher wird die Dimension *Phase des Gestaltungsprozess* entsprechend zu Weidmann et al. (2017) in *Konzept- und Ausarbeitungsphase* und *Ausarbeitungsphase* unterteilt.

Die zweite Dimension ist der Zweck des Modells. Hierfür wurden die Modellzwecke nach Andreasen et al. (2015) verwendet, siehe Kapitel 2.1.1. Für die Strukturierung der Produktmodelle im Framework wurde der Modellzweck Kommunikation nicht verwendet, da dieser nicht hinreichend genau spezifiziert ist. Da alle Produktmodelle eine Abbildung des Produkts enthalten und somit genutzt werden können, um Kommunikation zu unterstützen, bietet dieser keinen Mehrwert zur Unterscheidung im PMF.

Um die Produktmodelle aus der systematischen Literaturrecherche den Dimensionen des PMF zuzuweisen, wurde zunächst die Phase der Gestaltung durch die Beantwortung zweier Fragen festgelegt:

- Benötigt das Produktmodell quantitative Informationen zu Gestaltungsmerkmalen und -eigenschaften?
 - Ja = Ausarbeitungsphase
 - Nein = Konzept- und Ausarbeitungsphase
- Wird eine vollständig definiertes Produkt benötigt, um das Produktmodell durch Analyse des Originals zu erstellen?
 - Ja = Ausarbeitungsphase
 - Nein = Konzept- und Ausarbeitungsphase

Wurde eine der beiden Fragen mit Ja beantwortet, erfolgte die Zuordnung zur Ausarbeitungsphase. Es wurde davon ausgegangen, dass das Produktmodell in diesem Fall nicht in der Konzeptphase eingesetzt werden kann.

Nach der Zuordnung zur Phase der Gestaltung wurde der Modellzweck zugeordnet. Dies erfolgte ebenfalls anhand von je zwei Leitfragen pro Modellzweck. War eine Zuordnung nicht eindeutig möglich, erfolgte eine Priorisierung durch eine Diskussion mit an GFZ-Modellbildung forschenden Personen des Instituts für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie. Dabei wurde der vorrangige Modellzweck definiert, um das Produktmodell im Framework einzuordnen. Die Fragen sind in Tabelle 5.2 aufgeführt.

Aus der Strukturierung entstanden zwei Ergebnisse. Zum einen eine Tabelle der Produktmodelle mit der Einordnung in die Kategorien, siehe Tabelle 5.3. Zum anderen eine graphische Darstellung des PMF in dem die Namen der Produktmodelle eingeordnet sind, siehe Abbildung 5.2.

Tabelle 5.2: Leitfragen zur Einordnung von Produktmodellen in die Dimension Modellzweck des Produktmodell Frameworks (PMF).

Modellzweck	Fragen
Konzeptionierung	Kann das Produktmodell für die Synthese genutzt werden? Kann das Produktmodell für die Ideengenerierung genutzt werden?
Definition des Produkts	Kann das Produktmodell genutzt werden, um die Anforderungen an das Produkt abzubilden? Wird das Produkt im Produktmodell spezifiziert?
Erkenntnisse gewinnen	Kann das Produktmodell eingesetzt werden, um Wissen über die Zusammenhänge zwischen Gestalt und Verhalten oder Funktion zu erlangen? Kann das Produktmodell zur Produktvalidierung verwendet werden?
Organisieren	Kann das Produkt mit dem Produktmodell in Teilsysteme strukturiert werden? Kann das Produktmodell eingesetzt werden, um Entwicklungsaufgaben zu organisieren?

5.3 Ergebnisse der Literaturrecherche und Strukturierung der Produktmodelle

5.3.1 Kategorisierung der Produktmodelle

In der systematischen Literaturrecherche ergab die Suche in Schritt (3) zunächst 1093 Veröffentlichungen. Nach Durchführung der Auswahlsschritte verblieben 48 Veröffentlichungen in denen 34 Produktmodelle identifiziert wurden. Jedes der Produktmodelle wurde anhand der Beschreibung in der jeweiligen Veröffentlichung entsprechend des in Kapitel 5.2 beschriebenen Vorgehens bewertet.

In Tabelle 5.3 sind die Produktmodelle alphabetisch aufgeführt. Modelle die keinen Eigennamen haben werden als *Modell nach [Autor]* aufgeführt. Für jedes Produktmodell ist mit einem Kreuz angegeben, wenn eine der Kategorien zutrifft. In der Spalte *Framework Bereich* wird für jedes Produktmodell angegeben, in welchen der acht Bereiche des PMF es eingeordnet wurde. Diese Zuordnung soll dem leichten

Nachvollziehen zwischen der Einordnung in das PMF und der Kategorisierung dienen.

Bei der Art der Abbildung liegt der Schwerpunkt auf graphischer Abbildung. 28 von 34 Produktmodellen beinhalten eine graphische Darstellung des Produkts als Art der Abbildung. Diese ist teilweise ergänzt um eine analytische (8 von 28) oder Tabelle/Matrix (7 von 28) Abbildung. Nur ein Produktmodell, Prototyp, fällt in die Kategorie physische Abbildung. Die Produktmodelle nach Gero (#17) verwenden eine textbasierte Beschreibung als Art der Abbildung, zusätzlich zu einer graphischen und einer Tabelle/Matrix Abbildung.

Bei der Art der Information gibt es keine zahlenmäßigen Schwerpunkte oder andere Auffälligkeiten.

Tabelle 5.3: In der systematischen Literaturrecherche ermittelte Produktmodelle in der Gestaltung. Kategorisierung nach Art der Abbildung und Art der Information. Die Quellen aus der Literaturrecherche, denen die Produktmodelle entnommen wurden, sind als Fußnoten angegeben. Sofern eine Ursprungsquelle eines Produktmodells gefunden wurde, ist diese mit angegeben.

#	Produktmodell (Abkürzung)	Art der Abbildung				Art der Information				Framework Bereich
		Analytisch	Graphisch	Tabelle	Textbasiert	Physisch	Funktion	Verhalten	Qualitative Gestalt	
1	2-D / 3-D CAD Model ¹		x						x	II
2	Axiomatic Design Model ²	x		x			x		x	II
3	Behavioral Matrix ³	x		x			x		x	VI
4	Bond Graph Model ⁴		x	x			x	x		II
5	Contact and Channel Model (C&C ² -Model) ⁵		x				x	x		III
6	Connectivity Graph ⁶		x	x				x		II
7	Characteristics Properties Model (CPM) ⁷		x	x				x	x	II
8	Design Structure Matrix (DSM) ⁸			x			x	x	x	VI

¹ Atherton et al. (2018); Dantan et al. (2013); Eifler und Howard (2018)

² Leu et al. (2009); Ursprungsquelle: Suh (1990)

³ Cao und Fu (2011)

⁴ Muenzer und Shea (2017); Ursprungsquelle: Paynter (1961)

⁵ Albers et al. (2009); Boersting et al. (2008); Freund et al. (2015); Ursprungsquelle: Albers und Matthiesen (2002)

⁶ Ameri et al. (2008)

⁷ Weber (2014); Ursprungsquelle: Weber (2005)

⁸ Bonev et al. (2015); Browning (2016); Eppinger und Browning (2012); Ursprungsquelle: Steward (1981)

#	Produktmodell (Abkürzung)	Art der Abbildung					Art der Information				Framework Bereich
		Analytisch	Graphisch	Tabelle	Textbasiert	Physisch	Funktion	Verhalten	Qualitative Gestalt	Quantitative Gestalt	
9	Digital Mock-Up ⁹	x	x					x		x	III
10	Finite Element Method Simulation Model (FEM) ¹⁰	x	x					x		x	VII
11	Function Structure ¹¹		x				x				VI
12	Function Trees ¹²		x				x				VI
13	Integrated Function Model (IF Model) ¹³		x	x			x	x	x	x	VIII
14	Kinematic Model ¹⁴	x	x					x		x	I
15	Model of Langeveld (Langeveld) ¹⁵		x				x		x		IV
16	Modell nach He (He) ¹⁶		x				x		x		II
17	Modell nach Gero (Gero) ¹⁷		x	x	x		x	x	x		II
18	Multibody Simulation (MBS) ¹⁸	x	x					x		x	VII
19	Node Link Diagram (NLD) ¹⁹		x						x		VI

⁹ Danjou et al. (2008); Riascos et al. (2015)

¹⁰ Danjou et al. (2008); Eifler und Howard (2018); Rajaguru et al. (2010)

¹¹ Ameri et al. (2008); Chakrabarti et al. (2011)

¹² Nagel et al. (2008)

¹³ Gericke und Eisenbart (2017); Ursprungsquelle: Eisenbart et al. (2013)

¹⁴ Gao et al. (2015)

¹⁵ Langeveld (2011)

¹⁶ He et al. (2013, 2015); He und Huang (2016)

¹⁷ Goel et al. (2012); Gu et al. (2012); Mokhtarian et al. (2017)

¹⁸ Danjou et al. (2008)

¹⁹ Bonev et al. (2015)

#	Produktmodell (Abkürzung)	Art der Abbildung				Art der Information				Framework Bereich	
		Analytisch	Graphisch	Tabelle	Textbasiert	Physisch	Funktion	Verhalten	Qualitative Gestalt		Quantitative Gestalt
20	Noise Vibration Harshness (NVH) Model ²⁰	x	x					x		x	VII
21	Parametric Associativity Graph (PAG) ²¹		x						x	x	IV
22	Product Architecture ²²			x			x		x		VIII
23	Multi-view Product Model (MVP Model) ²³		x						x		VIII
24	Product Structure Model ²⁴		x	x			x			x	IV
25	Prototype ²⁵					x		x	x	x	III
26	Pseudo Rigid Body Model (PRBM) ²⁶	x	x					x		x	VII
27	Remanufacturability Model (RM) ²⁷	x	x							x	VII
28	Model nach Rihtaršič (Rihtaršič) ²⁸		x					x	x		I
29	State Action Parts Phenomenon Input Organ Effect (SAP-PhIRE) ²⁹			x			x	x	x		VI

²⁰ Danjou et al. (2008)

²¹ Ameri et al. (2008)

²² Feldhusen et al. (2013)

²³ Rasoulifar et al. (2012)

²⁴ Baxter et al. (2008)

²⁵ Andreasen et al. (2015)

²⁶ Berselli et al. (2016); Bilancia et al. (2017); He et al. (2012)

²⁷ Fang et al. (2014)

²⁸ Rihtaršič et al. (2012)

²⁹ Sarkar et al. (2017)

#	Produktmodell (Abkürzung)	Art der Abbildung					Art der Information				Framework Bereich
		Analytisch	Graphisch	Tabelle	Textbasiert	Physisch	Funktion	Verhalten	Qualitative Gestalt	Quantitative Gestalt	
30	Sketches ³⁰		x				x	x	x		I
31	Statistical Model ³¹	x	x					x		x	VII
32	Symbolic Representations ³²		x				x	x	x		I
33	Systems Modeling Language (SysML) Model ³³		x	x			x	x	x		II
34	Working Space Model ³⁴		x				x	x	x		III

³⁰ Andreasen et al. (2015)

³¹ Künne und Wieczorek (2010)

³² Andreasen et al. (2015)

³³ Chakrabarti et al. (2011); Eisenbart et al. (2017); Gadeyne et al. (2014); Rasoulifar et al. (2012); Wölkl und Shea (2009); Zheng et al. (2017); Zingel et al. (2012)

³⁴ Beetz et al. (2018)

5.3.2 Einordnung der Produktmodelle in das PMF

Abbildung 5.2 zeigt das ausgefüllte Produktmodell Framework (PMF). Für die graphische Darstellung wurde, angelehnt an Wynn und Clarkson (2018), eine Ellipse in Quadranten sowie einen inneren und einen äußeren Bereich unterteilt. Jeder Quadrant ist einem Modellzweck zugeordnet. Der innere Bereich ist der Ausarbeitungsphase zugeordnet. Der äußere Bereich ist der Konzept- und Ausarbeitungsphase zugeordnet. Aus dieser Aufteilung ergeben sich acht Bereiche, die mit römischen Ziffern nummeriert sind. Für den Bereich V können keine Produktmodelle existieren, da für die Konzeptionierung keine detaillierten Informationen zur Gestalt notwendig sind, beziehungsweise bei der reinen Ausarbeitung keine Konzepte mehr erarbeitet werden.

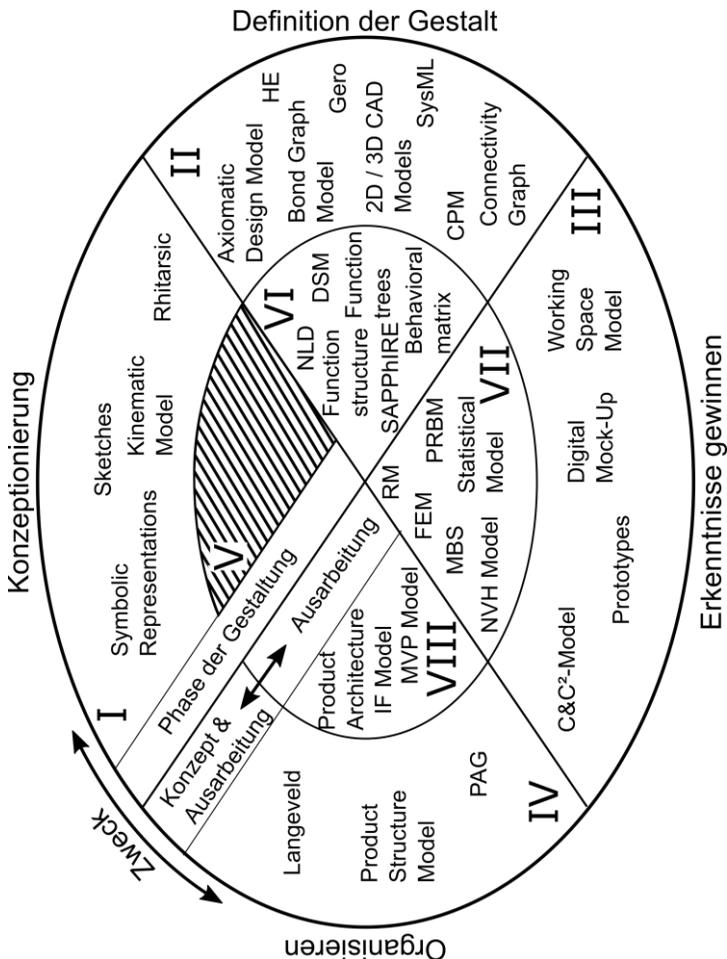


Abbildung 5.2: Produktmodell Framework (PMF) mit zugeordneten Produktmodellen. Übersetzt übernommen aus (Matthiesen et al., 2019). Die Abkürzungen der Modelle sind in Tabelle 5.3 ausgeschrieben. Die Zuordnung zu den Bereichen des PMF wurde anhand der Quellen aus der Literaturrecherche durchgeführt.

5.3.3 Zwischenfazit zur Übersicht der Produktmodelle

Das erste Ziel dieses Kapitels war die Erarbeitung einer strukturierten Übersicht von Produktmodellen in der Gestaltung.

Eine Struktur wurde erarbeitet und mit Produktmodellen, ermittelt mittels einer systematischen Literaturrecherche, gefüllt. Es ist naheliegend, dass weitere Produktmodelle existieren. Produktmodelle, die nicht in wissenschaftlichen Veröffentlichungen behandelt wurden oder nicht englischsprachig veröffentlicht wurden, können mit dem hier genutzten Vorgehen nicht gefunden werden. Dennoch wurde auch eine große Zahl der von Weidmann et al. (2017) aufgeführten Produktmodelle gefunden. Durch die Eingrenzung auf den Bereich der Gestaltung wurden zudem spezialisierte Produktmodelle wie CPM, DSM und C&C²-Modell ermittelt.

Die Kategorisierung, Tabelle 5.3, und Strukturierung im PMF, Abbildung 5.2, der Produktmodelle ermöglicht eine Übersicht über die Produktmodelle. Allerdings ist die Zuordnung der Produktmodelle in die Kategorien und Bereiche des PMF nicht eindeutig. Vor allem die Zuordnung in die Phasen der Gestaltung war nicht eindeutig. Dies liegt vor allem daran, dass zu den Produktmodellen meist nicht beschrieben ist, wann sie eingesetzt werden sollten. Gleiches gilt für den Modellzweck. Durch die notwendige Interpretation ist es daher möglich, dass Produktmodelle mehreren Bereichen im PMF zugeordnet werden können. Das PMF bietet dennoch eine Übersicht über Produktmodelle und eine Einordnung anhand ihres Zwecks.

Die Inhalte des PMF dienen als Überblick und können bei der Auswahl von Produktmodellen in einem Projekt unterstützen.

5.4 Produktmodelle zur Abbildung von GFZ

In diesem Kapitel wird Forschungsfrage 1 aufbauend auf dem PMF beantwortet. Dazu werden die Produktmodelle weiter eingegrenzt.

In GFZ-Modellen werden die Zusammenhänge zwischen Gestalt und Funktion abgebildet, siehe Kapitel 2.1.2. Im Kontext der GFZ-Modellierung beschreibt Funktion die beobachtbare Funktionserfüllung, die sich durch das Verhalten des Produkts ergibt. Daher kommen alle Produktmodelle für die Abbildung von GFZ in Frage, die das Verhalten, also die tatsächliche Funktionserfüllung, abbilden. Dadurch verbleiben 21 Produktmodelle aus dem PMF.

Tabelle 5.4 zeigt zunächst die Verteilung der Produktmodelle bezüglich ihrer Kategorisierung.

Tabelle 5.4: Anzahl der Produktmodelle zur Bildung von Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ)-Modellen nach Art der Abbildung und Art der Information. Die Tabelle ergibt sich durch Filtern der Produktmodelle nach der Frage, ob das Verhalten als Art der Information enthalten ist. Insgesamt erfüllen 21 der gefundenen Produktmodelle diese Anforderung.

	Art der Abbildung				Art der Information				
	Analytisch	Graphisch	Tabelle	Textbasiert	Physisch	Funktion	Verhalten	Qualitative Gestalt	Quantitative Gestalt
Anzahl an Produktmodellen mit Kategorie	8	17	8	1	1	9	21	13	10

Die meisten Produktmodelle basieren auf einer graphischen Abbildung, die mit einer weiteren Art der Abbildung kombiniert wird. Eine textbasierte Abbildung ist nur bei einem Produktmodell enthalten. Dies deutet darauf hin, dass in den Produktmodellen keine Beschreibung oder Interpretation enthalten ist. Vielmehr werden graphische Abbildungen durch Gleichungen oder Daten in Tabellen ergänzt.

In Tabelle 5.5 sind die 21 Produktmodelle aufgelistet. Zu jedem Modell ist der zugeordnete Zweck eingetragen.

Die Verteilung der Produktmodelle auf die Zwecke ist wie folgt:

- Definition des Produkts: 7
- Erkenntnisse gewinnen: 9
- Konzeptionierung: 4
- Organisieren: 1

Der Zweck Organisieren wird nur von einem Produktmodell erfüllt und ist damit unterrepräsentiert. Dies deutet darauf hin, dass das Verhalten in Produktmodellen, die für die Organisation eingesetzt werden, eine niedrige Relevanz hat.

Tabelle 5.5: Liste der für die Bildung eines Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ)-Modells geeigneten Produktmodelle, sortiert nach dem Zweck.

#	Produktmodell	Zweck
3	Behavioral Matrix	Definition des Produkts
4	Bond Graph Model	Definition des Produkts
7	CPM	Definition des Produkts
8	DSM	Definition des Produkts
17	Modelle nach Gero	Definition des Produkts
29	SAPPhIRE	Definition des Produkts
33	SysML Model	Definition des Produkts
5	C&C ² -Modell	Erkenntnisse gewinnen
9	Digital Mock-Up	Erkenntnisse gewinnen
10	FEM Simulation Model	Erkenntnisse gewinnen
18	Multibody Simulation	Erkenntnisse gewinnen
20	NVH Model	Erkenntnisse gewinnen
25	Prototype	Erkenntnisse gewinnen
26	Pseudo Rigid Body Model	Erkenntnisse gewinnen
31	Statistical Model	Erkenntnisse gewinnen
34	Working Space Model	Erkenntnisse gewinnen
14	Kinematic Model	Konzeptionierung
28	Modelle nach Rihtaršič	Konzeptionierung
30	Sketches	Konzeptionierung
32	Symbolic Representations	Konzeptionierung
13	Integrated Function Model	Organisieren

Nachfolgend werden die Gemeinsamkeiten der Produktmodelle mit demselben Zweck beschrieben.

5.4.1.1 Produktmodelle mit dem Zweck Definition des Produkts

Insgesamt bilden vier der Produktmodelle, die die Definition des Produkts als Zweck haben (DSM, Gero, SAPPhIRE und SysML Modelle), neben dem Verhalten auch die Funktion ab. Diese Modelle werden primär dazu eingesetzt Systeme zu strukturieren. Dabei werden bekannte Effekte in den Modellen implementiert. Die verbleibenden drei Modelle (Behavioral Matrix, Bond-Graph Model und CPM) basieren ebenfalls auf der Abbildung bekannter Effekte. Behavioral Matrix Modelle basieren auf Bond-Graph Modellen, somit können diese zusammengefasst werden. Bond-

Graph Modelle bilden bekannte Effekte von Fluss und Potentialgrößen ab. Der Bezug zur Gestalt wird durch Parameter hergestellt, zum Beispiel der Steifigkeit eines Elements. Der Schwerpunkt liegt hier auf der Erstellung von Simulationsmodellen von Systemen, in denen die wirkenden Effekte bekannt sind. Diese können dann genutzt werden, um das Systemverhalten zu analysieren.

CPM Modelle sind nicht auf bestimmte Effekte beschränkt. Für die Ermittlung von Zusammenhängen wird im Kontext von CPM auf weitere Modelle und Methoden verwiesen, wie zum Beispiel Schätzen, Experimente, Erfahrung und die Nutzung vorhandener Simulationsmodelle (Weber, 2014). CPM Modelle sind daher geeignet, um bekannte Zusammenhänge und Modelle zusammenzufassen. Damit sind sie ähnlich zu SysML Modellen, die unter anderem genutzt werden, um technische Systeme bezüglich übergeordneter Aspekte, zum Beispiel Struktur und Anforderungen, zu modellieren.

Eine Gemeinsamkeit der Produktmodelle in diesem Zweck ist, dass sie auf bekannte Effekte und Zusammenhänge zurückgreifen.

5.4.1.2 Produktmodelle mit dem Zweck Konzeptionierung

Die vier Produktmodelle mit dem Zweck Konzeptionierung sind bis auf das kinematic model auf eine qualitative Gestalt beschränkt. Sie werden eingesetzt, um Konzepte abzubilden oder Ideen zu explizieren. Dabei werden die Zusammenhänge zwischen Gestalt und Funktion qualitativ berücksichtigt, also in erster Linie die erwartete Richtung eines Effekts oder die reine Darstellung eines Prinzips. Davon ausgenommen sind die kinematischen Modelle. Diese dienen der Analyse von Bewegungen unter Berücksichtigung geometrischer Zusammenhänge. Weitere Effekte werden nicht abgebildet.

5.4.1.3 Produktmodelle mit dem Zweck Erkenntnisse gewinnen

Produktmodelle mit dem Zweck Erkenntnisse gewinnen sind Modelle für die Analyse technischer Systeme. Dabei unterscheiden sich die Fragestellungen je nachdem welches der neun Modelle betrachtet wird. Zu den Modellen Pseudo rigid body model, NVH Model, Multibody simulation, FEM Simulation Model und Digital Mock-up gehören häufig auf 3D-CAD Modellen basierende Simulationswerkzeuge. Diese werden auch unter dem Begriff CAE-Werkzeuge zusammengefasst (Vajna et al., 2018). Diese werden für spezielle Zwecke entwickelt und bilden bekannte Effekte ab. FEM Simulationsmodelle fassen dabei Modelle mit verteilten Parametern zusammen. Ein Beispiel sind Festigkeitssimulationen.

Im Gegensatz zu diesen Produktmodellen gibt es qualitative Modelle, wie das Working Space Model und das C&C²-Modell. Diese werden zur qualitativen Analyse von Verhalten verwendet und sollen den Denkprozess unterstützen.

Statistische Modelle (statistical model) sind ebenfalls dem Zweck Erkenntnisse gewinnen zuzuordnen und werden auch als Black-Box Modelle bezeichnet. Diese Produktmodelle basieren auf Versuchsdaten, siehe Kapitel 2.1. Die Abbildung der Zusammenhänge selbst ist mathematisch. Die genaue Ausprägung hängt von der verwendeten Methode ab. Ein bekanntes Beispiel sind lineare Regressionsmodelle. Machine Learning Modelle fallen ebenfalls unter diese Gruppe. Mit der Abbildung der Zusammenhänge in einem statistischen Modell wird nicht zwangsweise das Verständnis über die physikalischen Effekte vergrößert. Daher ist keine Aussage über das Verhalten außerhalb des untersuchten Bereichs möglich.

Prototypen (prototypes) sind die einzige Ausprägung physischer Modelle, die bei der Recherche gefunden wurde. Ein Teil des Systems oder das Gesamtsystem mit einem niedrigen Reifegrad wird physisch erstellt. Solche Prototypen dienen der Analyse des realen Verhaltens. Dabei sind die Zusammenhänge durch die physische Nachbildung enthalten. Ein Explizieren des Wissens über die Zusammenhänge findet erst durch das Bilden weiterer Modelle statt.

5.5 Diskussion

5.5.1 Produktmodell Framework

Die systematische Literaturrecherche zeigt eine große Überdeckung der gefundenen Produktmodelle mit denen von Weidmann et al. (2017). Durch die Suche im Bereich der Gestaltung wurden Produktmodelle wie CPM, DSM oder C&C²-Modell gefunden. Die systematische Literaturrecherche war damit angemessen definiert, um einen Querschnitt bestehender Produktmodelle zu finden.

Das hier erarbeitete PMF bietet eine Übersicht über vorhandene Produktmodelle. Das PMF veraltet natürlicherweise. Das hier dargestellte PMF ist eine Momentaufnahme von 2018. Neue Produktmodelle können zukünftig anhand des hier beschriebenen Vorgehens in das PMF eingeordnet werden.

Die Charakterisierung der Produktmodelle und die Einordnung in die sieben Kategorien des PMF können genutzt werden, um die Produktmodelle zugänglicher zu

machen. Die Zuordnung zu den hier gewählten Kategorien ist allerdings nicht eindeutig. Da nur wenige Produktmodelle mit klaren Definitionen bezüglich ihres Zwecks und der Einsatzphase veröffentlicht werden, beruht diese Einordnung auf der Analyse der Veröffentlichungen. Durch die vorgestellten Fragen zur Einordnung soll ein subjektiver Einfluss der einordnenden Person reduziert werden. Da die Begriffe der Kategorien allerdings keiner eindeutigen Definition folgen, ist dieser Einfluss derzeit nicht vermeidbar. Hinzu kommt, dass eine strikte Zuordnung nicht immer möglich ist. Viele Produktmodelle können über beide Phasen der Gestaltung hinweg eingesetzt werden. Es ist auch möglich, dass ein Produktmodell für mehrere Zwecke verwendet wird. Eine konkretere Beschreibung der Produktmodelle in Veröffentlichungen oder ein einheitlicheres Verständnis der Begriffe im Forschungsumfeld der Gestaltung würden hier eine eindeutigere Einordnung ermöglichen.

Die systematische Literaturrecherche ist bezüglich der Vollständigkeit der Produktmodelle eingeschränkt. Produktmodelle aus der Industrie, zu denen keine Veröffentlichungen existieren, können nicht durch die systematische Literaturrecherche gefunden werden. Durch die begrenzte Anzahl an Stichworten die sinnvoll berücksichtigt werden können, ist es zudem möglich, dass weitere Produktmodelle existieren, aber aufgrund der Verwendung anderer Stichworte oder der Betrachtung unter anderen Gesichtspunkten als der Gestaltung nicht gefunden werden können. Produktmodelle, die in anderen Sprachen als Englisch veröffentlicht wurden, sind ebenfalls nicht erfasst. Für eine Erweiterung des PMF ist zu erwarten, dass Produktmodelle aus der Industrie aufgrund ihrer Praxisrelevanz den größten Mehrwert bieten. Diese Modelle könnten über Umfragen oder Recherchen zu entsprechenden proprietären Programmen zur Modellierung ermittelt werden.

5.5.2 Produktmodelle für die Abbildung von GFZ

Viele Produktmodelle, die in der systematischen Literaturrecherche gefunden wurden, sind für die Abbildung von GFZ geeignet. Auffällig ist, dass die Abbildung der Zusammenhänge zwischen Gestalt und Funktion bei den meisten gefundenen Produktmodellen auf der Abbildung bekannter Zusammenhänge basiert, zum Beispiel bei Bond-Graph Modellen. Andere Produktmodelle, zum Beispiel kinematic model, sind noch spezifischer auf bestimmte GFZ, beziehungsweise auf die Betrachtung bestimmter Effekte, festgelegt. Im Beispiel kinematic model ist dies der Zusammenhang zwischen der Gestalt und dem resultierenden kinematischen Verhalten.

Die Vielzahl der gefundenen Produktmodelle unterstützt die Aussage aus dem Stand der Forschung, dass Modelle eine große Bedeutung in der Gestaltung haben. Zusätzlich zeigt sich, dass die Bildung von GFZ-Modellen zum Teil als Fragestellung

in der Forschung bearbeitet wird. Es werden Produktmodelle entwickelt, um bestimmte GFZ, beziehungsweise den GFZ zugrunde liegende Effekte, abzubilden. Beispiele sind hier Mehrkörpersimulationen, kinematic model und Bond-Graph Modelle. Andererseits ist die Bildung von GFZ-Modellen Teil der Gestaltung (Matthiesen, 2021). Dies zeigt, dass bei der Gestaltung gegebenenfalls Fragestellungen gelöst werden müssen, die teilweise der Forschung zugeordnet werden.

Diese Erkenntnis wirkt sich auf das Vorgehen zur Bildung von GFZ-Modellen aus. Es sollte möglichst früh bei der Bildung eines GFZ-Modells geklärt werden, welche Zusammenhänge oder welche Effekte relevant sind. Basierend darauf sollte bewertet werden, ob bereits spezifische Produktmodelle verfügbar sind.

Die Teilforschungsfrage 1 wurde durch die weitere Eingrenzung der Produktmodelle aus dem PMF beantwortet.

5.6 Fazit zu Produktmodellen für die Bildung von GFZ-Modellen

In diesem Kapitel wurde die Fragestellung untersucht, welche Produktmodelle in der Gestaltung für die Abbildung von GFZ eingesetzt werden können. Dazu wurde Forschungsfrage 1 beantwortet.

Ein Zwischenergebnis der Beantwortung der Forschungsfrage 1 ist das PMF. In dem PMF wurden Produktmodelle aus einer systematischen Literaturrecherche anhand ihres Zwecks und der Phase in der Gestaltung, in der sie eingesetzt werden, eingeordnet. Dazu wurden die Produktmodelle bezüglich der Art der Abbildung und der Art der enthaltenen Informationen analysiert.

Das Ergebnis der Forschungsfrage 1 ist der Auszug aus dem PMF mit den für die Abbildung von GFZ geeigneten Produktmodellen. Auf Grundlage des PMF wurden Produktmodelle betrachtet, die für die Bildung von GFZ-Modellen geeignet sind. Dies trifft auf einen Großteil der gefundenen Produktmodelle zu. Allerdings können viele der Produktmodelle nur gebildet werden, wenn die wirkenden Effekte bekannt sind. Sie können daher nur bei entsprechend erforschten Wirkprinzipien angewandt werden.

6 Untersuchung der GFZ von Sichelmessern

Um ein quantitatives GFZ-Modell bilden zu können, müssen entweder die relevanten physikalischen Effekte oder Daten zur Ableitung eines Modells ermittelt werden. Im Stand der Forschung wurde gezeigt, dass bisher kein validiertes quantitatives GFZ-Modell zu Sichelmessern existiert. In diesem Kapitel wird die Untersuchung der GFZ von Sichelmessern vorgestellt. Die Untersuchung erfolgte als Teil eines bilateralen Projekts mit einem Industriepartner.

In diesem Kapitel wird die Bearbeitung der *Forschungsfrage 2* vorgestellt:

Welche Zusammenhänge müssen in einem quantitativen GFZ-Modell von Sichelmessern berücksichtigt werden?

Das Vorgehen zur Untersuchung der GFZ wurde aus den im Stand der Forschung vorgestellten Vorgehensweisen zur quantitativen Modellbildung abgeleitet. Als Teil des Vorgehens wurden die Teilforschungsfrage 2.1 und 2.2 bearbeitet.

Die Teilforschungsfragen lauten:

Teilforschungsfrage 2.1:

Welche zum Schneiden von Lebensmitteln bekannten Zusammenhänge sind für das Slicing relevant?

Teilforschungsfrage 2.2:

Welchen Einfluss hat die Drehzahl des Sichelmessers auf die Schnittkräfte beim Slicen von Brühwurst und Kochschinken?

Nachfolgend werden in Kapitel 6.1 die Arbeitspakete zur Untersuchung der GFZ von Sichelmessern erläutert. In den Kapiteln 6.2 und 6.3 werden die Ergebnisse zu den GFZ von Sichelmessern vorgestellt. Kapitel 6.4 beinhaltet das Fazit aus den gewonnenen Erkenntnissen. Insbesondere wird die Abbildung der Erkenntnisse in einem quantitativen GFZ-Modell diskutiert.

Die Ergebnisse zu den Teilforschungsfragen 2.1 und 2.2 wurden im *Journal of Food Engineering* veröffentlicht:

- „*A review on research related to food slicing in industrial applications*” (Bremer & Matthiesen, 2020)
- „*High-speed cutting with involute blades: Experimental research on cutting forces*” (Bremer & Matthiesen, 2021)

6.1 Arbeitspakete zur Untersuchung der GFZ von Sichelmessern

In Abbildung 6.1 sind die Arbeitspakete zur Untersuchung der GFZ von Sichelmessern dargestellt. Die Arbeitspakete orientieren sich an den in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Vorgehensweisen zur Bildung quantitativer Modelle. Den Arbeitspaketen sind die jeweiligen Ergebnisse zugeordnet, die als Teil des Arbeitspakets erzeugt werden sollen. Die dargestellte Reihenfolge der Arbeitspakete stellt die initiale Bearbeitungsreihenfolge dar. Allerdings wurden die Arbeitspakete teilweise parallel bearbeitet und Ergebnisse iterativ weiterentwickelt.

In den folgenden Unterkapiteln 6.1.1 bis 6.1.5 werden die einzelnen Arbeitspakete kurz erläutert.

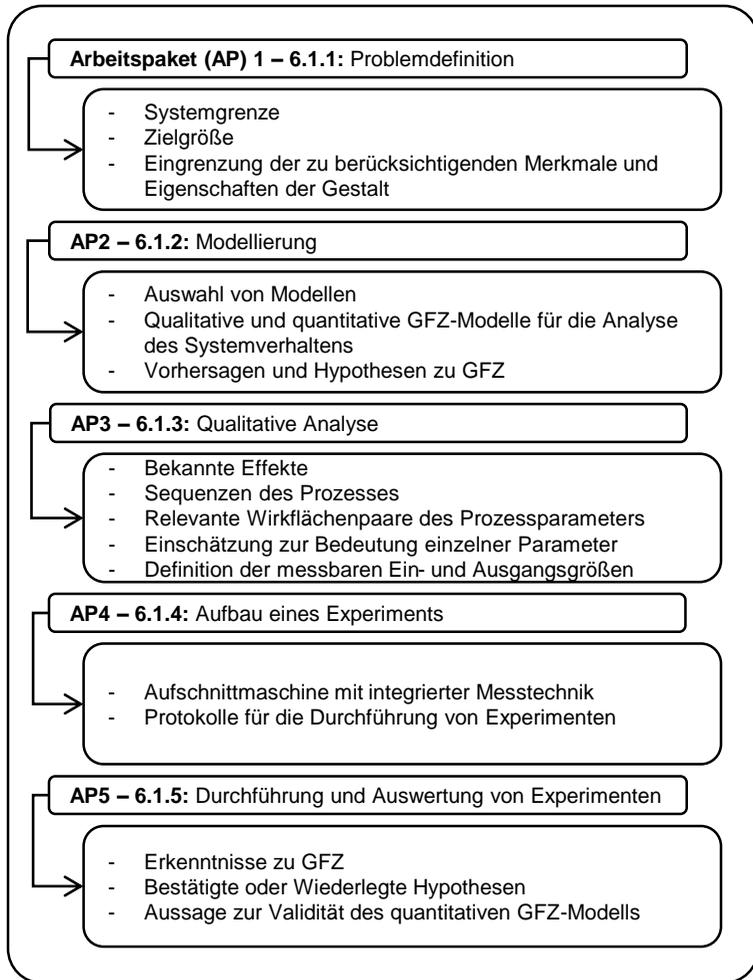


Abbildung 6.1: Arbeitspakete und zugehörige Ergebnisse zur Untersuchung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (GFZ) von Sichelmessern.

6.1.1 Arbeitspaket 1: Problemdefinition

Ziel des Arbeitspakets Problemdefinition ist festzulegen, welche Fragestellungen durch die Bildung des Modells beantwortet werden sollen. Dafür wurden initial Workshops mit dem Projektpartner durchgeführt, um Vermutungen und Erfahrungswissen, soweit möglich, zu erfassen. Zudem wurden die Systemgrenze und die Zielgrößen für die Untersuchung definiert.

Die Systemgrenze wurde so definiert, dass die Gestalt des Sichelmessers und die Wechselwirkung mit dem Lebensmittel betrachtet werden. In den weiteren Arbeitspaketen wurde die Fragestellung eingegrenzt. Entsprechend wurden einzelne Gestaltmerkmale und Prozessparameter innerhalb der Systemgrenze untersucht. Die Eingrenzung wurde vor allem anhand der qualitativen Analyse, siehe Kapitel 6.1.3 (AP3), und durch den Einbezug von Erkenntnissen zum Schneiden von Lebensmitteln, siehe Kapitel 6.2, durchgeführt.

Eine hohe Funktionserfüllung wird durch Maximierung der Drehzahl des Sichelmessers erreicht. Dabei muss die Qualität der Portionen die Mindestanforderungen erfüllen.

Die Qualität der Portionen bestimmt in der Praxis die Funktionserfüllung des Schnittprozesses und wird über die Einhaltung der vorgegebenen Geometrie und die Qualität der einzelnen Scheiben definiert. Die Geometrie der Portion, also die definierte Anordnung der geschnittenen Scheiben, muss die Toleranzen bezüglich Länge, Breite und Verdrehung zur idealen Ausrichtung einhalten. Die Scheiben dürfen durch den Schnittprozess nicht beschädigt werden. Die Qualität der Scheiben wurde bisher nicht in Abstufungen definiert. Eine eindeutig schlechte Qualität der Scheiben ist zum Beispiel eine zerrissene Scheibe. Feinere Unterscheidungen erfolgten bisher subjektiv.

Die Schnittkraft resultiert aus der Wechselwirkung zwischen Sichelmesser und Lebensmittel. Die Schnittkraft ist eine übliche Messgröße in der Forschung zum Schneiden von Lebensmitteln.

Als Zielgrößen für die Untersuchung wurden daher die Qualität der Portionen und die Schnittkräfte definiert.

Zusammenfassend sind in Abbildung 6.2 die Ein- und Ausgangsgrößen für die Abbildung der GFZ von Sichelmessern dargestellt. Basierend auf dem Stand der Forschung, siehe Kapitel 2.3, ist zunächst die Geometrie der Schneidkante relevant für den Verlauf der Schnittkräfte und damit für die Portionsqualität. Als Randbedingung sind die Eigenschaften des Lebensmittels zu berücksichtigen. Im Schnittkraftmodell

nach Atkins und Xu sind diese nur durch die Bruchenergie R abgebildet. Dieses mathematische Modell wurde bisher nicht validiert. Dies ist in der Abbildung durch ein Fragezeichen dargestellt.

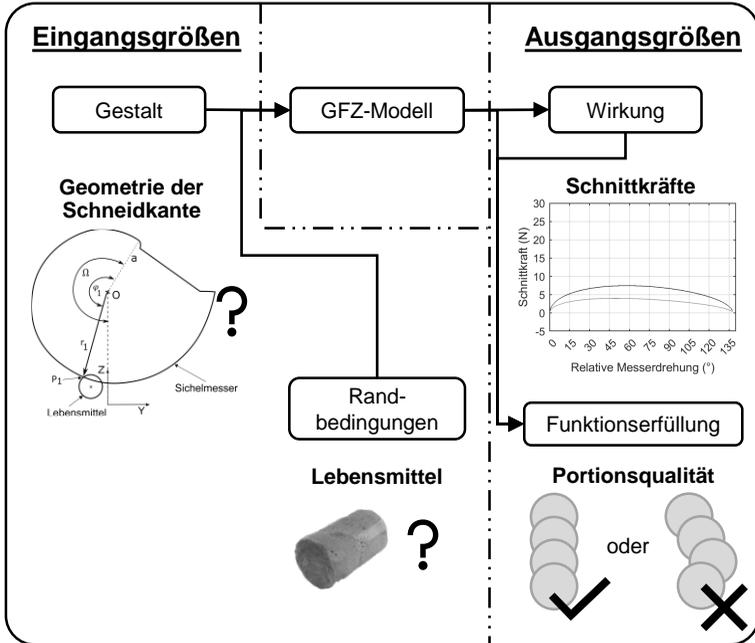


Abbildung 6.2: Ein- und Ausgangsgrößen für die Abbildung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (GFZ) von Sichelmessern. Die Fragezeichen markieren bisher unbekannte oder nicht validierte Zusammenhänge zwischen der Funktionserfüllung und den markierten Eingangsgrößen.

6.1.2 Arbeitspaket 2: Modellierung

Die Modellierung umfasst die Erstellung konkreter Instanzen von Modellen für das Slicing. Die Erstellung der Modelle erfolgt entsprechend der Regeln für das jeweilige Modell. Für die Ermittlung und Abbildung der GFZ werden Modelle für verschiedene Zwecke ausgewählt. Da Erkenntnisse zu den GFZ gewonnen werden sollen, sind die gewählten Zwecke *Konzeptionierung* und *Erkenntnisse gewinnen*.

Konzeptionierung wird in diesem Fall als qualitative Abbildung des Systems interpretiert, da durch solche Modelle die Funktionsprinzipien einfach dargestellt werden können. Entsprechend wurden aus Tabelle 5.5 Produktmodelle ausgewählt. Zur Konzeptionierung wurden Skizzen erstellt. Diese wurden zum Nachvollziehen des Aufbaus und des mathematischen Modells verwendet, siehe Kapitel 2.3. Die Skizzen erfüllen insbesondere den Zweck die Gestaltmerkmale des Produkts zu benennen und deren Anordnung abzubilden.

Für den Zweck *Erkenntnisse gewinnen* wurden mehrere Modelle ausgewählt. Für die qualitative Analyse wurde ein C&C²-Modell gebildet. Das C&C²-Modell wurde ausgewählt, da Kraftflüsse und unterschiedliche Zustände betrachtet werden. Das C&C²-Modell erfüllt insbesondere den Zweck die qualitative Analyse des Schnittvorgangs zu analysieren und Wirkflächenpaare zu ermitteln. Das Explizieren von Vermutungen zu Wirkflächenpaaren ermöglicht es experimentell überprüfbare Hypothesen zu formulieren. Des Weiteren wurden ein Black-Box Modell und ein White-Box Modell gebildet. Diese sind nicht in Tabelle 5.5 enthalten, da es sich hier nicht um eine bestimmte Ausprägung eines Produktmodells handelt. Diese Modelle beziehen sich auf die experimentelle und theoretische Modellbildung, siehe Kapitel 2.2.1. Das Black-Box Modell erfüllt den Zweck Zusammenhänge aus Daten zu ermitteln und abzubilden, ohne diese verstehen oder erklären zu müssen. Das White-Box Modell erfüllt den Zweck, die ermittelten relevanten Effekte mathematisch zu beschreiben. Das White-Box Modell basiert dabei unter anderem auf den in der Skizze abgebildeten Gestaltmerkmalen.

In Abbildung 6.3 sind die beschriebenen Modelle zusammengefasst.

qualitative Modelle	quantitative Modelle
<p>Modell: Skizze Zweck: Konzeptionierung - Darstellung der Gestaltmerkmale</p>	<p>Modell: Black-Box Modell Zweck: Erkenntnisse gewinnen - Empirisch ermittelte Zusammenhänge abbilden</p> <p>Gestaltmerkmale und Prozessparameter</p> <p>Klingenwinkel Lebensmittel Temperatur ...</p>
<p>Modell: C&C²-Modell Zweck: Erkenntnisse gewinnen - Unterstützung der qualitativen Analyse</p> <p>Modellzweck: Unterstützung der qualitativen Analyse zur Identifikation von Wirkflächenpaaren beim Slicing</p> <ul style="list-style-type: none"> Wirkflächenpaar Leitstützstruktur Connector 	<p>Modell: White-Box Modell Zweck: Erkenntnisse gewinnen - Abbildung der GFZ durch mathematische Beschreibung der relevanten Effekte</p> <p>Gestaltmerkmale und Prozessparameter</p> <p>Schneidengeometrie Lebensmittel</p> $ds = \sqrt{r^2 + b^2} d\varphi$ $F_n = R \frac{1}{1 + \xi^2} ds \quad F_t = R \frac{\xi}{1 + \xi^2} ds$

Abbildung 6.3: Modelle zur Ermittlung und Abbildung der quantitativen Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (GFZ) von Sichelmessern für das Slicing.

6.1.3 Arbeitspaket 3: Qualitative Analyse des Schnittprozesses

Die qualitative Analyse des Schnittprozesses wurde verstärkt zu Beginn des Projekts durchgeführt. Ziel dieser Analyse war es, ein Verständnis des Prozesses zu schaffen und Einflussfaktoren einzugrenzen. Die qualitative Betrachtung dient auch als Referenz zum Vergleich mit Erkenntnissen zu anderen Schneidprozessen. Dadurch wurde die Eingrenzung der Problemdefinition unterstützt. Für die qualitative Analyse wurde ein C&C²-Modell gebildet und Versuche durchgeführt bei denen

Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen zur Analyse des Prozesses erstellt wurden.

Das C&C²-Modell basiert auf Skizzen des Aufbaus. Ein Teil des C&C²-Modells ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Zur Bildung von C&C²-Modellen und der genauen Bedeutung der Elemente wird auf (Matthiesen, 2021) verwiesen.

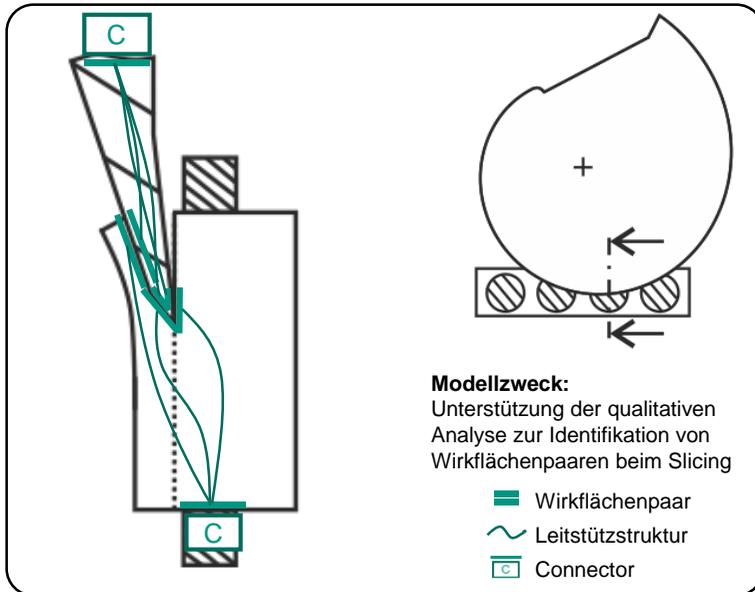


Abbildung 6.4: Teil des C&C²-Modells zum Schnittprozess. Das Modell visualisiert die vermuteten Wirkflächenpaare und die angenommene Kraftleitung durch das Lebensmittel in die Schneidleiste. Schnittansicht (links) und Frontalansicht (rechts).

Das Modell visualisiert die Vermutung, dass sich Wirkflächenpaare sowohl zwischen der Vorderseite des Messers und dem Lebensmittel als auch zwischen der Rückseite des Messers und dem Lebensmittel ausbilden. Aus der Betrachtung des Kraftflusses durch das Lebensmittel als Leitstützstruktur zeigte sich, dass unklar ist, wie die Ausprägung der realen Wirkflächenpaare zwischen Lebensmittel und Schneid-

leiste aussieht. Hieraus ergab sich die Vermutung, dass die Ausprägung des Wirkflächenpaares von der Deformation des Lebensmittels und der Wirkrichtung der resultierenden Schnittkraft abhängt.

Die Analyse unterschiedlicher Zustände mit dem C&C²-Modell zeigte, dass durch die Geometrie des Messers und des Lebensmittels zunächst ein Punktkontakt entsteht. Im weiteren Prozess nimmt die Kontaktlänge zwischen Schneide und Lebensmittel zunächst zu und anschließend wieder ab. Daraus leitet sich eine Abhängigkeit der Kontaktlänge und der Geometrie sowohl des Messers als auch des Lebensmittels und deren relative Positionierung ab. Dies konnte durch eine einfache Berechnung anhand der geometrischen Verhältnisse bestätigt werden, für die mathematische Beschreibung siehe Kapitel 2.3.4.

Durch einfache Versuche konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung der Drehzahl dazu führt, dass die Qualität der Portionen abnimmt. Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen zeigen, dass Scheiben bei gesteigerter Drehzahl zerstört werden oder stärker durch das Sichelmesser beschleunigt werden. In beiden Fällen nimmt die Qualität der aus diesen Scheiben gebildeten Portionen ab. Daraus wird abgeleitet, dass zum einen die Drehzahl die Schnittkräfte beeinflusst und zum anderen die Reibung im Wirkflächenpaar zwischen Scheibe und Sichelmesser zur Beschleunigung der Scheibe beiträgt.

Ergebnis der qualitativen Analyse sind Vermutungen, welche Effekte in den GFZ berücksichtigt werden müssen. Dies sind zum Beispiel die Drehzahl, die Klingenkante, die Eigenschaften der Lebensmittel und die Umgebungsparameter wie Luftfeuchte oder Umgebungstemperatur. Die experimentelle Untersuchung aller Vermutungen bedeutet einen großen Aufwand. Die Vermutungen wurden daher zunächst durch eine Analyse des Stands der Forschung zum Schneiden von Lebensmitteln mit bekannten Zusammenhängen abgeglichen und erweitert, um die zu untersuchenden Effekte und Einflussfaktoren zu priorisieren. Die Ergebnisse dieser Analyse werden in Kapitel 6.2 vorgestellt.

6.1.4 Arbeitspaket 4: Aufbau eines Experiments

Modellierung erfordert eine Validierung des erstellten Modells. Das heißt den Abgleich zwischen den Hypothesen aus dem Modell, beziehungsweise der Vorhersage aus dem Modell, und der Realität. Bei Black-Box Modellen ist bereits für die Bildung des Modells die Erhebung von Daten erforderlich, um aus diesen Daten Zusammenhänge ableiten zu können. Entsprechend ist der Aufbau eines Experiments erforderlich.

Für die Durchführung von Experimenten müssen Eingangsgrößen eingestellt und Ausgangsgrößen gemessen werden können. Im Kontext der Versuchsplanung werden diese teilweise auch als unabhängige (Eingangsgrößen) und abhängige (Ausgangsgrößen) Variablen bezeichnet.

Ziel dieses Arbeitspakets ist daher die Integration von Messtechnik in einen Slicer zur Erfassung der Ausgangsgrößen. Zudem werden Versuchsabläufe definiert, die Einstellung der Eingangsgrößen sichergestellt und die Genauigkeit der Messung der Ausgangsgrößen ermittelt.

Der Aufbau zur Messung der Schnittkraft als Ausgangsgröße wird in Kapitel 6.3.1.2 als Teil der Vorgehensweise zur Untersuchung des Einflusses der Drehzahl auf die Schnittkräfte beschrieben.

6.1.5 Arbeitspaket 5: Durchführung und Auswertung von Experimenten

Die Durchführung und Auswertung von Experimenten beinhalten die konkrete Erhebung und die Interpretation experimenteller Daten. Dies umfasst auch die Durchführung von Vorversuchen zur Verifikation des Aufbaus.

Das genaue Vorgehen für die Durchführung und Auswertung ist abhängig davon, welche Effekte und Einflüsse untersucht werden. Dieses Vorgehen muss üblicherweise spezifisch erarbeitet werden. In Kapitel 6.3 wird vorgestellt, wie der Einfluss der Drehzahl auf die Schnittkräfte beim Slicing untersucht und ausgewertet wurde.

6.2 Analyse von Erkenntnissen zum Schneiden von Lebensmitteln

Durch die qualitative Analyse des Schnittprozesses wurden Vermutungen zu Zusammenhängen aufgestellt. Die qualitative Analyse basiert allerdings nur auf theoretischen Überlegungen, wobei eine Vielzahl möglicher Zusammenhänge identifiziert wurde.

Zur Eingrenzung und Priorisierung welche Zusammenhänge untersucht werden sollen wurde die *Teilforschungsfrage 2.1* bearbeitet:

Welche zum Schneiden von Lebensmitteln bekannten Zusammenhänge sind für das Slicing relevant?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurden Veröffentlichungen zum Schneiden von Lebensmitteln analysiert. Das heißt, es wurden zum Beispiel auch Untersuchungen an Messern mit geraden Schneiden oder handgeführten Messern berücksichtigt. Nachfolgend werden die Ergebnisse aus dieser Analyse vorgestellt, die eine Ergänzung zur qualitativen Analyse des Schnittprozesses am Slicer sind.

Dieses Kapitel basiert auf der Veröffentlichung:

- „*A review on research related to food slicing in industrial applications*“ (Bremer & Matthiesen, 2020)

Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung in übersetzter Form aus der Veröffentlichung übernommen. Sie werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.

6.2.1 Schneiden von Lebensmitteln

Das Schneiden von Lebensmitteln wird allgemein als definierter Bruchvorgang beschrieben. Die notwendige Energie zum Schneiden eines Lebensmittels W_S setzt sich nach van Vliet et al. (1993) wie folgt zusammen:

$$W_S = W_B + W_V + W_E + W_R \quad 6.1$$

Die Anteile sind die Bruchenergie W_B , die durch Verformung dissipierte Energie W_V , die elastisch gespeicherte Energie W_E und die durch Reibung dissipierte Energie W_R . Diese Beschreibung basiert auf der Annahme, dass die meisten Lebensmittel ein viskoelastisches Materialverhalten aufweisen (Du & Tscheuschner, 1986; Luyten et al., 1992; van Vliet & Walstra, 1995). Der Reibungsterm W_R fasst Energieverluste durch Reibung am Kontakt zwischen Lebensmittel und Messer und in der Schnittmaschine zusammen. Für die Betrachtung des Schnittprozesses wird die Reibung in der Maschine meist vernachlässigt. Die Bruchenergie W_B ist die notwendige Energie zur Erzeugung der Schnittfläche. Die Bruchenergie kann berechnet werden, indem die Kraft während des Schnitts über die Länge des Schnitts integriert wird. Die insgesamt notwendige Energie für den Schnitt wird durch die Wechselwirkungen zwischen Messer und Lebensmittel bestimmt. Dabei haben, aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften der Lebensmittel, insbesondere Prozessparameter wie Temperatur und Schnittgeschwindigkeit einen Einfluss, da sie das Verhalten des Lebensmittels beeinflussen.

Schneider et al. (2002) beschreiben das Schneiden von Lebensmitteln mit geraden Schneiden in mehreren Phasen. Der Schnitt beginnt, wenn die Schneide das Lebensmittel berührt. Das Lebensmittel wird deformiert, bis sich ein Riss bildet. Anschließend folgt die Trennphase in der sich die Klinge durch das Lebensmittel bewegt und den Riss fortsetzt. Dabei werden die Schnittflächen erzeugt. Wenn die Schneide das Lebensmittel durchtrennt hat, kann eine Ablösungsphase folgen. In dieser Phase besteht noch Kontakt zwischen dem Lebensmittel und den Seitenflächen der Klinge. Dowgiało (2005) beschreibt die gleichen Phasen für ein ähnliches Experiment. Beide Studien verwenden Kraft-Verschiebungs-Kurven eines drückenden Schnitts mit einer geraden Klinge. Schneider et al. (2002) berichten, dass die Ausprägung der Phasen charakteristisch für bestimmte Lebensmittelgruppen mit ähnlichen Textureigenschaften ist. Entsprechend der Anteile, die zu den Schnittkräften beitragen, zum Beispiel größerer Einfluss der Trennkräfte oder Reibungskräfte, ergeben sich charakteristische Kraftverläufe.

Zu folgenden Themen wurden Erkenntnisse in der Literatur gefunden:

- Eigenschaften der Klinge
 - Zug/Druck-Verhältnis
 - Einfluss der Klingenschärfe
- Wechselwirkungen zwischen Klinge und Lebensmittel
 - Einfluss von Schnittgeschwindigkeit und Temperatur
 - Reibkontakt
- Zusammensetzung der Lebensmittel
- Modellierungsansätze zum Schneiden von Lebensmitteln

Diese werden nachfolgend erläutert.

6.2.2 Eigenschaften der Klinge

Die Eigenschaften der Klinge ergeben sich aus unterschiedlichen geometrischen und stofflichen Merkmalen. Erkenntnisse zu den Eigenschaften der Klinge werden in diesem Kapitel näher betrachtet.

6.2.2.1 Zug/Druck-Verhältnis

Die Verringerung der Schnittkräfte durch eine zusätzliche, ziehende, Bewegung beim Schneiden ist ein bekanntes Prinzip. Dies wird als ziehender Schnitt bezeichnet. Bei Sichelmessern wird ein ziehender Schnitt durch die Geometrie der Klinge erreicht. Atkins et al. (2004) haben den Einfluss der ziehenden Bewegung auf die

Schnittkräfte beim Schneiden dünner Scheiben untersucht. Das Zug/Druck-Verhältnis ξ ist definiert als der Quotient der Schnittgeschwindigkeit tangential und normal zur Klinge, siehe Kapitel 2.3.4. Von Atkins et al. (2004) durchgeführte Versuche zeigen eine Reduktion der Schnittkräfte bei größerem ξ für das Schneiden von Pfeffer-salami und Cheddar. Das Schnittkraftmodell nach Atkins und Xu basiert auf dem Zug/Druck-Verhältnis, siehe Kapitel 2.3.4.

6.2.2.2 Einfluss der Klingenschärfe

McGorry et al. (2005) untersuchten den Einfluss des Schliffs der Schneide auf die manuellen Kräfte beim Entbeinen. Die Ergebnisse zeigen, dass ein höherwertigerer Schliff die Greifkräfte signifikant reduziert. Marsot et al. (2007) haben den Einfluss des Schneidenwinkels auf die Schnittkräfte, das initiale Schneidvermögen und die Schnitthaltigkeit der Schneide untersucht. Sie haben einen Prüfaufbau entwickelt, um die Schnittkräfte eines handgehaltenen Messers zu erfassen. Sie schlussfolgern aus den Ergebnissen, dass der Schneidenwinkel ein Kompromiss zwischen dem initialen Schneidvermögen, auch als Schärfe bezeichnet, und der Schnitthaltigkeit der Klinge ist. Dies zeigt die Bedeutung der Schärfe für den Schnittprozess.

Der Blade Sharpness Index (BSI) ist ein dimensionsloses Maß für die Bestimmung der Schärfe chirurgischer oder anderer Klingen (McCarthy et al., 2007). Der BSI ist definiert über das Verhältnis der notwendigen Energie für die Initiation eines Schnitts zu dem Produkt aus Bruchzähigkeit, Spannungintensitätsfaktor des Modus I des Substrats und Schnittlänge. In einer Studie von McCarthy et al. (2010) wurden die Auswirkungen des Radius an der Spitze der Schneide und dem Schneidenwinkel auf den BSI untersucht. Abbildung 6.5 zeigt die Definition der Parameter im Querschnitt der Schneide. Der Radius an der Spitze der Schneide hatte einen großen Einfluss auf den BSI. Der Einfluss des Schneidenwinkels war weniger ausgeprägt, aber dennoch vorhanden. Ein größerer Radius der Spitze der Schneide und größere Schneidenwinkel verringern die Schärfe. Die Ergebnisse zeigen auch, dass eine schärfere Klinge zu niedrigeren Schnittkräften führt (McCarthy et al., 2007; McCarthy et al., 2010).

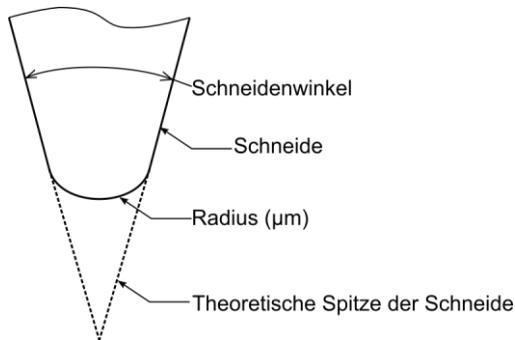


Abbildung 6.5: Detailansicht der Spitze einer Schneide im Querschnitt. In der realen Ausprägung entsteht ein Radius, Größenordnung wenige Mikrometer, an der Spitze der Schneide. In Anlehnung an McCarthy et al. (2010).

Schuldt, Arnold et al. (2016) verwenden den BSI um den Einfluss der Schärfe auf die Schnittkräfte beim Schneiden unterschiedlicher Lebensmittel zu untersuchen. In den Schnittversuchen der Studie hatte die Schärfe nur einen Einfluss, wenn der Anteil der Bruchenergie an der Schnittenergie hoch war. Schnittkräfte beim Schneiden von Lebensmitteln mit einer isotropen Mikrostruktur waren weniger durch den BSI beeinflusst. Der Anteil der Reibungskräfte an den Schnittkräften nahm zu, sobald ein Riss initiiert wurde. Die Aussagekraft des BSI für Schnittkräfte nimmt daher ab diesem Zeitpunkt ab.

Die hier zusammengefassten Studien zeigen, dass die Schärfe der Schneide einen Einfluss auf die Schnittkräfte hat. Dabei wurden bisher vor allem die Schnittkräfte zum Initiieren des Schnittes betrachtet. Die Eigenschaften der Lebensmittel beeinflussen die Stärke dieses Effekts (Schuldt, Arnold et al., 2016). Die Schärfe wird unter anderem durch den Schlifffprozess und den Schneidenwinkel beeinflusst. Es besteht ein Zielkonflikt zwischen Schärfe und Schnitthaltigkeit der Schneide.

6.2.3 Wechselwirkungen zwischen Klinge und Lebensmittel

In diesem Kapitel werden bekannte Wechselwirkungen zwischen Klinge und Lebensmittel und die dazugehörigen Effekte betrachtet.

6.2.3.1 Einfluss von Schnittgeschwindigkeit und Temperatur

Die meisten Lebensmittel weisen ein viskoelastisches Materialverhalten auf. Ihr mechanisches Verhalten ist unter anderem abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit und der Temperatur (Kamyab et al., 1998; Luyten et al., 1992; van Vliet et al., 1993). Das mechanische Verhalten wird in Texturanalysen untersucht. Zum Beispiel zeigten Halmos et al. (2003) ein geschwindigkeitsabhängiges Verhalten von Käse bei uniaxialen Kompressionsversuchen. Geschwindigkeitsabhängiges Verhalten von Käse liegt auch in Schneidversuchen mit Draht vor (Kamyab et al., 1998).

Die Temperatur des Lebensmittels hat einen ähnlichen Effekt auf das Verhalten wie die Belastungsgeschwindigkeit. Dieses Konzept ist bekannt als Zeit-Temperatur-Superposition. Es bedeutet, dass das Verhalten bei einer bestimmten Geschwindigkeit und Temperatur dem Verhalten bei einer anderen Geschwindigkeit entsprechen kann, wenn die Temperatur entsprechend angepasst wird (Cho & Lee, 1998; Schuldt, Schneider & Rohm, 2018). Nach Singh et al. (2006) kann dieses Konzept nur bei einfachen Materialien und über einen begrenzten Bereich angewandt werden. Dennoch deuten mehrere Forschungsergebnisse darauf hin, dass eine höhere Belastungsgeschwindigkeit oder eine niedrigere Temperatur bei den meisten Lebensmitteln zu einem größeren mechanischen Widerstand führen. Dies wurde zum Beispiel in Kompressionsversuchen bei Käse bei reduzierten Temperaturen (Culioli & Sherman, 1976) und für erhöhte Belastungsgeschwindigkeiten (Halmos et al., 2003) beobachtet.

Brown et al. (2005) untersuchten den Einfluss der Schnittgeschwindigkeit und der Temperatur auf die Schnittkräfte bei Käse, Bacon und Rindfleisch. Die Experimente wurden mit einer um 45° geneigten Klinge durchgeführt. Schnittgeschwindigkeit und Temperatur wurden in mehreren Stufen variiert. Die maximale Schnittgeschwindigkeit war 0,25 m/s. Die Temperaturen wurden in einem für die Verarbeitung dieser Lebensmittel üblichen Bereich variiert. Eine Geschwindigkeits- und Temperaturabhängigkeit der Schnittkräfte lag bei allen getesteten Lebensmitteln vor. Allerdings variierte die Stärke des Effekts. Bei Bacon war der Effekt nur unterhalb des Gefrierpunkts beobachtbar (Brown et al., 2005).

Schuldt, Schneider und Rohm (2018) haben die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Schnittkräfte für Lebensmittel unterschiedlicher Textur bis Geschwindigkeiten von 10 m/s untersucht. Sie verwendeten einen Versuchsaufbau mit gerader Klinge und

Lebensmittelproben mit rechteckigem Querschnitt. Die Versuche zeigten, dass höhere Schnittgeschwindigkeiten zu einem steiferen Verhalten der Lebensmittel führen. Dies kann bis zu einem spröden Verhalten führen, durch das die Probe bricht anstatt geschnitten zu werden (Schuldt, Schneider & Rohm, 2018). Das steifere Verhalten kann auch dazu führen, dass Deformation reduziert wird (Schuldt, Witt et al., 2018). Diese Ergebnisse sind im Einklang mit den Ergebnissen von Brown et al. (2005).

6.2.3.2 Reibkontakt

Reibungsphänomene bei Lebensmittel und ihre Beschreibung sind komplex. Mehrere Theorien können Anwendung finden (Michalski et al., 1997). Nach einer Übersicht von Michalski et al. (1997) sind die Wechselwirkungen im Reibkontakt von Lebensmitteln und Metall bestimmt durch mechanisches Verhaken, elektrostatische Adhäsion und chemische Adhäsion. Atkins et al. (2004) schlagen vor, Reibung in Form von Adhäsion beim Schneiden von Lebensmitteln zu berücksichtigen. Dafür muss die Kontaktfläche zwischen Lebensmittel und Klinge bekannt sein.

Reibungskräfte, wie von Brown et al. (2005) untersucht, sind geschwindigkeits- und temperaturabhängig. Der beobachtete Effekt beim Schneiden von Rindfleisch unterschied sich von dem Effekt beim Schneiden von Käse. Während der untersuchte Käse einen stabilen Anstieg der Reibkräfte zeigte, ist der gleiche Effekt bei Rindfleisch erst unterhalb des Gefrierpunkts zu beobachten. Das könnte mit den Ergebnissen von Schneider et al. (2002) erklärt werden. Deren Versuche zeigten eine Abhängigkeit des Reibverhaltens von der Textur der geschnittenen Lebensmittel. In dieser Studie wurden Schnittexperimente mit einer geraden Klinge bei $-0,02$ m/s durchgeführt. Homogene Lebensmittel mit einer klebrigen Textur zeigten einen stärkeren Einfluss der Reibungskräfte als Lebensmittel mit einer Muskelfaserstruktur.

Der Einfluss von hohen Schnittgeschwindigkeiten auf den Reibkontakt beim Schneiden von Lebensmitteln ist bisher nicht untersucht (Schuldt, Schneider & Rohm, 2018). Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die Wechselwirkungen zwischen Klinge und Lebensmittel im Reibkontakt beim Schneiden komplex sind. Die Phasen des Schnittprozesses in Abbildung 2.3 zeigen, dass der Reibkontakt zwischen Klinge und Lebensmittel beim Schneiden von Scheiben von dem Verformungsverhalten des Lebensmittels abhängt. Dies ist ein zusätzlicher Einfluss auf den Reibkontakt verglichen zu den beschriebenen Versuchsaufbauten in der Literatur.

Zusammenfassend hängen die auftretenden Reibkräfte beim Schneiden von Lebensmitteln von den Prozessparametern, den mechanischen Eigenschaften des Lebensmittels und der Messergestalt ab. Adhäsion kann zu einer schlechten Schnittqualität und einer erhöhten Verschmutzung der Klinge führen. Dies passiert, wenn

die adhäsiven Kräfte stärker sind als die kohäsiven Kräfte innerhalb des Lebensmittels (Schneider et al., 2002). Eine Verminderung der Reibkräfte kann daher die Schnittqualität erhöhen.

6.2.4 Zusammensetzung der Lebensmittel

Das Aufschneiden in Scheiben ist der letzte Prozessschritt vor dem Verpacken der Lebensmittel (Berk, 2018). Bevor Lebensmittel aufgeschnitten werden, haben sie eine Reihe von Verarbeitungsprozessen durchlaufen. Die mechanischen Eigenschaften der Lebensmittel sind daher das Resultat unterschiedlicher mechanischer und chemischer Prozessschritte. Mechanische Prozessschritte sind zum Beispiel Zerkleinerungs- oder Mischprozesse. Chemische Prozessschritte beinhalten unter anderem Reifungs- oder Kochprozesse.

Zur objektiven Beschreibung der Textur von Lebensmitteln wurden Eigenschaften und dazugehörige Messverfahren entwickelt. Ursprünglich sollte damit die sensorische Wahrnehmung von Lebensmitteln objektiviert werden (Szczeniak, 1963; Szczeniak et al., 1963).

Einflüsse der Lebensmittelzusammensetzung oder Parameter des Herstellungsprozesses auf die Textur wurde bereits in Studien untersucht. Zum Beispiel zeigten Bryant et al. (1995) den Einfluss des Fettanteils auf Härte, Elastizität, Adhäsion und Kohäsion. Watkinson et al. (2001) zeigten den Einfluss des pH-Wertes während der Reifung auf die mechanischen Eigenschaften. Everard et al. (2006) bestätigten die Ergebnisse in Bezug auf den Einfluss des pH-Werts. Barbut (2006) zeigte Änderungen in der Härte von Salami als Folge von Änderungen im Reifungsprozess auf.

Sowohl für Käse als auch für Fleischprodukte existieren weitere Studien zum Einfluss von chemischer Zusammensetzung, Feuchtigkeit, Fettgehalt und pH-Wert auf die Textureigenschaften des Lebensmittels. Aspekte wie die Ausrichtung von Muskelfasern oder lokale Fehlstellen können das mechanische Verhalten der Lebensmittel ebenso beeinflussen. Es ist daher zu erwarten, dass das Verhalten der Lebensmittel im Schnittprozess abhängig von dessen Herstellung ist.

6.2.5 Ansätze zur Modellierung des Schnittprozesses von Lebensmitteln

Es existieren zahlreiche Ansätze die Textureigenschaften von Lebensmitteln zu modellieren. Chen und Opara (2013) stellen eine Übersicht solcher Ansätze vor. Die Übersicht umfasst die abbildbaren Eigenschaften und die Lebensmittel, auf die die

Modelle angepasst wurden. Zum Beispiel können unterschiedliche Kombinationen von idealen Federn und Dämpfern, wie das Burgers Modell, genutzt werden. Bei hinreichender Parametrierung kann damit das Deformationsverhalten von Lebensmitteln abgebildet werden (Du & Tscheuschner, 1986). Solche Modelle werden in Simulationsmodellen mit verteilten Parametern eingesetzt um Deformation, kritische Spannungen und resultierende Schnittkräfte zu berechnen (Boisly et al., 2016; Lin & Lan, 2018; Vandenberghes et al., 2017). Das verwendete Materialmodell und wie es parametrierung wurde sind entscheidend für die Qualität dieser Simulationsmodelle.

Andere Arbeiten konzentrieren sich auf Eigenschaften des Messers, wie die Schärfe, und wie diese den Bruchprozess beim Schneiden beeinflussen (McCarthy et al., 2007; McCarthy et al., 2010; Terzano et al., 2018). Diese Modellierungsansätze können genutzt werden, um Erkenntnisse zur Bruchmechanik beim Schneiden von Lebensmitteln zu gewinnen. Bisher wurde keiner dieser FEM basierten Ansätze auf das Schneiden von Lebensmitteln mit Sichelmessern übertragen. Aktuell existieren noch keine geeigneten Materialmodelle für das Schneiden von Lebensmitteln mit hohen Schnittgeschwindigkeiten (Boisly et al., 2016). Dies schließt die bei Sichelmessern auftretenden Schnittgeschwindigkeiten mit ein. Wahrscheinlich wurden daher die Ansätze bisher nicht auf Sichelmesser übertragen.

Ein Ansatz mit konzentrierten Parametern und experimenteller Parametrierung, wie der von Atkins und Xu (2005), siehe Kapitel 2.3.4, erscheint daher zu diesem Zeitpunkt vielversprechender zur Vorhersage von Schnittkräften und der Festlegung von Prozess- und Gestaltparametern in industriellen Anwendungen als Ansätze mit verteilten Parametern.

6.2.6 Diskussion

Die vorgestellten Erkenntnisse zu Einflüssen auf das Schneiden von Lebensmitteln müssen unter den Randbedingungen des Schnittprozesses mit Sichelmessern betrachtet werden, um deren Übertragbarkeit zu bewerten. Für die industrielle Anwendung von Sichelmessern zum Aufschnitt von Lebensmitteln sind Erkenntnisse dann relevant, wenn sie zur Optimierung der Gestalt- und Prozessparameter genutzt werden können.

Für das Schneiden von Lebensmitteln sind die Effekte Bruch, Deformation und Reibung relevant, siehe Gleichung 6.1. Die Wirkung dieser Effekte ist das Resultat der Wechselwirkung zwischen Messer und Lebensmittel. Die Eigenschaften der Lebensmittel variieren und hängen von ihrer Zusammensetzung, den Verarbeitungsprozessen und weiteren Faktoren ab.

Nachfolgend werden die einzelnen Aspekte diskutiert.

6.2.6.1 Gestalt der Sichelmesser

Die Übertragbarkeit von Erkenntnissen ist aufgrund der Vielfalt an Lebensmitteln und Versuchsbedingungen nur eingeschränkt möglich. Zum Beispiel unterscheidet sich der Einfluss der Schärfe auf die Schnittkräfte für Käse und Fleischprodukte (Schuldt, Arnold et al., 2016). Daraus kann zunächst nur geschlossen werden, dass Sichelmesser zum Schneiden von Käse andere optimale Gestaltmerkmale haben als Sichelmesser zum Schneiden von Fleisch. Studien in der Forschung verwenden bisher symmetrische Klingen. Sichelmesser haben hingegen asymmetrische Klingen, siehe Kapitel 2.3.2. Ein weiteres Problem ist, dass mit Sichelmessern dünne Scheiben geschnitten werden. In der Forschung werden hingegen vor allem quadratische Proben halbiert. Daher bestehen keine Erkenntnisse wie sich die Klingenwinkel auf das Deformationsverhalten des Lebensmittels beim Schneiden von Scheiben auswirkt.

Bisherige Ergebnisse in Bezug auf das Zug/Druck-Verhältnis zeigten, dass die Schnittkräfte durch ein höheres Zug/Druck-Verhältnis reduziert werden können. Dieses Konzept ist bei Sichelmessern in die Gestalt integriert. Es existieren zudem Konzepte für Sichelmesser mit einem sich über die Länge der Schneide ändernden Zug/Druck-Verhältnis um die Beschleunigung der Scheiben zu optimieren (Reifenhäuser, 1989). Der Effekt einer wechselnden Schnittgeschwindigkeit auf den Reibkontakt und mögliche Wechselwirkungen mit dem Schneidenwinkel wurden bisher nicht untersucht.

6.2.6.2 Schnittgeschwindigkeit und Temperatur

Bisherige Studien zeigen, dass die Schnittgeschwindigkeit und die Temperatur das Materialverhalten der Lebensmittel verändern.

Die Ergebnisse von Schuldt, Schneider und Rohm (2018) zeigen, dass eine höhere Schnittgeschwindigkeit bei den untersuchten Lebensmitteln zu höheren Schnittkräften führte. Die in jener Studie getesteten Lebensmittel werden auch in Aufschnittmaschinen mit Sichelmessern verarbeitet. Eine Folge höherer Schnittkräfte kann sein, dass durch ein steiferes Materialverhalten die Schnittqualität erhöht wird (Schuldt, Witt et al., 2018). Allerdings wurden in dieser Studie keine Scheiben geschnitten, sondern Proben halbiert.

Um einer reduzierten Schnittqualität durch Deformation entgegenzuwirken könnte die Temperatur des Lebensmittels herabgesetzt werden, um die Steifigkeit zu erhöhen, vergleiche zum Beispiel Culioli und Sherman (1976). Allerdings beeinflusst die Veränderung der Temperatur des Lebensmittels auch das Bruch- und Reibverhalten (Brown et al., 2005).

Es sind keine quantitativen Aussagen aus den Studien für das Slicing möglich. Allerdings zeigen die hier vorgestellten Studien, dass sowohl die Schnittgeschwindigkeit als auch die Temperatur wichtige Prozessparameter sind, da diese das Verhalten der Lebensmittel beeinflussen.

6.2.6.3 Eigenschaften der Lebensmittel

Durch die große Vielfalt an Lebensmitteln, die in Slicern verarbeitet werden, ist es notwendig deren Eigenschaften quantitativ zu erfassen, um Vergleiche zwischen Studien zu ermöglichen.

Verschiedene Methoden zum Bestimmen der mechanischen Eigenschaften von Lebensmitteln existieren in der Literatur. Zur Messung viskoelastischer Eigenschaften wird die dynamische mechanische Analyse (DMA) eingesetzt. Diese wird in der Forschung zum Schneiden von Lebensmitteln, zum Beispiel von Schuldt, Schneider und Rohm (2018), eingesetzt und ist etabliert in der Rheologie (Gunasekaran & Ak, 2003).

Für das Schneiden von Lebensmitteln ist es notwendig weitere Methoden für die Charakterisierung von Lebensmitteln einzusetzen. In der Lebensmittelforschung und -entwicklung werden die Struktur und die Eigenschaften von Lebensmitteln als Textur bezeichnet. Die Textur wird durch messbare Größen beschrieben, die eingeführt wurden, um den sensorischen Eindruck von Lebensmitteln zu objektivieren

(Szczesniak et al., 1963). Die Textureigenschaften werden in der *texture profile analysis* (TPA) bestimmt. TPA ist ein verbreitetes Verfahren in der Lebensmittelindustrie (Chen & Opara, 2013). Es existieren allerdings diverse Methoden. Der Versuchsaufbau und die Durchführung sind häufig spezifisch für ein Lebensmittel oder eine Textureigenschaft. Chen und Opara (2013) vergleichen unterschiedliche Methoden für die Texturanalyse. Sie kommen zu dem Schluss, dass diese schwer zu vergleichen sind, da die Ergebnisse von der spezifischen Instrumentierung abhängen. Texturanalysen werden in der Forschung zum Schneiden von Lebensmitteln eingesetzt, um Gruppen mit ähnlichen Eigenschaften zu bilden.

Es wurden bisher keine TPA Methoden in Kombination mit der Untersuchung des Schnittprozesses von Sichelmessern eingesetzt. Die Studien zum Schneiden von Lebensmitteln und zu mechanischen Eigenschaften von Lebensmitteln zeigen, dass die experimentelle Untersuchung von Schnittprozessen idealerweise durch eine Quantifizierung der mechanischen Eigenschaften der Lebensmittel unterstützt werden sollte. Dies ist begründet durch den physikalischen Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften eines Lebensmittels und dessen Verhalten beim Schneiden.

6.2.6.4 Modelle des Schnittprozesses

Schnittkräfte sind in der Forschung eine weit verbreitete Mess- und Zielgröße der Modellierung. Schuldt, Boden et al. (2016) und Schuldt, Schneider und Rohm (2018) nutzen einachsige Schneidversuche mit gerader Klinge bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten und dynamisch mechanische Analyse (DMA), um die initialen Schnittkräfte und die Geschwindigkeitsabhängigkeit bei kleinen Verformungen vor Rissinitiation zu modellieren. Unabhängig von der Art der Modellierung wird ein Materialmodell der Lebensmittel benötigt. Aufgrund der fehlenden Materialmodelle und geringer Übertragbarkeit sind die vorgestellten Ansätze zur Modellierung von Schnittprozessen nicht besser geeignet als das Modell nach Atkins und Xu (2005). Ebenso ist eine Übertragung oder Integration dieser Modelle zu diesem Zeitpunkt nicht sinnvoll.

6.2.7 Zusammenfassung

Aufgrund der Unterschiede zwischen Experimenten zum Schneiden von Lebensmitteln und dem Slicing sind keine direkt übertragbaren Aussagen zum Slicing möglich. Die größten Unterschiede bestehen in der Geometrie der Messer, den Schnittgeschwindigkeiten und der Art des Schnittes. Die Ergebnisse zum Schneiden von Lebensmitteln deuten allerdings darauf hin, dass die Wechselwirkungen zwischen Sichelmesser und Lebensmittel einen Einfluss auf die Schnittkräfte haben. Zudem

beeinflussen Prozessparameter bei der Lebensmittelherstellung die Eigenschaften der Lebensmittel.

Aus den Erkenntnissen wird folgende Priorisierung der Parameter für die Untersuchung der GFZ von Sichelmessern abgeleitet:

- Schnittgeschwindigkeit
- Schneidenwinkel des Sichelmessers
- Temperatur des Lebensmittels
- Lebensmitteleigenschaften
- Schärfe des Sichelmessers

Mögliche Ausgangsgrößen für die Untersuchung der GFZ sind:

- Schnittkraftmessung
- Messung der Qualität von Scheiben und Portionen

Zusätzlich kann die Untersuchung der Zusammenhänge durch folgende Charakterisierungen unterstützt werden:

- Lebensmittelcharakterisierung
 - TPA
 - DMA
 - Reibwertbestimmung
 - Einachsige Schneidversuche
 - Chemische Analyse
- Messercharakterisierung
 - Geometriemessung
 - Schärfemessung

Die Teilforschungsfrage 2.1 ist damit beantwortet.

6.3 Experimentelle Untersuchung der Schnittkräfte beim Slicing

In Kapitel 2.3.4 wird das Schnittkraftmodell nach Atkins und Xu vorgestellt. Dieses Modell basiert auf der Annahme, dass die Schnittkräfte allein durch die Geometrie des Lebensmittels, der Krümmengeometrie der Schneide des Sichelmessers und der Bruchenergie des Lebensmittels bestimmt werden. Eine experimentelle Validierung dieses Modells ist nicht bekannt.

In diesem Kapitel wird die Bearbeitung der *Teilforschungsfrage 2.2* vorgestellt:

Hat die Drehzahl des Sichelmessers einen Einfluss auf die Schnittkräfte beim Slicen von Brühwurst und Kochschinken?

Aus den Ergebnissen der qualitativen Analyse des Prozesses unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus Veröffentlichungen zum Schneiden von Lebensmitteln folgt, dass die Drehzahl einen Einfluss auf den Schnittprozess haben sollte. Zudem ist ein Einfluss der Textur der Lebensmittel plausibel. In der im Folgenden vorgestellten Versuchsreihe wird daher die Drehzahl und die Textur des Lebensmittels variiert. Dafür werden ein homogenes und ein inhomogenes Fleischprodukt verwendet.

Mit den in der Versuchsreihe gewonnenen Daten zu Schnittkraftverläufen beim Schneiden mit Sichelmessern wird das Schnittkraftmodell nach Atkins und Xu validiert.

Ein weiterer untersuchter Aspekt sind die Phasen des Schnittprozesses. In Studien zum Schneiden von Lebensmitteln mit geraden Messern werden unterscheidbare Phasen beobachtet. Diese sind, wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben, eine Deformationsphase vor der Rissinitiation, eine Trennphase und eine Ablösephase. Aus dem Verlauf der Schnittkräfte schließen Schneider et al. (2002) auf die Anteile der wirkenden Effekte. Der Schnittkraftverlauf beim Schneiden mit Sichelmessern wurde bisher noch nicht experimentell untersucht. Die qualitative Analyse des Slicing zeigt, dass die Kontaktlänge zwischen Schneide und Lebensmittel während des Schnitts variiert. Dadurch existieren eine Eintrittsphase, in der die Kontaktlänge stetig zunimmt, und eine Austrittsphase, in der die Kontaktlänge stetig abnimmt. Der Verlauf der Schnittkräfte wird daher auf unterscheidbare Phasen hin untersucht.

Im Folgenden wird die Studie zur Untersuchung des Einflusses der Drehzahl auf die Schnittkräfte beim Schneiden von zwei Lebensmitteln mit unterschiedlicher Textur vorgestellt.

Dieses Kapitel basiert auf der Veröffentlichung:

- „*High-speed cutting with involute blades: Experimental research on cutting forces*“ (Bremer & Matthiesen, 2021)

Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung in übersetzter Form aus der Veröffentlichung übernommen. Sie werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.

6.3.1 Material und Untersuchungsmethode

6.3.1.1 Lebensmittel

Für die Schneideversuche werden Brühwurst und gekochter Schinken verwendet. Diese Fleischprodukte wurden ausgewählt, weil beide mit einem runden Querschnitt von $\varnothing 100$ mm Durchmesser erhältlich sind, im gleichen Temperaturbereich verarbeitet werden und sich in ihrer Textur unterscheiden. Beide Lebensmittel wurden für die Schneidversuche auf 0°C temperiert.

Brühwurst hat eine homogene Textur, da sie aus einem Brät hergestellt wird. Der Hauptbestandteile sind Fleisch, Wasser und emulgiertes tierisches Fett. Die Bestandteile werden stark zerkleinert. Im fertigen Produkt sind keine Muskelfaserstrukturen mehr erkennbar.

Kochschinken hingegen besteht aus verpressten Fleischstücken. Innerhalb der Stücke bleibt die Struktur der Muskelfasern mit unterschiedlichen Orientierungen erhalten. Die Textur von Kochschinken ist daher inhomogen.

6.3.1.2 Schnittkraftmessung

Die Schnittkraftmessungen wurden an einem modifizierten Dual Slicer 465 (GEA Food Solutions GmbH, Kempten, Deutschland) durchgeführt. Die Kurvengeometrie des Sichelmessers ist beschrieben durch eine archimedische Spirale. Der kleinste Radius der Spirale ist 244 mm. Der Radius nimmt über einen Winkel von 300° bis zum maximalen Radius von 470 mm zu. Die Schneidkante ist asymmetrisch mit einem Schneidenwinkel von 26° , einem Freiwinkel von 3° und einem Druckwinkel von 10° , siehe Kapitel 2.3.2 für die Definition der Klingewinkel.

Der Aufbau im modifizierten Dual Slicer 465 ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Die Anordnung zum Schneiden des Lebensmittels oder das Messer sind unverändert. Es wurden die nachfolgend beschriebenen Modifikationen vorgenommen.

Wie in Abbildung 6.6 dargestellt sind zwischen der Schneidleiste und der Schneidleistenaufnahme drei Kraftsensoren verbaut. Die Kraftsensoren sind KM 26 Kraftmessdosen mit einer Nennkraft von 500 N (ME-Meßsysteme GmbH, Henningsdorf, Deutschland). Die Zweipunktauflage auf den Kraftsensoren verhindert ein Verkippen der Schneidleiste in der Schneidleistenaufnahme. Eine Vorspannkraft wird auf die seitlich angebrachte, horizontale Kraftmessdose aufgebracht, um eine Kraftmessung in beide Richtungen zu ermöglichen. Auf die Kraftmessdosen unterhalb der Schneidleiste wirkt die Gewichtskraft der Schneidleiste als Vorspannkraft. Die Kraftmessung erfolgt mit einer Abtastrate von 10 kHz. Die Signale der Kraftmessung

werden mit einem Butterworth-Tiefpass-Filter fünfter Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 500 Hz gefiltert. Der Drehwinkel des Messers wird der Maschinensteuerung entnommen und aufgezeichnet. Die Interaktion zwischen Messer und Lebensmittel werden durch die Kraftmessung nicht beeinflusst.

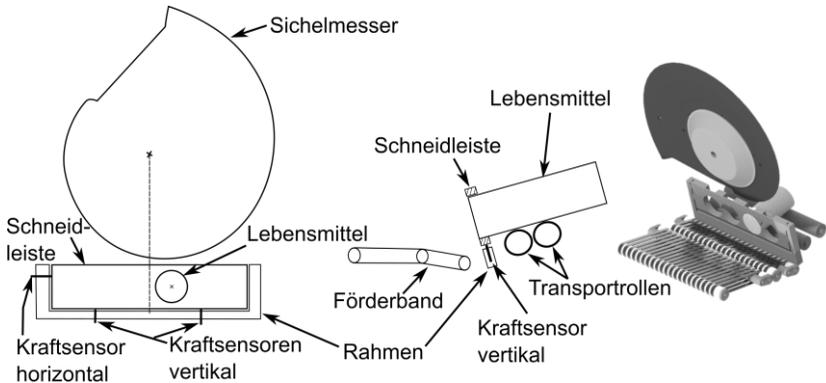


Abbildung 6.6: Messaufbau zum Messen der Schnittkräfte beim Schneiden mit einem Sichelmesser. Frontalansicht (links), Seitenansicht (mittig) und 3D-Ansicht (rechts). Übersetzt übernommen aus (Bremer & Matthiesen, 2021).

Testversuche zeigten ein periodisches Signal in der Kraftmessung im Frequenzbereich der Drehzahl des Sichelmessers. Die Ursache für dieses Signal ist die mechanische Kopplung des Messerantriebs mit dem Schneidleistenträger über den Maschinenrahmen des Dual Slicers. Dieses Signal wurde aus der Messung durch Überlagerung der Messdaten mit einem Referenzsignal eliminiert. Die Referenzmessung wurde über mehrere Umdrehungen ohne Schnitt aufgezeichnet und mit verschobener Phase mit dem Messsignal beim Schneiden überlagert. Nach dieser Nachbearbeitung der Signale verbleiben Schwankungen in der Kraftmessung, die bei einer Drehzahl von 600 U/min circa ± 1 N und bei 1200 U/min circa ± 3 N betragen. Die größere Beeinträchtigung bei höherer Drehzahl ist die Folge einer stärkeren Schwingungsanregung. Bei höheren Drehzahlen wirken sich die vorhandenen Unwuchten im Antriebsstrang, inklusive Sichelmesser, stärker aus.

Für jede Drehzahl- und Lebensmitteleinstellung werden exemplarische Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen gemacht, um zusätzliche Informationen über das Verhalten der Scheiben und der Lebensmittelstange während des Schnitts zu sammeln. Die Kamera ist in Fluchtrichtung zur Position des Lebensmittels ausgerichtet,

um den Schnittprozess möglichst frontal zu beobachten. Es wird ein iSpeed 221 Kamerasystem (iX Cameras, Rochford, Vereinigtes Königreich) verwendet. Zur Ausleuchtung werden zwei multi-Led QT+ Lampen (GSVitec GmbH, Bad Soden-Salmuenster, Deutschland) verwendet. Alle Aufnahmen werden mit 2000 Bildern pro Sekunde erstellt. Zwischen zwei Bildern bewegt sich das Messer daher bei 1200 U/min um $3,6^\circ$ und bei 600 U/min um $1,8^\circ$.

Mit dem in Abbildung 6.6 gezeigten Aufbau können bis zu vier Lebensmittelstangen parallel geschnitten werden, vergleiche Abbildung 2.2 auf Seite 23. Für die hier vorgestellten Experimente wird nur ein Lebensmittel in der in Abbildung 6.6 gezeigten Position der Schneidleiste geschnitten. Der nominelle Abstand zwischen dem Ausschnitt in der Schneidleiste und dem Drehzentrum des Sichelmessers ist 337,5 mm in vertikaler und 60 mm in horizontaler Richtung. In dieser Position wird der Ausschnitt in der Schneidleiste nach einer Drehung des Sichelmessers um $\Omega = 108^\circ$ von der Ausgangslage erreicht. Das ist der theoretische Eintrittspunkt des Messers. Bei einem Drehwinkel des Sichelmessers von $\Omega = 243^\circ$ hat die Schneide des Sichelmessers den Ausschnitt in der Schneidleiste komplett überquert. Dies ist der theoretische Austrittspunkt des Messers. Demnach findet der Schnitt während 135° der Messerumdrehung statt. Der Abstand zwischen der Spitze der Schneidkante des Sichelmessers, der nominellen Schnittebene und der Schneidleiste wird auf 0,1 mm eingestellt. Die Scheibendicke beträgt 1,2 mm und liegt damit im für Brühwurst und Kochschinken üblichen Bereich.

Die Ausgangslage des Messers, 0° Drehwinkel, ist definiert als der Drehwinkel, in dem der kleinste Radius der Sichel senkrecht unter dem Drehpunkt des Sichelmessers steht. Siehe auch Abbildung 2.5 auf Seite 29 für die Definition des Drehwinkels.

Es werden zwei Drehzahlen untersucht. Eine langsame Einstellung, 600 U/min, und eine schnelle Einstellung, 1200 U/min. Die in Kapitel 6.2 vorgestellten experimentellen Studien zeigen große Streuungen in den Kraftmessdaten. Daher wird eine Wiederholungszahl von 30 Schnitten für jedes Lebensmittel und jede Drehzahleinstellung festgelegt. Die 30 Schnitte werden aufeinanderfolgend durchgeführt.

Zur Auswertung der Messdaten werden die durchschnittliche und maximale Schnittkraft während des Schnittes für alle 30 Schnitte berechnet. Für jeden Wert werden die Mittelwerte (MW) und Varianzkoeffizienten (VK) berechnet.

6.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind wie folgt strukturiert. Zunächst werden die gemessenen Schnittkraftverläufe vorgestellt. Danach werden die Ergebnisse der Hochgeschwindigkeits-

Videoaufnahmen gezeigt. Abschließend werden die mit dem Schnittkraftmodell nach Atkins und Xu berechneten Schnittkraftverläufe vorgestellt.

6.3.2.1 Schnittkraftverläufe

Für jede Einstellung werden 30 aufeinanderfolgende Schnitte ausgewertet. Abbildung 6.7 zeigt die Mittelwertkurven der Schnittkraftverläufe und Abbildung 6.8 zeigt alle Schnittkraftverläufe für Brühwurst und Kochschinken bei 600 U/min und 1200 U/min. Positive Kraftwerte entsprechen einer Druckkraft auf die Kraftmessdose. Die Schnittkraftverläufe sind über den Bereich von 135° Drehwinkel des Messers aufgetragen. Wie bereits beschrieben tritt das Messer bei $\Omega = 108^\circ$ in das Lebensmittel ein und bei $\Omega = 243^\circ$ aus dem Lebensmittel aus. Die Schnittkraft ist in Abbildung 6.8 bei 600 U/min und 1200 U/min unterschiedlich skaliert, da die Schnittkräfte in einzelnen Versuchen bei der höheren Drehzahl größer sind.

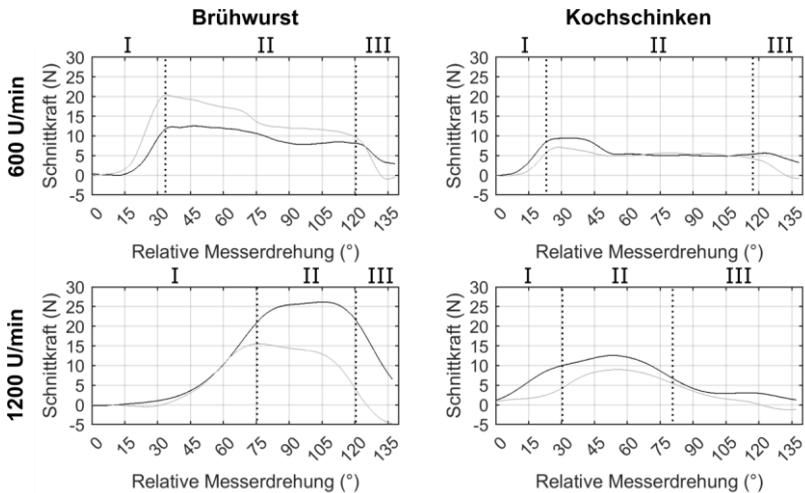


Abbildung 6.7: Mittelwertkurven der Schnittkraftverläufe beim Slicing von Brühwurst und Kochschinken bei 600 U/min und 1200 U/min. Schwarze Linien entsprechen den Schnittkräften in horizontaler Richtung. Graue Linien entsprechen den Schnittkräften in vertikaler Richtung. Gestrichelte Linien markieren die beispielhaften Grenzen zwischen den Abschnitten der Schnitte. Übersetzt übernommen aus (Bremer & Matthiesen, 2021).

Die Schnittkräfte unterscheiden sich für die verschiedenen Einstellungen in der Größe, dem Verlauf und der Streuung. Nur bei Brühwurst mit der Drehzahl

600 U/min sind die Schnittkräfte in vertikaler Richtung größer als die in horizontaler Richtung. Die Drehzahl hat einen Einfluss auf die Schnittkräfte in beiden Richtungen. Der Einfluss der Drehzahl auf die Schnittkräfte in horizontaler Richtung ist größer.

Die Schnittkraftverläufe können, wie in Abbildung 6.7 und Abbildung 6.8 eingezeichnet, in drei Abschnitte unterteilt werden. Im ersten Abschnitt (I) steigen die Schnittkräfte nichtlinear an. Der Anstieg der Schnittkräfte ist verzögert in Bezug auf den Eintrittswinkel des Sichelmessers. Im zweiten Abschnitt (II) sind die Schnittkräfte entweder konstant oder oszillieren um einen Mittelwert oder einen langsam abnehmenden Wert. Im dritten Abschnitt (III) nehmen die Schnittkräfte wieder ab. Der dritte Abschnitt endet mit dem Austritt des Sichelmessers aus dem Lebensmittel.

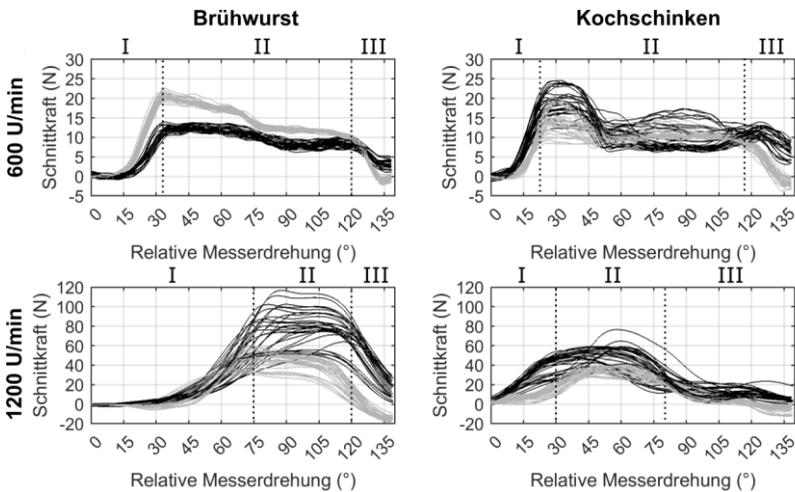


Abbildung 6.8: Schnittkraftverläufe beim Slicing von Brühwurst und Kochschinken bei 600 U/min und 1200 U/min. Schwarze Linien entsprechen den Kräften in horizontaler Richtung. Graue Linien entsprechen den Schnittkräften in vertikaler Richtung. Gestrichelte Linien markieren die beispielhaften Grenzen zwischen den Abschnitten der Schnitte. Übersetzt übernommen aus (Bremer & Matthiesen, 2021).

Für Brühwurst bei 600 U/min ist die geringste Streuung in den Schnittkräften zu beobachten. Sowohl die Größe der Schnittkräfte als auch deren Verlauf ähneln sich bei allen Schnitten. Bei 1200 U/min sind im Vergleich zum Verlauf bei 600 U/min Abschnitt I verlängert und Abschnitt II verkürzt. Zudem streuen die Verläufe stärker. Daher ist eine einheitliche Definition der Abschnittsgrenzen nicht möglich.

Kochschinken bei 600 U/min zeigt beim Übergang zwischen Abschnitt I und Abschnitt II ein Maximum in der Schnittkraft. Für Kochschinken bei 1200 U/min steigen die Schnittkräfte direkt bei Eintritt des Sichelmessers an. Nur bei dieser Einstellung ist keine Verzögerung im Kraftanstieg zu beobachten. Für Kochschinken bei 1200 U/min scheint zudem Abschnitt II im Vergleich zu 600 U/min verkürzt zu sein. Wegen der großen Streuung, siehe Abbildung 6.8, ist kein klarer Trend zu erkennen.

Die Ergebnisse der durchschnittlichen und maximalen Schnittkraft diskreter Werte für die Schnittkräfte sind in Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 aufgeführt.

Tabelle 6.1: Mittelwerte (MW) und Varianzkoeffizienten (VK) der gemessenen Schnittkräfte in horizontaler Richtung. Übersetzt übernommen aus (Bremer & Matthiesen, 2021).

Lebensmittel	Drehzahl (U/min)	Schnittkraft in horizontaler Richtung (N)			
		Durchschnitt		Maximum	
		MW	VK	MW	VK
Brühwurst	600	7.71	9%	12.69	6%
	1200	37.36	19%	80.14	22%
Kochschinken	600	10.74	9%	19.64	14%
	1200	26.02	11%	52.46	17%

Tabelle 6.2: Mittelwerte (MW) und Varianzkoeffizienten (VK) Werte der gemessenen Schnittkräfte in vertikaler Richtung. Übersetzt übernommen aus (Bremer & Matthiesen, 2021).

Lebensmittel	Drehzahl (U/min)	Schnittkraft in vertikaler Richtung (N)			
		Durchschnitt		Maximum	
		MW	VK	MW	VK
Brühwurst	600	11.12	3%	20.44	4%
	1200	18.25	11%	47.58	18%
Kochschinken	600	8.38	4%	15.21	15%
	1200	14.80	6%	37.45	17%

Bei 1200 U/min sind die Mittelwerte und die Variationskoeffizienten der durchschnittlichen horizontalen und vertikalen Schnittkräfte größer als bei 600 U/min. Gleiches gilt für die Mittelwerte und Varianzkoeffizienten der maximalen Schnittkräfte in beiden Richtungen. Dieser Effekt ist bei Brühwurst ausgeprägter. Das Verhältnis des Mittelwerts der durchschnittlichen Schnittkraft in horizontaler Richtung zum Mittelwert der durchschnittlichen Schnittkraft in vertikaler Richtung ist für beide Lebens-

mittel bei höherer Drehzahl größer. Diese Ergebnisse deuten auf ein geschwindigkeitsabhängiges Verhalten des Schnittprozesses hin. Diese Geschwindigkeitsabhängigkeit ist ein Zeichen dafür, dass das Schnittkraftmodell nach Atkins und Xu basierend auf einer konstanten Bruchenergie unzureichend ist, um die Schnittkräfte zu beschreiben.

6.3.2.2 Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen des Schnittprozesses

Für jede Drehzahl- und Lebensmitteleinstellung werden exemplarische Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen erstellt. Bildausschnitte bei unterschiedlichen Messerpositionen sind für jede Drehzahl- und Lebensmitteleinstellung in Abbildung 6.9 dargestellt.

Das erste Bild jeder Reihe von Bildausschnitten ist der Zeitpunkt des initialen Kontakts zwischen Schneide und Lebensmittel. Die weiteren Bilder zeigen die Positionen des Sichelmessers bei 11° , 47° und 118° relativ zum Eintrittswinkel $\Omega = 108^\circ$. Damit ist ein Großteil des Schnitts in den Bildern zu sehen.

Die Schneide des Sichelmessers ist während des Schnitts nahezu horizontal ausgerichtet. Dementsprechend ist der erste Kontakt zwischen Schneide und Lebensmittel am obersten Punkt des Querschnitts. Während des Schnitts wird die Scheibe vom Sichelmesser in Richtung des Förderbands gedrückt. Dies ist am deutlichsten bei der 11° Position zu sehen.

Bei den Positionen 47° und 118° sind Unterschiede im Verhalten der Scheiben zu sehen. Die Brühwurst-Scheiben lösen sich gleichmäßig vom Sichelmesser und bleiben formstabil. Die Kochschinken-Scheiben hingegen neigen zu Verformung während des Schnitts. Diese Deformation ist bei 1200 U/min größer als bei 600 U/min, siehe Abbildung 6.9: Bilder bei 118° .

Bei Brühwurst ist zu erkennen, dass die Scheibe sich bei 1200 U/min während des Schnitts weiter nach links bewegt als bei 600 U/min.

Durch Vergleich der ersten drei Bilder, Eintrittszeitpunkt, 11° und 47° , ist zu erkennen, dass der Querschnitt der Brühwurst den Ausschnitt in der Schneidleiste auf der linken Seite nicht vollständig ausfüllt. Im Verlauf des Schnittes wird die bei Eintritt deutlich erkennbare Lücke kleiner. Die ungeschnittene Brühwurst wird demnach während des Schnittes deformiert.

Trotz des Unterschieds in der Drehzahl ist kein Unterschied im Fallen der Scheibe, sowohl bei der Brühwurst als auch beim Kochschinken, zu erkennen. Die Scheiben bei 1200 U/min sind ungefähr auf der gleichen Position wie die bei 600 U/min. Da

die Bilder zu einer bestimmten Messerposition gehören, ist die Zeit zwischen zwei Bildern bei 1200 U/min halb so lang wie bei 600 U/min. Folglich muss die Beschleunigung und damit die Geschwindigkeit der Scheibe bei 1200 U/min größer sein als bei 600 U/min. Dies kann sich auf das Auftreffverhalten der Scheibe auf dem Förderband auswirken.

Neben dem Verhalten der Scheibe kann anhand der Bilder auch die Schnittfläche betrachtet werden. Bei beiden Drehzahlen ist sichtbar, dass sich aus der Schnittfläche des Kochschinkens einzelne Fasern gelöst haben. Dieser Effekt ist bei 1200 U/min größer als bei 600 U/min, was an der stärkeren Verschmutzung der Schneidleiste links vom Lebensmittel erkennbar ist. Insgesamt wird hier auch eine stärkere Verschmutzung des gesamten Schneidraums des Slicers beobachtet. Bei der Brühwurst sind auf der Schnittfläche bei beiden Drehzahlen leichte Vorschubmarken erkennbar.

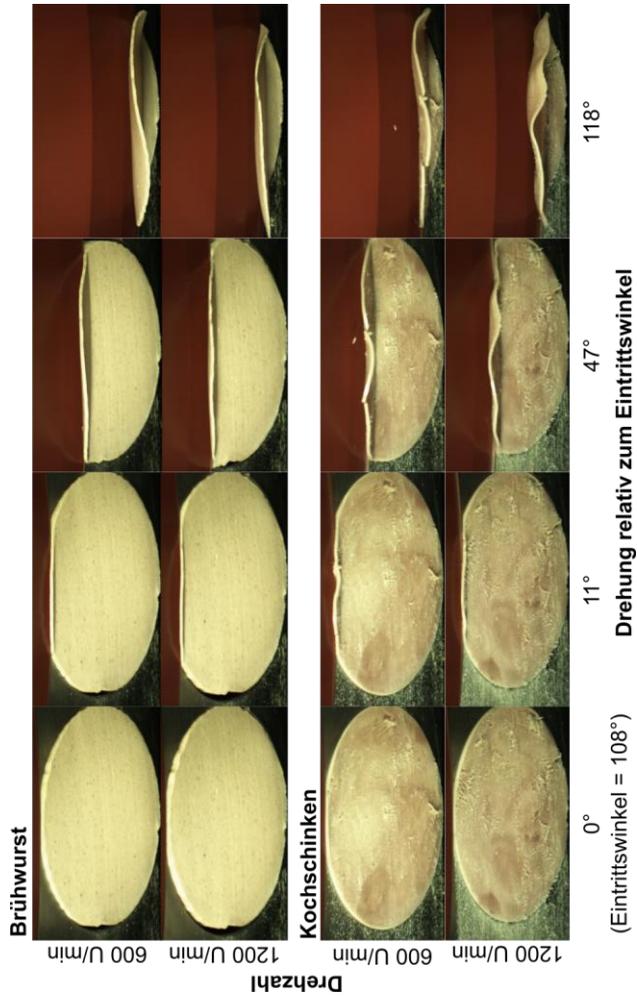


Abbildung 6.9: Bilder des Deformations- und Ablöseverhalten von Scheiben beim Schneiden mit einem Sichelmesser. Übersetzt übernommen aus (Bremer & Matthiesen, 2021).

6.3.2.3 Berechnete Schnittkraftverläufe

Der Schnittkraftverlauf wird mit dem Schnittkraftmodell nach Atkins und Xu, siehe Kapitel 2.3.4, mit $R = 150 \text{ J/m}^2$ als Bruchenergie berechnet. Die Schnittkräfte wurden inkrementell mit einer Auflösung von $0,5^\circ$ für die Positionen des Sichelmessers berechnet. Der Wert für R wurde geschätzt. Dabei wurde auf die Referenzwerte in der Veröffentlichung von Atkins et al. (2004) zurückgegriffen, in der ein ähnliches Lebensmittel untersucht wurde. Als Werte für die Geometrie der Lebensmittel und des Messers werden die nominellen Abmessungen verwendet, siehe Kapitel 6.3.1. Der berechnete Schnittkraftverlauf ist in Abbildung 6.10 dargestellt. Aus der Berechnung ergeben sich ein Eintrittswinkel von $\sim 108,6^\circ$ und ein Austrittswinkel von $\sim 246,5^\circ$. Dies entspricht näherungsweise den an der Maschine erfassten Werten von 108° und 245° . Die Schnittkräfte werden entsprechend der in Kapitel 2.3.4 aufgeführten Gleichungen berechnet und in das Y-Z-Koordinatensystem in Abbildung 2.5 auf Seite 29 transformiert. Damit die Richtung der Kräfte gleich ist mit der Darstellung in Abbildung 6.7 und Abbildung 6.8, werden die Kräfte positiv im Graph aufgetragen. Dies entspricht den Druckkräften auf den Kraftmessdosen.

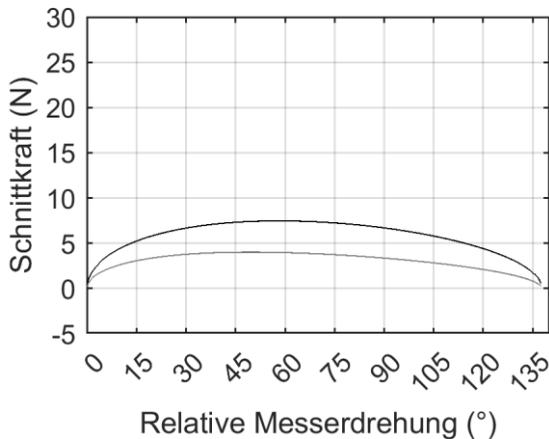


Abbildung 6.10: Berechneter Schnittkraftverlauf für das Schneiden eines runden Lebensmittels mit einem Sichelmesser. Bruchenergie des Lebensmittels ist $R = 150 \text{ J/m}^2$. Die schwarze Linie entspricht der Kraft in horizontaler Richtung. Die graue Linie entspricht der Kraft in vertikaler Richtung. Übersetz übernommen aus (Bremer & Matthiesen, 2021).

Die Schnittkräfte in horizontaler Richtung sind nach der Berechnung größer als die in vertikaler Richtung. Die durchschnittliche Kraft ist 5,81 N in horizontaler Richtung und 3,06 N in vertikaler Richtung. Die maximal auftretende Schnittkraft ist 7,46 N in horizontaler Richtung und 4,01 N in vertikaler Richtung. Die Vorhersage der Schnittkräfte mit dem Berechnungsmodell ist linear proportional zur verwendeten Bruchenergie. Ansonsten sind die berechneten Kraftwerte ausschließlich von der verwendeten Geometrie abhängig. Die Drehzahl hat keinen Einfluss auf das Berechnungsergebnis, da diese in den Gleichungen gekürzt werden kann.

Die Unterschiede in den Verläufen der Schnittkraft und den Einfluss der Drehzahl zeigen, dass es keinen Wert für R gibt, für den die berechneten Schnittkräfte eine zufriedenstellende Abbildung der gemessenen Schnittkräfte sind. Darum zeigt Abbildung 6.10 als Beispiel nur die Berechnungsergebnisse mit einem Wert für R .

6.3.3 Diskussion

6.3.3.1 Einfluss der Schnittgeschwindigkeit

Bei einer höheren Drehzahl des Sichelmessers ist die Schnittgeschwindigkeit größer als bei einer niedrigeren Drehzahl. Die größeren Schnittkräfte bei 1200 U/min entsprechen daher dem erwarteten geschwindigkeitsabhängigen Verhalten von viskoelastischen Materialien. Dies unterstützt die Ergebnisse von Schuldt, Schneider und Rohm (2018), die ebenfalls einen geschwindigkeitsabhängigen Anstieg der maximalen Schnittkräfte bei ähnlichen Fleischprodukten zeigen. Diese Versuche wurden allerdings mit einer geraden Klinge und einem Schnitt mittig durch eine quadratische Probe durchgeführt. Die Schnittgeschwindigkeit betrug bis zu 10 m/s.

6.3.3.2 Einfluss der Textur

Die Ergebnisse der Kraftmessung bestätigen den vermuteten Einfluss der Textur der Lebensmittel auf die Schnittkräfte. Die hier beobachteten Unterschiede entsprechen den Unterschieden in den charakteristischen Kraftverlauf-Profilen von Schneider et al. (2002). Diese haben in Schneidversuchen mit gerader Klinge bei einer Schnittgeschwindigkeit von 1000 mm/min ebenfalls einen gleichmäßigeren Verlauf der Schnittkraft bei homogenen Lebensmitteln im Vergleich zu Lebensmitteln mit Muskelfasern beobachtet.

Die größeren Schnittkräfte, die für gekochten Schinken im Vergleich zu Brühwurst erforderlich sind, könnten auf eine höhere Widerstandsfähigkeit der intakten Muskelfasern zurückzuführen sein. Die inhomogene Struktur des Kochschinkens, insbesondere die wechselnde Orientierung der Muskelfasern, könnte die höhere Varianz des gekochten Schinkens bei 600 U/min erklären. Dennoch übertreffen die für Brühwurst auftretenden Schnittkräfte bei 1200 U/min die auftretenden Schnittkräfte für Kochschinken. Eine plausible Erklärung hierfür wäre der erhöhte Einfluss von Reibung und Verformung. Zu diesem Punkt ist weitere Forschung notwendig. Ein Beispiel dafür sind zusätzliche Versuche an einer Aufschnittmaschine, gepaart mit einachsigen Schnittversuchen und dynamisch-mechanischer Analyse, wie von Schuldt, Schneider und Rohm (2018) vorgestellt. Zudem ist eine gezielte Untersuchung der Reibung zwischen Lebensmitteln und Sichelmessern erforderlich.

6.3.3.3 Verlauf der Schnittkräfte und Verhalten der Scheiben

Wie in Abbildung 6.8 dargestellt, unterscheiden sich die Verläufe der Schnittkräfte stark. Daher konnten keine bestimmten Werte zur quantitativen Ermittlung und Auswertung der drei Abschnitte gefunden werden. Die Abschnitte sind in allen Versuchen ähnlich über den qualitativen Verlauf zu finden. Die Abschnitte unterscheiden

sich eindeutig bezüglich der Dauer, der Größe der Schnittkraft und der Änderungsrate der Schnittkraft.

Die Abschnitte stimmen nicht mit den Phasen des Schnittvorgangs überein, die für das Schneiden mit gerader Klinge in der Literatur definiert wurden. Insbesondere die initiale Phase, auf die sich zahlreiche Veröffentlichungen (Schneider et al., 2002; Schuldt, Arnold et al., 2016; Schuldt, Boden et al., 2016; Schuldt, Schneider & Rohm, 2018) zum Schneiden mit gerader Klinge fokussieren, ist nicht in den Verläufen erkennbar. Beim Schneiden mit gerader Klinge und quadratischen Proben ist bei Initiation des Schnittes der komplette Lebensmittelquerschnitt in einem Linienkontakt belastet. Aufgrund der Krümmung des Lebensmittelquerschnitts und des Sichelmessers besteht bei Eintritt des Sichelmessers in das Lebensmittel nur ein Punktkontakt. Daher ist zu erwarten, dass die Dauer der Initiation des Schnittes sehr kurz ist und die dabei auftretenden Schnittkräfte zu klein sind, um mit dem hier verwendeten Aufbau messbar zu sein. Das deutet darauf hin, dass die Initiation des Schnittes beim Schneiden mit Sichelmessern von geringerer Bedeutung ist als beim Schneiden mit gerader Klinge. Durch den initialen Punktkontakt ist zu erwarten, dass die lokale Belastung schneller steigt und der Schnitt früher initiiert wird. Dies führt insgesamt wiederum zu geringeren Schnittkräften bei Initiation des Schnittes.

Die Schnittkräfte zeigen bei allen Versuchen, außer bei Kochschinken bei 1200 U/min, einen zum Eintrittszeitpunkt des Sichelmessers verzögerten Anstieg der Schnittkräfte.

Ein Grund für diese Verzögerung ist, dass die Lebensmittel eine größere Toleranz für den Außendurchmesser haben als der Ausschnitt in der Schneidleiste, der mit $\varnothing 100 \text{ mm} + 0,5 \text{ mm}$ toleriert ist. Lebensmittel mit einem nominellen Durchmesser von 100 mm haben typischerweise eine Toleranz von $\pm 1\text{-}2 \text{ mm}$. Ein kleinerer Durchmesser des Lebensmittels führt zu einem Spalt zwischen dem Lebensmittel und der Schneidleiste in horizontaler Richtung. Wenn Schnittkräfte in horizontaler Richtung auf das Lebensmittel wirken, führt dies dazu, dass zunächst das Lebensmittel verschoben wird, bis es an der Schneidleiste anliegt. Wie in den Ergebnissen anhand der Bilder zu Brühwurst in Abbildung 6.9 beschrieben wurde, können auch Defekte in den Lebensmittelstangen zu Lücken zwischen Lebensmittel und Schneidleiste führen. In diesem Fall wird das Lebensmittel zunächst deformiert, bis es vollständig an der Schneidleiste anliegt. Es ist zu erwarten, dass der Einfluss dieses Effekts auf den Verlauf der Schnittkräfte von der Festigkeit des Lebensmittels abhängt. Beide Fälle können zu einer Verzögerung in der Messung der Schnittkräfte führen. Dies erschwert die Interpretation der Messdaten im Anfangsbereich des Schnittes, da ein zeitlicher Versatz zwischen der Messung und dem Auftreten der Schnittkräfte besteht. Bei Brühwurst bei 600 U/min, siehe Abbildung 6.8, werden immer zuerst

Schnittkräfte in vertikaler Richtung gemessen, bevor Schnittkräfte in horizontaler Richtung gemessen werden können. Dies spricht ebenso für die Annahme, dass eine horizontale Verschiebung durch einen Abstand zwischen Lebensmittel und Schneidleiste die horizontale Messung verzögert. Die Lebensmittel liegen in vertikaler Richtung stets auf der Schneidleiste auf. Das Auftreffen des Lebensmittels auf die Schneidleiste und die durch die Abbremsung entstehenden Kräfte könnten eine Ursache für die teilweise zu beobachtende initiale Spitze in der horizontalen Schnittkraft sein.

Obwohl es deutliche Unterschiede in den Schnittkräften zwischen Brühwurst bei 600 U/min und 1200 U/min gibt, sind in den Bildern des Schnittprozesses bei 47°, siehe Abbildung 6.9, keine Unterschiede erkennbar. Dies deutet darauf hin, dass die Ursache der höheren Schnittkräfte in der Wechselwirkung zwischen Sichelmesser und Lebensmittelstange liegen und sich nicht auf den bereits geschnittenen Teil der Scheibe auswirken. Obwohl bei 1200 U/min ein steiferes Materialverhalten der Brühwurst angenommen wird, ist der Anstieg der gemessenen Schnittkraft bezogen auf die Messerposition stärker verzögert als bei 600 U/min. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Brühwurst als Feder-Dämpfer-System in der Kraftmessung wirkt. Ebenso könnte die höhere Geschwindigkeit das Verhalten der Brühwurst bei der Initiation des Schnittes verändern und dadurch die initialen Schnittkräfte senken. Der spätere Anstieg der Schnittkräfte könnte dann mit zunehmenden Reibungskräften erklärt werden. Reibungskräfte sind auch eine plausible Erklärung für die Verschiebung der Scheibe in horizontaler Richtung in Abhängigkeit der Drehzahl, siehe Abbildung 6.9.

Die höheren durchschnittlichen Schnittkräfte bei 1200 U/min deuten auf eine Wechselwirkung von Deformations- und Reibungsverhalten hin. Eine mögliche Erklärung für die höheren Kräfte sind größere Kräfte auf den Reibkontakt durch die höhere kinematische Energie des Sichelmessers und ein wahrscheinlich steiferes Materialverhalten der Scheibe. Das in den Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen beobachtete Verhalten der Scheiben, siehe Abbildung 6.9, unterstützt die Annahme einer stärkeren Wechselwirkung zwischen Scheibe und Sichelmesser. Die Scheibe wird nach vorne gedrückt, während sie abgetrennt wird. Der bereits abgetrennte Teil der Scheibe wird zusätzlich durch die Schwerkraft beschleunigt. Das Fallen der Scheibe beeinflusst wahrscheinlich den Kontakt zwischen Scheibe und Sichelmesser.

Die in den Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen beobachtete Wellenform der Kochschinken-Scheiben deutet ebenfalls auf Effekte im Reibkontakt zwischen Sichelmesser und Scheibe hin. Durch den Reibkontakt wird das Lebensmittel zunächst komprimiert. Mit zunehmendem Schnitt wird die Scheibe von der restlichen

Lebensmittelstange getrennt und löst sich vom Sichelmesser. Die durch die Deformation elastisch gespeicherte Energie kann durch das Abtrennen der Scheibe nun als Verformung abgebaut werden, da dann ein zusätzlicher Freiheitsgrad in der Scheibe vorhanden ist. Als Konsequenz wellt sich die Scheibe. Die Textur des Kochschinkens könnte diesen Effekt begünstigen, da eine unterschiedliche Ausrichtung von Muskelfasern auch zu einem unterschiedlichen Reibverhalten und inhomogener Deformation führen sollte.

Die Zunahme der Streuung bei den Versuchen mit 1200 U/min könnte durch eine stärkere dynamische Anregung des Lebensmittels verursacht werden. Die Zeit zwischen dem Schneiden von zwei Scheiben ist bei 1200 U/min halb so groß wie bei 600 U/min. Es ist daher möglich, dass das Lebensmittel bei 1200 U/min noch schwingt, wenn das Sichelmesser wieder eintritt, während es bei 600 U/min bereits wieder zur Ruhe gekommen ist. Es ist auch eine stärkere Anregung aufgrund der höheren kinematischen Energie des Sichelmessers bei 1200 U/min anzunehmen. Der Einfluss der Drehzahl auf die Varianzkoeffizienten ist bei Brühwurst höher. Grund könnte eine stärkere Kompression der Brühwurst sein.

Eine Erklärung für den Verlauf der Schnittkräfte ist der sich ändernde Kontakt zwischen Sichelmesser und Lebensmittel. Die Länge der Schneidkante im Eingriff mit dem Lebensmittel ändert sich während des gesamten Schnittes. Dadurch ändert sich die erzeugte Schnittfläche mit dem Drehwinkel. Der initiale Kontakt zwischen Sichelmesser und Lebensmittel nimmt zunächst zu. Basierend auf den nominellen Geometrien kann die Länge des Eingriffs berechnet werden, siehe Kapitel 2.3.4. Die Kontaktlänge ist ungefähr bei 73° relativ zum Eintrittswinkel maximal. An diesem Punkt ist die Kontaktlänge aufgrund der Sichelgeometrie des Messers etwas größer als der Durchmesser des Lebensmittels. Nach diesem Punkt nimmt die Kontaktlänge wieder ab. Das Schnittkraftmodell nach Atkins und Xu (2005) basiert auf der erzeugten Schnittfläche ausgehend von der Kontaktlänge zwischen Schneidkante und Lebensmittel. Entsprechend nimmt die berechnete Kraft zu bis zum Punkt der maximalen Änderung der Schnittfläche und nimmt dann wieder ab. Da die Erzeugung der Schnittfläche einen Anteil an der Schnittkraft hat, siehe Gleichung 6.1, ist der Abfall der Kräfte in Abschnitt III erwartet. Allerdings betragen die Kräfte bei Austritt des Sichelmessers aus dem Lebensmittel in vielen Fällen nicht 0 N. In vertikaler Richtung nehmen die Kräfte häufig negative Werte an. Dieser Vorzeichenwechsel bedeutet, dass die Kräfte in die entgegengesetzte Richtung wirken. Die Kraftmessdosen unterhalb der Schneidleiste werden entlastet. Aufgrund des Aufbaus der Kraftmessung werden alle an der Schneidleiste gemessenen Kräfte durch die Lebensmittelstange übertragen. Eine direkte Krafteinleitung durch das Sichelmesser ist ausgeschlossen. Daher ist es plausibel, dass die gemessenen Kräfte bei Austritt

der Schneide aus dem Lebensmittel durch einen Reibkontakt zwischen der Rückseite des Sichelmessers und der Querschnittsfläche des Lebensmittels verursacht werden. Wie in Abbildung 6.9 gezeigt, ist die Schneidleiste auf der linken Seite des Lebensmittels mit einem dünnen Film von Lebensmittelabrieb verschmutzt. Das hier verwendete Sichelmesser hat einen Freiwinkel von 3° . Dieser Freiwinkel hat den Zweck, den Reibkontakt auf der Rückseite des Sichelmessers zu reduzieren oder ganz zu verhindern. Die Ergebnisse deuten allerdings darauf hin, dass ein Kontakt zwischen Lebensmittel und Sichelmesser entsteht. Für die Gestaltung der Sichelmesser kann dies bedeuten, dass ein Freiwinkel von 3° bei diesen Lebensmitteln nicht ausreichend ist, um den Reibkontakt auf der Rückseite des Sichelmessers zu verhindern. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um den Effekt der Reibung von den dynamischen Effekten auf die Kraftmessung zu trennen. Eine Möglichkeit zur Untersuchung ist der Nachweis des Reibkontaktes durch einfache Analysemethoden. Zum Beispiel durch das Auftragen von Farbe auf die Rückseite des Sichelmessers und eine Analyse des Abriebs durch das Schneiden.

Die gemessenen Schnittkräfte in horizontaler Richtung sind bei fast allen Versuchen größer als die in vertikaler Richtung. Einzige Ausnahme ist Brühwurst bei 600 U/min. Zudem ist der Effekt der Geschwindigkeitsabhängigkeit in vertikaler Richtung größer. Das Schnittkraftmodell nach Atkins und Xu sagt korrekt größere Schnittkräfte in horizontaler Richtung vorher. Ursache dafür ist die Orientierung der Schneidkante. Die Schnittgeschwindigkeit in horizontaler Richtung ist bestimmt durch die Umfangsgeschwindigkeit und damit der Drehzahl. Die Schnittgeschwindigkeit in vertikaler Richtung ist bestimmt durch die Zunahme des Radius durch die Sichelgeometrie der Schneidkante. Da die Schnittkräfte mit der Geschwindigkeit zusammenhängen, siehe Brown et al. (2005), erklärt dies den größeren Einfluss der Drehzahl auf die Schnittkräfte in horizontaler Richtung. Die Richtung, in die die größeren Schnittkräfte wirken, ist allerdings abhängig von der Orientierung der Schneidkante zu den Kraftmessdosens. Es ist zu erwarten, dass sich die Aufteilung der Schnittkräfte bei anderen Anordnungen oder anderen Geometrien von Lebensmittel und Sichelmesser ändert.

Die beobachteten Schnittkräfte für Brühwurst bei 600 U/min zeigen ein außergewöhnliches Verhalten. Die Schnittkräfte in vertikaler Richtung übersteigen die Schnittkräfte in horizontaler Richtung. Dies deutet auf geringere Reibungskräfte hin, was die Beschleunigung des Lebensmittels durch die Relativgeschwindigkeit zum Sichelmesser, die hauptsächlich in horizontaler Richtung besteht, reduziert. Es ist ebenso möglich, dass durch die geringere Geschwindigkeit insgesamt kleinere Schnittkräfte notwendig sind und sich der Fehler zwischen den Geometrien der Brühwurst und dem Ausschnitt in der Schneidleiste bei 600 U/min stärker auswirkt.

6.3.3.4 Bewertung des Modells der Schnittkräfte

Aufgrund der Unregelmäßigkeit der Verläufe der Schnittkraft besteht keine Möglichkeit, das Berechnungsmodell so zu parametrieren, dass es die Kraftverläufe zufriedenstellend abbildet. Durch die vereinfachenden Annahmen des Modells ist lediglich eine Anpassung der Bruchenergie R möglich. Für eine bessere Vorhersage durch das Berechnungsmodell müssen weitere Effekte berücksichtigt werden. Infrage kommende Effekte sind zum Beispiel die Reibung zwischen Lebensmittel und Sichelmesser oder die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Lebensmitteleigenschaften. Beide Effekte werden auch von Atkins und Xu (2005) diskutiert. Für die Abbildung der Reibung wird in bisherigen Studien diskutiert, dass ein Scherspannungsmodell der Reibung geeigneter ist als Coulombsche Reibung (Atkins et al., 2004; Spagnoli et al., 2019). Die hier vorgestellten Ergebnisse unterstützen die Vermutung, dass Reibung berücksichtigt werden muss. Weiterhin haben wahrscheinlich die Deformationen der Lebensmittelstange und der Scheibe einen Einfluss auf die Schnittkräfte. Dies zeigen auch Experimente von Spagnoli et al. (2019). Weitere Untersuchungen und die Durchführung von Experimenten sind notwendig, wie zum Beispiel die Bestimmung der Kontaktflächen zwischen dem Sichelmesser und dem Lebensmittel und eine entsprechende Implementierung von Reibkräften im Schnittkraftmodell.

6.3.4 Zusammenfassung

Für diese Forschungsarbeit wurde eine industriellen Schneidemaschine für die Messung von Schnittkräften modifiziert. Mit diesem Aufbau sollte der Einfluss der Drehzahl und der Textur der Lebensmittel auf die Schnittkräfte bestimmt werden. Dazu wurden Versuche durchgeführt, in denen Brühwurst und Kochschinken jeweils bei 600 U/min und bei 1200 U/min geschnitten wurden. Die in anderen Untersuchungen beobachtete Abhängigkeit der Schnittkräfte von der Schnittgeschwindigkeit konnte bestätigt werden. Dies deutet darauf hin, dass die viskoelastischen Eigenschaften von Lebensmitteln auch für das Slicing relevant sind. Die beobachteten hohen Varianzen in den gemessenen Kraftdaten sowie die Analyse der Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen des Schneidprozesses zeigen, dass sowohl die Reibung zwischen Sichelmesser und Lebensmittel als auch das mechanische Verhalten der Scheiben in Modellen des Schneidprozesses berücksichtigt werden sollten. Folglich sollten Reibung und Verformung in Modellen zum Schneiden dünner Scheiben nicht vernachlässigt werden. Dies zeigen auch die Untersuchungen in Studien zum Schneiden mit Messern mit gerader Schneide. Allerdings unterscheiden sich diese durch die Geometrie der Schneide, die Schnittgeschwindigkeiten, die Geometrie der Proben und den Ablauf des Schnittes vom Slicing. Das Fehlen einer Schnittinitiierungsphase ist der auffälligste Unterschied zwischen Untersuchungen mit gerader

Schneide und den hier gezeigten Untersuchungen an Sichelmessern. Weitere experimentelle Forschung mit Sichelmessern ist notwendig, um die Schnittinitiierung besser zu verstehen. Das Fehlen der Schnittinitiierungsphase deutet darauf hin, dass diese Phase bei Sichelmessern von geringerer Bedeutung ist als bei Messern mit einer geraden Schneide. Weitere Arbeiten könnten die Beiträge von Bruch, Reibung und Verformung zu den Prozesskräften beim Schneiden bestimmen und zu einem verbesserten Verständnis beitragen. Dies ist eine notwendige Basis für die Weiterentwicklung der Geometrien von Sichelmessern. Neben Untersuchungen zu den grundlegenden Effekten beim Schneiden, sollten auch Experimente zum Einfluss bestimmter Gestaltparameter durchgeführt werden. Für die praktische Anwendung und Gestaltung der Sichelmesser ist vor allem die Wechselwirkung mit der Drehzahl und deren Auswirkung auf die Schnittqualität von Interesse.

Die Teilforschungsfrage 2.2 ist damit beantwortet.

6.4 Fazit zur Untersuchung der GFZ von Sichelmessern

Ziel dieses Kapitels war die Untersuchung der GFZ von Sichelmessern in industriellen Aufschnittmaschinen. Dafür wurde ein Vorgehen aus bekannten Vorgehensweisen zur Bildung quantitativer Modelle abgeleitet und angewandt, siehe Kapitel 6.1. Als Teil dieser Untersuchung wurde die Aussagekraft eines bestehenden quantitativen Modells, das Schnittkraftmodell nach Atkins und Xu, untersucht.

Der Schnittprozesses von Sichelmessern wurde qualitativ analysiert. Zudem wurden Erkenntnisse aus der Forschung zu ähnlichen Schnittprozessen einbezogen. Daraus wurde abgeleitet, welche Effekte beim Schneiden von Sichelmessern einen relevanten Einfluss auf die Schnittkräfte haben können. Im Stand der Forschung existiert ein quantitatives Modell zur Berechnung der Schnittkräfte, das Schnittkraftmodell nach Atkins und Xu. Für dieses Modell wurde angenommen, dass Reibung und Deformation beim Schneiden dünner Scheiben vernachlässigt werden können. Dieses Modell wurde bisher nicht mit experimentellen Daten verglichen. Daher wurde in dieser Forschungsarbeit ein Versuchsaufbau entwickelt und Versuche durchgeführt, um Schnittkräfte untersuchen zu können. Aufgrund der qualitativen Analyse des Schneidprozesses wurde angenommen, dass die Drehzahl und die Textur des geschnittenen Lebensmittels einen Einfluss auf die Schnittkräfte haben. Daher wurden die Schnittkräfte auf zwei Drehzahlstufen beim Schneiden von zwei Lebensmitteln mit unterschiedlicher Textur untersucht. Es konnte sowohl ein Einfluss der Drehzahl als auch der Textur auf die Verläufe der Schnittkräfte gezeigt

werden. Daraus ergibt sich, dass das Schnittkraftmodell nach Atkins und Xu erweitert werden sollte, um für die Gestaltung von Sichelmessern eingesetzt werden zu können. Ein erweitertes Modell sollte den Einfluss der Drehzahl und der Textur auf die Schnittkräfte berücksichtigen. Die Modellierung dieser GFZ kann mit Black-Box Modellen, White-Box Modellen oder aber auch Grey-Box Modellen erfolgen. Ebenso kann für die weitere Modellierung auch die Bildung weiterer qualitativer Modelle notwendig sein, um die Analyse der Effekte zu unterstützen. Damit aus einem erweiterten Modell Erkenntnisse für die Gestaltung abgeleitet werden können ist ein tieferes Verständnis der beteiligten Effekte und deren Wechselwirkung mit der Gestalt der Sichelmesser erforderlich. Hier zeigt insbesondere die Analyse der Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen, dass das Verhalten der Scheibe wahrscheinlich durch Reibung und Deformation bestimmt wird. Da das Verhalten der Scheibe für die Portionsqualität wichtig ist, sind hier weitere Arbeiten notwendig.

In Abbildung 6.11 ist der aus den gewonnenen Erkenntnissen abgeleitete Vorschlag zur Erweiterung des Schnittkraftmodells dargestellt. Für die Gestaltung ist insbesondere wichtig, dass zusätzlich zur Abbildung der relevanten Effekte wie Reibung, Deformation und Bruch, der Einfluss der Gestaltparameter untersucht und modelliert wird. Dies betrifft insbesondere den Einfluss der Klingenwinkel.

Die Forschungsfrage 2 die hier bearbeitet wurde lautet „*Welche Zusammenhänge müssen in einem quantitativen GFZ-Modell von Sichelmessern berücksichtigt werden?*“. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen Zusammenhänge auf, die weiter untersucht und abgebildet werden sollten, um ein besseres quantitatives GFZ-Modell von Sichelmessern zu erreichen. Dadurch konnte ein Beitrag zur Beantwortung der Forschungsfrage geleistet werden. Zur abschließenden Beantwortung der Forschungsfrage sind weitere Untersuchungen notwendig, um zu ermitteln, ob die GFZ mit den hier benannten Zusammenhängen hinreichend abgebildet werden können.

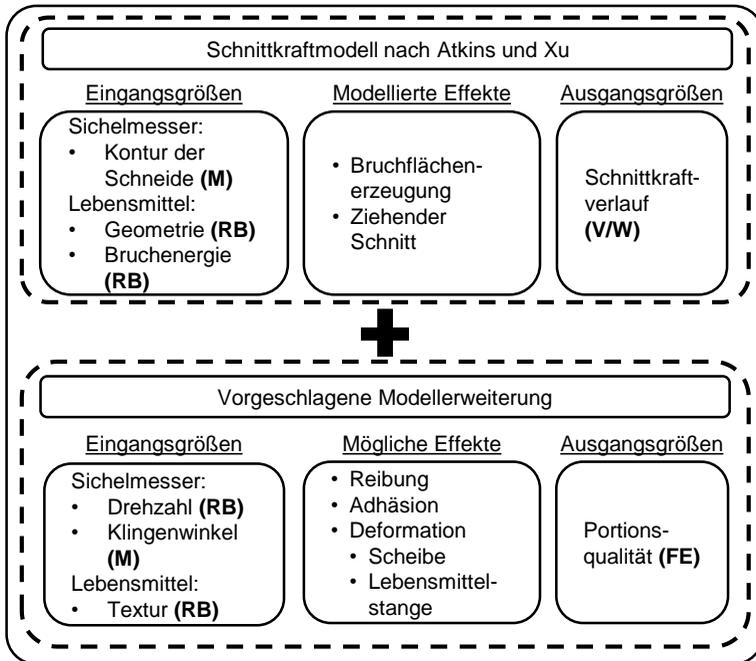


Abbildung 6.11: Zusammenfassung der vorgeschlagenen Erweiterung des quantitativen Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ)-Modells zur Berechnung von Schnittkräften beim Schneiden mit Sichelmessern. Für die Ein- und Ausgangsgrößen ist angegeben, ob es sich um ein Merkmal (M), eine Eigenschaft (E), eine Randbedingung (RB), ein Verhalten / eine Wirkung (V/W) oder eine messbare Funktionserfüllung (FE) handelt.

7 Erfolgsfaktoren für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle

In diesem Kapitel wird untersucht, welche Faktoren erfolgreiches Vorgehen bei der Bildung quantitativer GFZ-Modelle in der Gestaltung ausmachen. Diese sollen als Erfolgsfaktoren ausgedrückt werden, um die Aspekte, die zur erfolgreichen Bildung quantitativer GFZ-Modelle beitragen können, zu beschreiben. Dazu wird das Vorgehen zur Untersuchung und Abbildung der quantitativen GFZ für die Gestaltung von Sichelmessern, siehe Kapitel 6, qualitativ analysiert. Das Ziel ist es, übertragbare Aspekte zu finden und diese als Erfolgsfaktoren zu formulieren.

In diesem Kapitel wird daher die Bearbeitung der *Forschungsfrage 3* vorgestellt:

Welche Erfolgsfaktoren für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle folgen aus der Untersuchung der Zusammenhänge beim Slicing?

Nachfolgend wird zunächst dargelegt, wie das Vorgehen zur Untersuchung und Abbildung der quantitativen GFZ für die Gestaltung von Sichelmessern analysiert wird. Anschließend folgt die Erläuterung der Ergebnisse und deren Diskussion.

7.1 Vorgehen zur Ermittlung der Erfolgsfaktoren

In der Analyse des Vorgehens werden kritische Schritte der Untersuchung und Abbildung der quantitativen GFZ für die Gestaltung von Sichelmessern betrachtet. Anhand der Projektdokumentation werden einzelne Schritte innerhalb der Arbeitspakete des Vorgehens, siehe Kapitel 6.1, untersucht. Für die Untersuchung des Vorgehens sollte die Auswirkung einzelner Schritte auf den gesamten Verlauf betrachtet werden (Wegener & Cash, 2020). Ziel dieser Untersuchung ist es daher, kritische Schritte zu identifizieren. Ob ein Schritt kritisch ist, wird anhand der Tragweite für die weitere Bildung des Modells bewertet. Dabei handelt es sich um subjektive Einschätzungen aus dem Kontext des Projekts. Als entscheidendes Kriterium für die Bewertung der Tragweite wird die Auswirkung auf das Ergebnis eines Schritts auf das GFZ-Modell betrachtet. Ergebnis dieser Analyse ist eine Liste mit kritischen Schritten bei der Untersuchung und Abbildung der quantitativen GFZ für die Gestaltung von Sichelmessern.

Da die Bildung von Modellen ein iterativer Prozess ist, wird in einem weiteren Schritt betrachtet wann iterativ vorgegangen wurde. Die Betrachtung der Iterationen richtet

sich nach den von Wynn und Eckert (2017) definierten Arten von Iterationen. Ein Beispiel für eine Iteration ist die schrittweise Verbesserung und Konkretisierung eines Ergebnisses. Ein weiteres Beispiel ist die Korrektur eines Ergebnisses durch erneute Durchführung von Schritten oder durch alternative Schritte zur Erzeugung eines verbesserten Ergebnisses. Aus dem inhaltlichen Kontext des Projekts werden Ursachen für die Iterationen als Grundlage für die Erfolgsfaktoren identifiziert. Dafür wird betrachtet, was durch die Iteration am Ergebnis verändert wurde und welche Schritte innerhalb der Iteration durchgeführt wurden. Ergebnis dieser Analyse ist eine Liste mit Iterationen bei der Untersuchung und Abbildung der quantitativen GFZ für die Gestaltung von Sichelmessern.

Die Erfolgsfaktoren werden argumentativ von den kritischen Schritten und Iterationen abgeleitet. In den Erfolgsfaktoren ist zusammengefasst, welche Aspekte erfolgreiches Vorgehen bei der Untersuchung und Abbildung von quantitativen GFZ für die Gestaltung von Sichelmessern ausmachen.

7.2 Auswertung der Fallstudie

In diesem Kapitel wird das Ergebnis der Analyse des Vorgehens zur Bildung des quantitativen GFZ-Modells vorgestellt.

7.2.1 Kritische Schritte

Die in der Fallstudie als kritisch identifizierten Schritte zur Bildung des quantitativen GFZ-Modells sind in Tabelle 7.1 aufgeführt. Die Aktivitäten sind zum späteren Referenzieren im Text nummeriert. Zudem ist das jeweilige Arbeitspaket aufgeführt, als dessen Teil der Schritt durchgeführt wurde.

Tabelle 7.1: In der Fallstudie identifizierte kritische Schritte (S) und deren Zuordnung zu dem entsprechenden Arbeitspaket.

#	Bezeichnung und Beschreibung der Aktivitäten	Arbeitspaket
S1	<p>Definition der Modellbildungsaufgabe</p> <p><i>Die Definition der Modellbildungsaufgabe für das Slicing war bezüglich der Eingrenzung auf der Einflussfaktoren herausfordernd. Insbesondere da experimentelle Daten zur Unterstützung von Hypothesen zu den Einflussfaktoren fehlten. Zu Beginn lag eine große Anzahl möglicher Einflussfaktoren und Effekte aus Workshops mit dem Industriepartner vor, siehe Kapitel 6.1.1. Daher musste zunächst eine Eingrenzung der Einflussfaktoren und Effekte durchgeführt werden, um die Modellbildungsaufgabe zu definieren.</i></p> <p>Auswirkung auf das GFZ-Modell Beeinflusst den Umfang der zu untersuchenden Einflussfaktoren und damit den Aufwand der Modellbildung.</p>	Problemdefinition
S2	<p>Definition einer messbaren Funktionserfüllung</p> <p><i>Die Funktionserfüllung der Slicer wurde in der Industrie bisher basierend auf Erfahrungswerten und mit Fokus auf eine subjektive Bewertung der produzierten Portionen definiert. Für die Bildung eines quantitativen GFZ-Modells muss der Grad der Funktionserfüllung gemessen werden können. Daher wurde eine Methode zur Messung der Portionsqualität entwickelt. Da die Portionsqualität von Faktoren abseits des Sichelmessers beeinflusst wird, ist sie allein nicht geeignet um die GFZ über Effekte abzubilden. Daher mussten weitere Messgrößen gefunden werden, die direkt mit der Gestalt des Messers in Verbindung stehen und mit der Portionsqualität korrelieren, um ein White-Box Modell bilden zu können, siehe Kapitel 6.1.1. Im vorliegenden Fall wurden die Schnittkräfte verwendet. Zur Berechnung der Schnittkräfte existierte bereits eine mathematische Beschreibung, siehe Kapitel 2.3.4. Zudem</i></p>	Problemdefinition

#	Bezeichnung und Beschreibung der Aktivitäten	Arbeitspaket
	<p><i>werden Schnittkräfte in der Forschung zum Schneiden von Lebensmitteln gemessen und deren Entstehung beschrieben, siehe Kapitel 6.2. Die Wahl der Schnittkräfte ist daher naheliegend und geeignet für ein quantitatives GFZ-Modell. Die Tragweite dieser Entscheidung ist sehr groß, da die Art der Messgröße für die Funktionserfüllung die Auswahl der Modelle und deren mögliche Aussagekraft beeinflusst. Zudem definiert sie welche Messgrößen für die experimentelle Untersuchung umgesetzt werden müssen.</i></p> <p>Auswirkung auf das GFZ-Modell <i>Ohne messbare Funktionserfüllung ist die Bildung eines quantitativen Modells nicht möglich. Die Messgrößen beeinflussen, ob ein Black-Box Modell oder ein White-Box Modell gebildet werden kann.</i></p>	
S3	<p>Auswahl der Modelle</p> <p><i>Für das quantitative GFZ-Modell stand das mathematische Modell der Schnittkräfte nach Atkins und Xu zur Verfügung, siehe Kapitel 2.3.4. Für die Modellierung von Schnittprozessen bestehen weitere Ansätze, siehe Kapitel 6.2.5. Da keine validierten Modelle für das Schneiden mit Sichelmessern zur Verfügung standen, musste entschieden werden, welche Art von Modellen für das GFZ-Modell zu welchem Zweck gebildet werden sollen, siehe Kapitel 6.1.2. Die Wahl der Modelle bestimmt die Vorgehensweise zur Bildung des GFZ-Modells. Die Wahl der Modelle beeinflusst auch, welche Zielgrößen für die Funktionserfüllung betrachtet werden können.</i></p> <p>Auswirkung auf das GFZ-Modell <i>Welche Modelle verwendet werden, um die GFZ abzubilden, beeinflusst den Aufwand der Modellbildung und die Aussagekraft des GFZ-Modells.</i></p>	Modellieren

#	Bezeichnung und Beschreibung der Aktivitäten	Arbeitspaket
	<p><i>Dabei erfüllen unterschiedliche Modelle unterschiedliche Zwecke, siehe Kapitel 6.1.2. Die Bildung qualitativer Modelle, zum Beispiel eine Skizze des Sichelmessers, kann dabei die Bildung quantitativer Modelle, zum Beispiel das mathematische Modell der Schnittkräfte nach Atkins und Xu, unterstützen.</i></p>	
S4	<p>Reduzierung des experimentellen Aufwands durch die Modellierung von Teilsystemen mit variierenden Eigenschaften</p> <p><i>Die große Anzahl an Anwendungen mit unterschiedlichen Anforderungen und Eigenschaften von Lebensmitteln erhöht den experimentellen Aufwand bei der Untersuchung der Zusammenhänge. In Kapitel 6.2.3 wurde abgeleitet, dass die mechanischen Eigenschaften von Lebensmitteln einen Einfluss auf den Schnittprozess haben. Dies wurde in Kapitel 6.3 durch die Untersuchung der Schnittkräfte beim Slicen von zwei verschiedenen Lebensmitteln bestätigt. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse ist gering, da objektive Vergleichsgrößen zu anderen Lebensmitteln fehlen. Weitere Lebensmittel müssten daher ebenfalls experimentell untersucht werden. Ein Ansatz zur Minimierung des experimentellen Aufwands ist die Modellierung des Teilsystems Lebensmittel in Form eines Materialmodells. Zum Zeitpunkt des Abschlusses des Projekts stand kein geeignetes Materialmodell zur Verfügung, siehe Kapitel 6.2.5. Die Entwicklung eines Materialmodells, mit dem Lebensmittel anhand von Eingangsgrößen in das GFZ-Modell charakterisiert werden können, ist zur weiteren Verbesserung des quantitativen GFZ-Modells notwendig.</i></p> <p>Auswirkung auf das GFZ-Modell <i>Durch die Modellierung eines Teilsystems mit variierenden Eigenschaften kann die Aussagekraft</i></p>	Modellieren

#	Bezeichnung und Beschreibung der Aktivitäten	Arbeitspaket
	<p><i>des GFZ-Modells klarer abgegrenzt werden, da bekannt ist, für welche Ausprägungen der Eigenschaften des Teilsystems es gültig ist. Alternativ müssen alle Varianten des Teilsystems einzeln untersucht werden, bei gleichzeitiger Einschränkung des Transfers von Erkenntnissen.</i></p>	
S5	<p>Integration von Messtechnik in das bestehende Produkt</p> <p><i>Die Validierung des Schnittkraftmodells und das Sammeln weiterer Daten erforderte die Integration von Sensoren in einen Slicer. Dadurch entstand zusätzlicher Entwicklungsaufwand. Dabei wurde sichergestellt, dass das Systemverhalten durch die Integration der Messtechnik nicht verändert wird. Dieser Schritt ist kritisch, da die Aussagekraft der Ergebnisse von der Qualität der Umsetzung abhängt, siehe Kapitel 6.3.1.2 und 6.3.2.1. Die hier gezeigte Umsetzung der Schnittkraftmessung war hinreichend genau. Für die Interpretation der Messdaten zur Schnittkraft sind weitere Messdaten hilfreich. Im vorliegenden Fall wurde die Interpretation der Kraftmessdaten durch Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen unterstützt, siehe Kapitel 6.3.3. Die Integration der Messtechnik und die Erarbeitung der Datenauswertung war ein Engpass bei der Bildung des GFZ-Modells. Ohne die Messdaten sind keine Aussagen zur Qualität der Modellvorhersagen möglich. Daher kann das GFZ-Modell weder bestätigt noch widerlegt werden.</i></p> <p>Auswirkung auf das GFZ-Modell</p> <p><i>Ausgehend von experimentell gewonnenen Daten werden Zusammenhänge ermittelt und GFZ-Modelle validiert. Daher hängt die Aussagekraft eines GFZ-Modells direkt von der Qualität der Daten ab.</i></p>	Aufbau eines Experiments

7.2.2 Iterationen

Die im Vorgehen zur Bildung des quantitativen GFZ-Modells der Fallstudie identifizierten Iterationen sind in Tabelle 7.2 aufgeführt und beschrieben. Die Iterationen sind zum späteren Referenzieren im Text nummeriert.

Tabelle 7.2: In der Fallstudie identifizierte Iterationen (I).

#	Bezeichnung und Beschreibung der Iteration
I1	<p>Eingrenzung der Modellbildungsaufgabe</p> <p><i>Die initial definierte Modellbildungsaufgabe war zu breit gefasst. Eine große Anzahl an möglichen Einflussfaktoren wurde identifiziert, siehe Kapitel 6.1.1. Um die Aufgabe einzugrenzen, musste die Modellbildungsaufgabe spezifiziert werden. Es erfolgte eine Priorisierung der Gestaltmerkmale, Effekte und Zielgrößen. Dies wurde iterativ durchgeführt indem qualitative Modelle gebildet und der Prozess analysiert wurde, siehe Kapitel 6.1.3. Zur weiteren Priorisierung wurden Erkenntnisse von Referenzsystemen, in diesem Fall Studien zu anderen Messerformen, analysiert, siehe Kapitel 6.2. Vorherige experimentelle Studien zu Slicern und Sichelmessern konnten nicht gefunden werden.</i></p>
I2	<p>Experimentelle Untersuchung des Schnittprozesses und Validierung des GFZ-Modells</p> <p><i>Die experimentelle Untersuchung des Schnittprozesses und die Validierung des GFZ-Modells wurden iterativ durchgeführt. Dabei wurde sowohl die Versuchsdurchführung weiterentwickelt, als auch Erkenntnisse über die GFZ gewonnen. Die qualitative Analyse des Prozesses wurde durch einfache Versuche unterstützt, zunächst ohne Aufwand in die Integration von Messtechnik in den Slicer zu betreiben. Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung wurden parallel zur weiteren Bildung des GFZ-Modells weiterentwickelt, wobei im späteren Verlauf die Messtechnik integriert wurde, und mündete in dem in Kapitel 6.3.1.2 gezeigten Aufbau.</i></p>

#	Bezeichnung und Beschreibung der Iteration
I3	<p>Bildung des GFZ-Modells</p> <p><i>Die Bildung des GFZ-Modells ist iterativ abgelaufen. Ausgehend von qualitativen Modellen und Analysen wurde das GFZ-Modell immer detaillierter aufgebaut. Sowohl qualitative als auch quantitative Modelle wurden eingesetzt, um die GFZ abzubilden, siehe Kapitel 6.1.2. Dadurch wurde zunehmend Verständnis zu den GFZ aufgebaut und abgebildet. Im Rahmen dieser Arbeit war der abschließende Schritt der Bildung des quantitativen GFZ-Modells die Validierung des Schnittkraftmodells, siehe Kapitel 6.3. Das Ergebnis zeigt, dass weitere Effekte und Gestaltmerkmale berücksichtigt werden müssen. Daher muss das GFZ-Modell basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen weiterentwickelt werden. Im vorliegenden Fall wurden keine weiteren Untersuchungen durchgeführt, siehe Kapitel 6.4.</i></p>

7.3 Erfolgsfaktoren

Aus den vorgestellten kritischen Schritten und Iterationen wurden die in Tabelle 7.3 aufgeführten Erfolgsfaktoren abgeleitet. Diese werden nachfolgend näher erläutert.

Tabelle 7.3: Erfolgsfaktoren (EF) für die Bildung quantitativer Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ)-Modelle in der Gestaltung.

#	Erfolgsfaktoren der Bildung quantitativer GFZ-Modelle in der Gestaltung
EF1	Konkretisierung der Frage- und Zielstellung
EF2	Definition einer messbaren Funktionserfüllung
EF3	Kombinierte Verwendung qualitativer und quantitativer Modelle
EF4	Modellierung von Teilsystemen mit variierenden Eigenschaften
EF5	Iterative Modellierung und Entwicklung von Versuchsaufbauten
EF6	Dokumentation der gewonnenen Erkenntnisse

7.3.1 Konkretisierung der Frage- und Zielstellung

Der Erfolgsfaktor *Konkretisierung der Frage- und Zielstellung* folgt aus dem kritischen Schritt S1, *Definition der Modellbildungsaufgabe*, und der Iteration I1, *Eingrenzung der Modellbildungsaufgabe*. Die Festlegung der Modellbildungsaufgabe hat eine große Tragweite für die Bildung eines quantitativen GFZ-Modells. Es muss festgelegt werden, welchen Umfang das GFZ-Modell haben soll und welcher Detaillierungsgrad erforderlich ist. Dabei müssen vorhandene Ressourcen berücksichtigt und in die Definition der Zielstellung einbezogen werden. In der Fallstudie lag initial eine offene Fragestellung für die Bildung des quantitativen GFZ-Modells vor. Daher war die Konkretisierung der Frage- und Zielstellung ein entscheidender Teil der Modellbildung und wurde iterativ durchgeführt. Dieser Prozess wurde durch den Einsatz qualitativer Modelle unterstützt, siehe Kapitel 6.1.3. Die Frage- und Zielstellung sollte so weit konkretisiert werden, dass das GFZ-Modell validierbar ist. Sie sollte daher bis auf Gestaltmerkmale oder Parameter heruntergebrochen werden, um deren Einfluss gezielt zu prüfen. Für die vorliegende Fallstudie, siehe Kapitel 6.3, wurde die Fragestellung auf den Einfluss der Drehzahl auf die Schnittkräfte beim Slicing eingegrenzt.

Den Erfolgsfaktor *Konkretisierung der Frage- und Zielstellung* macht daher zusammenfassend folgendes aus:

Die Frage- und Zielstellung für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle sollten so konkret sein, dass Gestaltmerkmale, Prozessparameter und deren vermutete Auswirkung auf eine messbare Funktionserfüllung benannt werden können. Ist dies initial nicht möglich, sollte zur Eingrenzung iterativ vorgegangen werden.

7.3.2 Definition einer messbaren Funktionserfüllung

Der Erfolgsfaktor *Definition einer messbaren Funktionserfüllung* folgt aus dem kritischen Schritt S2, *Definition einer messbaren Funktionserfüllung*. Für die Bildung eines quantitativen GFZ-Modells ist es notwendig, dass sowohl Gestalt als auch Funktionserfüllung geeignet quantifiziert werden können. Die Funktionserfüllung wird bei Slicern über die Qualität der Portionen definiert. Diese ist allerdings nur indirekt ein Resultat des Schnittprozesses, da diese nach dem Schneiden zum Beispiel auch durch den Transport auf den Förderbändern beeinflusst werden kann. Zusammenhänge zu Gestaltmerkmalen und Prozessparametern können als Black-Box Modelle gebildet werden. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass eine Korrelation vorliegt und die Prozessschritte zwischen Schnitt und Messung der Portionsqualität die Portionsqualität nicht verändern. Die Bildung eines White-Box Modells ist in diesem Fall

zunächst nicht möglich, da keine direkten Zusammenhänge bestehen. Hier können zur Abhilfe Zwischengrößen gefunden werden, die direkt durch die Merkmale und Eigenschaften der Sichelmesser beeinflusst werden. Dabei sollte ein physikalischer Ursache-Wirkung-Zusammenhang zwischen den Zwischengrößen und den Merkmalen, Eigenschaften und Prozessparametern bestehen. In der Fallstudie wurden dafür die Schnittkräfte gewählt, da vorherige Studien einen Zusammenhang mit der Gestalt der Messer zeigen, siehe Kapitel 6.2. Qualitative Versuche zeigten, dass höhere Schnittkräfte zu einer Verschlechterung der Portionsqualität führen.

Den Erfolgsfaktor *Definition einer messbaren Funktionserfüllung* macht daher zusammenfassend folgendes aus:

Für die Bildung eines quantitativen GFZ-Modells muss die Funktionserfüllung als messbare Größe definiert werden. Abhängig davon, ob ein Black-Box oder ein White-Box Modell erforderlich ist, muss die Funktionserfüllung in direktem physikalischem Zusammenhang mit den Gestaltmerkmalen und Prozessparametern stehen. Behelfsmäßig können Zwischengrößen definiert werden, wenn die Funktionserfüllung nicht in direktem Zusammenhang mit den Gestaltmerkmalen und Prozessparametern steht.

7.3.3 Kombinierte Verwendung qualitativer und quantitativer Modelle

Der Erfolgsfaktor *Kombinierte Verwendung qualitativer und quantitativer Modelle* erschließt sich aus dem Zweck der Bildung von GFZ-Modellen. Zweck der Bildung eines GFZ-Modells ist es synthesesfähig zu werden. Das GFZ-Modell sollte also das notwendige Wissen beinhalten, um die Gestalt des Produkts so festlegen zu können, dass die Funktion hinreichend erfüllt wird. Quantitative GFZ-Modelle sind zur Optimierung der Gestaltmerkmale geeignet. Die Bildung eines solchen GFZ-Modells erfordert die Erhebung von Daten zur Bildung und Validierung des Modells. Dies ist mit hohem Aufwand und Risiko verbunden, siehe S4, S5, I2 und I3. Um ein quantitatives GFZ-Modell zu bilden, können weitere Modelle unterstützend gebildet werden. Qualitative Modelle können für die Analyse des Systemverhaltens zunächst besser geeignet sein. Sie können meist mit geringem Aufwand gebildet werden, um zum Beispiel vermutete Zusammenhänge zu visualisieren, siehe Kapitel 6.1.3. Der Aufwand zur Bildung qualitativer Modelle ist dabei geringer, da qualitative Modelle häufig auf Skizzen basieren. Zudem sind sie leichter verständlich und können zur Kommunikation der Ergebnisse eingesetzt werden.

Den Erfolgsfaktor *kombinierte Verwendung qualitativer und quantitativer Modelle* macht daher zusammenfassend folgendes aus:

Ein quantitatives GFZ-Modell erfüllt neben dem Zweck Zusammenhänge für die Synthese abzubilden weitere Zwecke, wie die Unterstützung der Dokumentation oder die Kommunikation des abgebildeten Wissens zu den Zusammenhängen. Um diese Zwecke erfüllen zu können und die Bildung des GFZ-Modells zu unterstützen, sollten bereits bei der Bildung unterschiedliche Arten von Modellen eingesetzt werden. Es hängt vom jeweiligen Zweck ab, welche Art von Modell am besten geeignet ist. Qualitative Modelle können dabei bereits in einer frühen Phase der Bildung des quantitativen GFZ-Modells eingesetzt werden.

7.3.4 Modellierung von Teilsystemen mit variierenden Eigenschaften

Der Erfolgsfaktor *Modellierung von Teilsystemen mit variierenden Eigenschaften* folgt aus der Vielzahl an Lebensmitteln, die auf Slicern verarbeitet werden. Die Eigenschaften der Lebensmittel haben einen Einfluss auf den Schnittprozess und variieren deutlich zwischen den Lebensmitteln. Aus dieser Erkenntnis folgt die Identifikation des kritischen Schritts S4, siehe Kapitel 6.2 und Kapitel 6.3.3. Die Gestalt des Sichelmessers muss auf das zu schneidende Lebensmittel abgestimmt werden. Wenn die Eigenschaften der verschiedenen Lebensmittel nicht in geeigneter Form quantifiziert werden können, schränkt dies die Übertragbarkeit des GFZ-Modells stark ein. Ohne Aussagekraft, welche Eigenschaften der Lebensmittel einen Einfluss haben, müssen die verschiedenen Lebensmittel durch nominalskalierte Variablen charakterisiert werden. Dies kann die Bezeichnung des Lebensmittels sein, wie Brühwurst oder Kochschinken in der vorliegenden Fallstudie. Dadurch steigt der experimentelle Aufwand, da das Modell für jedes Lebensmittel einzeln validiert werden muss. Dieser Aufwand kann durch Messung standardisierter Messwerte verringert werden. Diese Messwerte müssen mit dem Verhalten des Lebensmittels beim Schneiden korrelieren. Für Lebensmittel sind hier zum Beispiel die in Kapitel 6.2.7 zusammengefassten Verfahren wie die dynamisch mechanische Analyse (DMA) geeignete Optionen. Die Untersuchung, ob diese Messwerte in geeigneter Form mit der Funktionserfüllung korrelieren, kann ebenfalls mit einem hohen Aufwand verbunden sein. Der Vorteil ist, dass dadurch die Aussagekraft und die Anwendbarkeit des Modells steigen.

Den Erfolgsfaktor *Modellierung von Teilsystemen mit variierenden Eigenschaften* macht daher zusammenfassend folgendes aus:

Ein variierendes Teilsystem sollte durch quantifizierbare Eigenschaften charakterisiert werden. Dieses Teilsystem kann dann als eigenes Modell untersucht und entwickelt werden. Dadurch kann der experimentelle Aufwand für die Untersuchung des gesamten Produkts verringert werden, da nicht jede Variante eines Teilsystems

experimentell untersucht werden muss, wenn die Zusammenhänge mit den Eigenschaften einmal bekannt sind.

In Abbildung 7.1 ist das Prinzip anhand der Fallstudie zur Verdeutlichung dargestellt. Im Fall a) sind die Lebensmittel nur durch ihre Bezeichnung charakterisiert. Daraus folgt, dass für jedes Lebensmittel ein neues GFZ-Modell gebildet werden muss. Alternativ kann ausprobiert werden, ob Vorhersagen eines bestehenden GFZ-Modells für dieses Lebensmittel zutreffen. Im Fall b) wurde ein Materialmodell gebildet. Dieses umfasst die Eigenschaften der Lebensmittel, die eine Auswirkung auf die Funktionserfüllung haben. Sofern die Eigenschaften eines neuen Lebensmittels in den Gültigkeitsbereich des Materialmodells fallen, kann mit dem bereits vorhandenen GFZ-Modell eine zuverlässige Aussage getroffen werden. Hat das Lebensmittel andere Eigenschaften muss das bestehende Modell erweitert werden, wodurch das Materialmodell einen insgesamt größeren Gültigkeitsbereich bekommt.

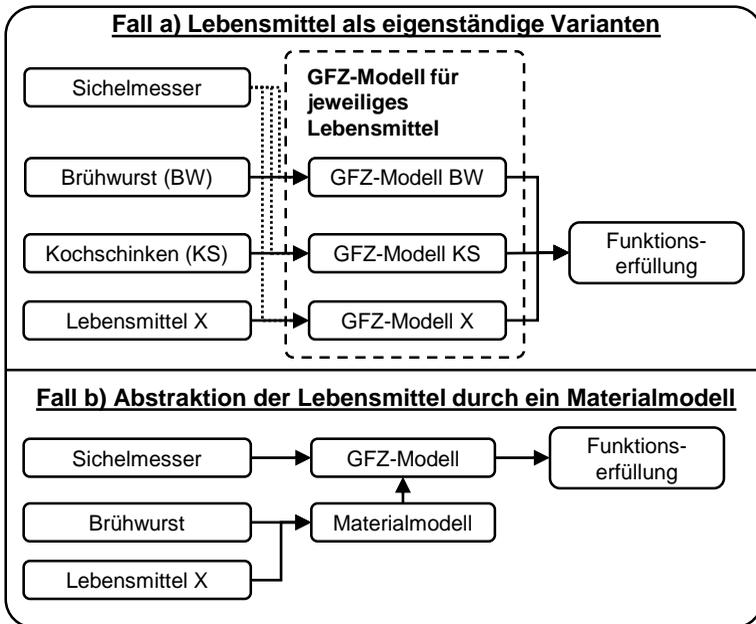


Abbildung 7.1: Modellierung von Teilsystemen mit variierenden Eigenschaften am Beispiel unterschiedlicher Lebensmittel. Im Fall a) muss für jedes Lebensmittel ein angepasstes Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ)-Modell gebildet werden. Im Fall b) werden die Lebensmittel im GFZ-Modell durch ein Materialmodell abgebildet. In diesem Fall kann das vorhandene GFZ-Modell verwendet werden, sofern die Eigenschaften des Lebensmittels innerhalb des Gültigkeitsbereichs liegen.

7.3.5 Iterative Modellierung und Entwicklung von Versuchsaufbauten

Der Erfolgsfaktor *Iterative Modellierung und Entwicklung von Versuchsaufbauten* folgt aus dem iterativen Vorgehen in der Fallstudie. In der betrachteten Fallstudie zum GFZ von Sichelmessern lag initial nicht das notwendige Wissen vor, um die Fragestellung, das GFZ-Modell oder den Versuchsaufbau vollständig zu definieren. Dabei ist insbesondere kritisch, welche Modelle zur Erfüllung welches Zwecks verwendet werden, siehe S3. Daraus folgte ein iteratives Vorgehen, siehe Iterationen

I1-I3, um die Fragestellung und damit auch das GFZ-Modell und den Versuchsaufbau zur Durchführung von Experimenten zu konkretisieren und umzusetzen.

Den Erfolgsfaktor *Iterative Modellierung und Entwicklung von Versuchsaufbauten* macht daher zusammenfassend folgendes aus:

Bei der Bildung eines quantitativen GFZ-Modells ist es wahrscheinlich, dass ein iteratives Vorgehen gewählt werden sollte. Das notwendige Wissen zur Konkretisierung der Fragestellung kann so schrittweise aufgebaut werden und die Bildung übermäßig komplizierter Modelle vermieden werden.

7.3.6 Dokumentation der gewonnenen Erkenntnisse

Der Erfolgsfaktor *Dokumentation der gewonnenen Erkenntnisse* folgt aus der Ausgangssituation aus der industriellen Praxis der Fallstudie. Der Ausgangspunkt und die Motivation des Projekts in der Fallstudie waren das Ziel, Wissen über die GFZ von Sichelmessern zu generieren. Obwohl das Prinzip des Schneidens von Lebensmitteln mit Sichelmessern seit mindestens 1931 existiert, siehe US Patent von Walter (1931), wurden Sichelmesser bisher hauptsächlich erfahrungsbasiert entwickelt. Konkrete Zusammenhänge waren bisher nicht bekannt oder nicht dokumentiert. Dadurch ist eventuell vorhandenes Wissen nicht nachhaltig verfügbar. Die Bildung von GFZ-Modellen ist eine Möglichkeit zur Dokumentation von Zusammenhängen. In der Fallstudie hat sich gezeigt, dass neben den ermittelten Zusammenhängen auch die Dokumentation des spezifischen Vorgehens von Bedeutung ist. Insbesondere wie Versuche zur Analyse des Prozesses und der Bewertung der gebildeten Modelle durchgeführt werden. Dies ist für die Weiterentwicklung der GFZ-Modelle essenziell. Hier konnte in der Fallstudie hauptsächlich auf Wissen aus dem Stand der Forschung zum Schneiden von Lebensmitteln zurückgegriffen werden, siehe Kapitel 6.2. Zum Slicing lagen hauptsächlich Erfahrungswerte, wenig Dokumentationen und keine Studien vor.

Den Erfolgsfaktor *Dokumentation der gewonnenen Erkenntnisse* macht daher zusammenfassend folgendes aus:

Die Bildung von Modellen ist ein Schritt zum Explizieren der gewonnenen Erkenntnisse. Bei der Bildung quantitativer GFZ-Modelle sollte darauf geachtet werden, dass die gewonnenen Erkenntnisse und wie diese ermittelt wurden hinreichend dokumentiert sind. Dabei ist nicht nur die reine Abbildung der Zusammenhänge im GFZ-Modell von Bedeutung. Ebenso sind die Kommunikation der Erkenntnisse und der Anwendungsgrenzen des Modells wichtig.

7.4 Diskussion

Nachfolgend werden die Erfolgsfaktoren und die Grenzen der in dieser Forschungsarbeit gewonnenen Erkenntnisse diskutiert.

Ein Teil der Erfolgsfaktoren wird durch die in Kapitel 2.2.3 aufgeführten Erfolgsfaktoren aus der Literatur bestätigt. Aus der Betrachtung der Fallstudie kommen neue Aspekte hinzu.

7.4.1 Konkretisierung der Frage- und Zielstellung

Eine nicht ausreichend konkrete Frage- und Zielstellung hat im Fall der Untersuchung der Zusammenhänge der GFZ von Sichelmessern zu Iterationen geführt. Es musste zunächst Wissen aufgebaut werden, um dann iterativ die Frage- und Zielstellung zu konkretisieren.

Eine Studie von Adams und Atman (2000) zu Iterationen in Entwicklungsprozessen von Ingenieurstudierenden zeigt, dass anscheinend eine schlechte Leistung von Studierenden mit einem schlechten Hinterfragen der Problemstellung zusammenhängt. Sie stellen die Hypothese auf, dass ein iteratives Hinterfragen der Problemstellung mit der Evaluierung und Lösung ein erfolgreiches Vorgehen ausmacht. In einer späteren Studie untersuchten Atman et al. (2007) Unterschiede im Vorgehen von Studierenden der Ingenieurwissenschaften im Vergleich zu erfahrenen Ingenieuren und Ingenieurinnen. Ein Ergebnis der Studie ist, dass erfahrene Ingenieure und Ingenieurinnen fast doppelt so viel Zeit damit verbringen die Problemstellung zu hinterfragen, das Problem zu definieren und Informationen zu sammeln (Atman et al., 2007). Das Hinterfragen und Konkretisieren von Frage- und Zielstellungen ist demnach in der Gestaltung und Entwicklung ein Erfolgsfaktor.

Dies ist auch in einem Modell für Entwicklungsprozesse von Maher et al. (1996) abgebildet. In ihrem Modell gehen Maher et al. (1996) davon aus, dass das Problem zu Beginn eines Entwicklungsprozesses nie hinreichend definiert ist. Während des Entwicklungsprozesses werden dann Problem und Lösung parallel weiterentwickelt. Dieses Konzept wird zum Beispiel auch in einer Protokollstudie von Dorst und Cross (2001) für Kreativität in Entwicklungsprozessen näher untersucht und weiterentwickelt.

Eine offene Fragestellung für weiterführende Forschung ist, wie die Problemdefinition für die GFZ-Modellbildung ablaufen sollte. Erfolgsfaktor 5 und die hier diskutierten Studien weisen darauf hin, dass iterative Vorgehensweisen zur kontinuierlichen

Weiterentwicklung zielführend sein können. Eine konkretere Fragestellung ist daher, welche Methoden für die Planung dieses iterativen Prozesses in der Praxis genutzt werden können.

7.4.2 Definition einer messbaren Funktionserfüllung

Die Definition einer messbaren Funktionserfüllung wird in der Literatur zur quantitativen Modellierung meist nicht explizit erwähnt. Sie ist Teil der Problemdefinition. In der Gestaltung spielt sie allerdings eine besondere Rolle bei der Untersuchung von GFZ und deren Abbildung in GFZ-Modellen. Wie in der FBS Ontologie beschrieben ist dazu eine Übersetzung abstrakter Funktionen und Anforderungen in beobachtbares Verhalten notwendig (Gero & Kannengiesser, 2004). Die Definition einer messbaren Funktionserfüllung ist eine Grundvoraussetzung für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle.

7.4.3 Kombinierte Verwendung qualitativer und quantitativer Modelle

Die Auswahl von Modellen sollte anhand des gewünschten Zwecks erfolgen. Das in Kapitel 5 vorgestellte Produktmodell Framework (PMF) kann diese Auswahl unterstützen. Die Untersuchung der GFZ von Sichelmessern zeigte, dass zur Erfüllung aller Zwecke mehr als ein Modell notwendig sein kann. Insbesondere bei domänenübergreifenden Projekten ist zu erwarten, dass im Kontext der Gestaltung unterschiedliche Modelle eingesetzt werden, siehe (Weidmann et al., 2017).

Dieser Erfolgsfaktor greift das Konzept *Teile und Herrsche* von Pidd (1999) auf. Anstelle eines übergroßen Modells kann der Einsatz kleinerer Modelle für jeweils einen spezifischen Zweck zielführend sein. Dadurch können Modelle einfacher zugänglich gemacht werden. Der Erfolgsfaktor entspricht ebenfalls dem Grundsatz von Golomb (1971), sich nicht auf ein Modell zu beschränken, siehe Kapitel 2.2.3.

Eine Verknüpfung unterschiedlicher Modelle scheint allerdings selten vorzuliegen. Die Recherche in Kapitel 5 zeigt wenige Ansätze, bei denen unterschiedliche Modelle verknüpft wurden. Ein gefundener Ansatz für eine Verknüpfung qualitativer Modelle und quantitativer Modelle sind Bond-Graphen. Qualitative Modelle in Form von symbolischen Repräsentationen werden zur graphischen Unterstützung des quantitativen Modells eingesetzt. Mehr Informationen zu Bond-Graphen finden sich zum Beispiel bei (Paynter, 1961; Roddeck, 2019).

Wenn keine verknüpften Modelle genutzt werden können, liegt die Herausforderung darin, die Informationen aus den eingesetzten Modellen zu verknüpfen und eine übergeordnete Struktur sicherzustellen.

7.4.4 Modellierung von Teilsystemen mit variierenden Eigenschaften

Die Modellierung von Teilsystemen durch relevante Eigenschaften ist Stand der Technik. Für Ingenieurwerkstoffe werden diverse Eigenschaften zu deren Charakterisierung ermittelt, wie der Elastizitäts-Modul oder die Streckgrenze. Für Lebensmittel im Bereich des Schneidens werden zur Charakterisierung zum Beispiel standardisiert ermittelte Schnittkräfte verwendet.

Die Herausforderung liegt in der praktischen Umsetzung. Es müssen Eigenschaften gefunden werden, die mit der Funktionserfüllung korrelieren. Bei der Bildung von GFZ-Modellen für die Gestaltung ist zu bewerten, ob der Nutzen aus einer Modellierung eines Teilsystems den dafür notwendigen Aufwand rechtfertigt.

7.4.5 Iterative Modellierung und Entwicklung von Versuchsaufbauten

Die Bildung von Modellen ist ein iterativer Prozess (Balci, 1998). Allgemein werden Entwicklungsprozesse und insbesondere die Gestaltung als iterative Prozesse bezeichnet (Gericke & Blessing, 2012; Wynn & Clarkson, 2018). Daher ist es naheliegend, dass die Untersuchung und Abbildung von GFZ in quantitativen Modellen ein iterativer Prozess ist.

Der Erfolgsfaktor impliziert, dass Iterationen für den schrittweisen Aufbau von Wissen notwendig sind. Dadurch sollen Fehlschläge vermieden werden. Ein Beispiel für einen Fehlschlag ist die Entwicklung eines Versuchsaufbaus, der keine Erkenntnisse zu den GFZ liefert, weil der untersuchte Effekt überschätzt wurde. Fehlschläge können wahrscheinlich nicht vollständig verhindert werden. Ziel des iterativen Vorgehens ist es zunächst mit wenig Aufwand abzusichern, dass aus der experimentellen Untersuchung Erkenntnisse zu den GFZ gewonnen werden können. Durch Iterationen mit wenig Aufwand sollen demnach Iterationen mit hohem Aufwand vermieden werden. In der Literatur wird hier zwischen progressiven und korrigierenden Iterationen unterschieden, vergleiche (Meboldt et al., 2012; Wynn et al., 2007; Wynn & Eckert, 2017). Hier sind demnach progressive Iterationen anzustreben, um korrigierende Iterationen zu vermeiden. Dieser Erfolgsfaktor entspricht damit den in Kapitel 2.2.3 aufgeführten Richtlinien von Musselman (1998).

Eine Herausforderung besteht in der Umsetzung und Planung des iterativen Vorgehens. Ein möglicher Lösungsansatz könnte die Übertragung agiler Ansätze sein. Agile Ansätze adressieren den Bedarf nach iterativem Vorgehen in der Systementwicklung, wie zum Beispiel die SCRUM Methode (Schwaber, 1997). Der Einsatz agiler Ansätze wird in der Produktentwicklung erforscht und in der Praxis angewandt, siehe zum Beispiel Heimicke et al. (2021). Die Autoren stellen ein Framework zur Entwicklung unternehmensspezifischer agiler Prozesse vor. Es wäre denkbar, dieses Framework einzusetzen, um einen agilen Prozess zur Bildung von GFZ-Modellen zu entwickeln.

7.4.6 Dokumentation der gewonnenen Erkenntnisse

Ein Zweck der Bildung von Modellen ist die Dokumentation der gewonnenen Erkenntnisse. Das Vorgehen nach Balci (1998), siehe Kapitel 2.2.2, ist das einzige, das explizit auf diesen Aspekt eingeht. Darin ist vorgesehen Modelle zur Kommunikation von Ergebnissen zu erstellen. Eine Herausforderung in der vorliegenden Fallstudie war es die richtige Art der Dokumentation zu finden. Qualitative Modelle sind hier ein wichtiger Teil der Dokumentation, da sie zur Visualisierung von Zusammenhängen besser geeignet sind als rein quantitative Modelle. Die Ausführung in dieser Forschungsarbeit zeigt, dass auch das Festhalten von Erkenntnissen in Form von schriftlichen Ausarbeitungen für eine nachvollziehbare Dokumentation notwendig sein kann.

7.4.7 Grenzen der Erfolgsfaktoren

Die Erfolgsfaktoren wurden aus Beobachtungen einer Einzelfallstudie abgeleitet. Daher sind diese nur als initiale Indikatoren für erfolgreiches Vorgehen bei der Bildung quantitativer GFZ-Modelle zu betrachten. Für die Erfolgsfaktoren konnten Belege aus der Betrachtung von Entwicklungsprozessen gefunden werden. Daher sind die Erfolgsfaktoren potenziell auf andere Fälle zur Untersuchung und Abbildung von GFZ übertragbar. Die Ermittlung der kritischen Schritte und Iterationen ist allerdings potenziell durch kognitive Verzerrungen, wie zum Beispiel die Überlebenden-Verzerrung oder Rückschaufehler, beeinträchtigt.

Im Rahmen der Fallstudie wurde ein quantitatives GFZ-Modell von Sichelmessern weiterentwickelt und Erkenntnisse darüber gewonnen, welche Effekte zur Erklärung der GFZ berücksichtigt werden sollten. Die Erfolgsfaktoren stehen daher in direktem Zusammenhang mit den Sichelmessern. Zum Beispiel kann es sein, dass der Erfolgsfaktor *Modellierung von Teilsystemen mit variierenden Eigenschaften* für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle anderer Produkte nicht relevant ist, weil kein

Äquivalent zu den Lebensmitteln vorhanden ist. Im Umkehrschluss ist es ebenso möglich, dass bei anderen Produkten weitere Erfolgsfaktoren für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle identifiziert werden können.

Ein Schwerpunkt in der Bildung des quantitativen GFZ-Modells liegt auf der Analyse der Gestalt des Sichelmessers und des Schnittprozesses. Es ist daher zu erwarten, dass die Erfolgsfaktoren vor allem für die Analyse von Gestalt und Prozessen als Teil der Bildung quantitativer GFZ-Modelle relevant sind. Die Ermittlung der Anwendbarkeit und des Nutzens der hier vorgestellten Erfolgsfaktoren sowie die Ermittlung weiterer Erfolgsfaktoren sind daher wichtige Ziele für die weiterführende Forschung. Eine mögliche Fragestellung ist zudem, wie die Anwendung der Erfolgsfaktoren methodisch unterstützt werden kann.

Durch die Ableitung der Erfolgsfaktoren wurde Forschungsfrage 3 beantwortet.

7.5 Fazit zu den Erfolgsfaktoren der Bildung quantitativer GFZ-Modelle

Anhand von kritischen Schritten und Iterationen aus der Bildung eines quantitativen GFZ-Modells zur Gestaltung von Sichelmessern wurden sechs Erfolgsfaktoren identifiziert. Diese sind in Abbildung 7.2 zusammengefasst. Zusätzlich wurde je eine Regel zur Anwendung des Erfolgsfaktors (RAEF) formuliert. Diese dienen als Anhaltspunkt für die praktische Anwendung der Erfolgsfaktoren bei der Bildung quantitativer GFZ-Modelle.

Die zentrale Zielsetzung dieser Forschungsarbeit ist durch die Formulierung der Erfolgsfaktoren erreicht. Die Erfolgsfaktoren sind ein Beitrag zur Untersuchung der Bildung quantitativer GFZ-Modelle in der Gestaltung. Sie bieten einen Einblick in erfolgreiche Vorgehensweisen in der Praxis. Dadurch werden die in der Literatur formulierten Vorgehensweisen zur Bildung quantitativer GFZ-Modelle in der Gestaltung ergänzt. Da die Erfolgsfaktoren aus einer Einzelfallstudie abgeleitet wurden, ist ihre Übertragbarkeit auf andere Systeme allerdings unklar. Dies sollte daher in weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden.

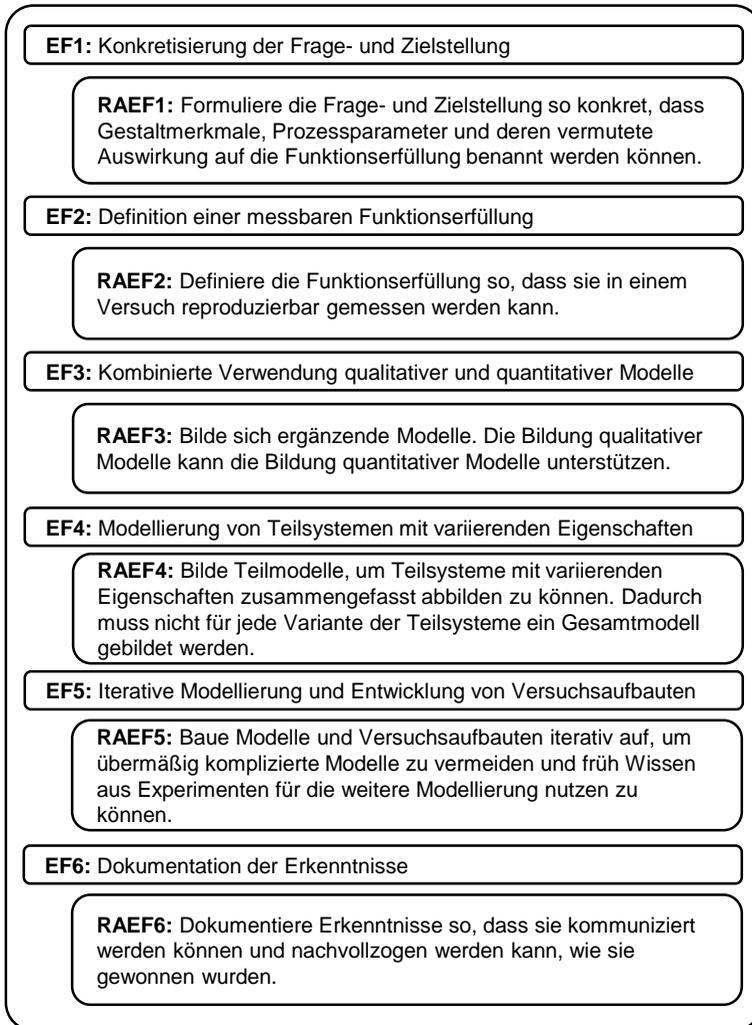


Abbildung 7.2: Übersicht der Erfolgsfaktoren (EF) und die zugehörige Regel zur Anwendung des Erfolgsfaktors (RAEF) für die Bildung quantitativer Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ)-Modelle in der Gestaltung.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zusammengefasst. Anschließend wird ein Ausblick auf anknüpfende Forschungsthemen gegeben.

8.1 Zusammenfassung

In dieser Forschungsarbeit wurde untersucht, was erfolgreiches Vorgehen für die Bildung quantitativer Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ)-Modelle für die Gestaltung in der Praxis ausmacht. Dazu wurde in einer Fallstudie unter praxisnahen Bedingungen die Bildung eines quantitativen GFZ-Modells für die Gestaltung von Sichelmessern durchgeführt. Das Vorgehen aus der Fallstudie wurde analysiert. Aus der Analyse der Fallstudie wurden sechs Erfolgsfaktoren für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle in der Gestaltung abgeleitet. Ein Schwerpunkt der Fallstudie lag auf der Analyse der Gestalt und des Prozesses als Teil der Bildung quantitativer GFZ-Modelle.

Die ermittelten Erfolgsfaktoren lauten wie folgt:

- Konkretisierung der Frage- und Zielstellung
- Definition einer messbaren Funktionserfüllung
- Kombinierte Verwendung qualitativer und quantitativer Modelle
- Modellierung von Teilsystemen mit variierenden Eigenschaften
- Iterative Modellierung und Entwicklung von Versuchsaufbauten
- Dokumentation der gewonnenen Erkenntnisse

Diese Erfolgsfaktoren wurden anhand der Bearbeitung von drei Forschungsfragen abgeleitet:

Forschungsfrage 1:

Welche Produktmodelle können in der Gestaltung zur Abbildung von GFZ eingesetzt werden?

Forschungsfrage 2:

Welche Zusammenhänge müssen in einem quantitativen GFZ-Modell von Sichelmessern berücksichtigt werden?

Forschungsfrage 3:

Welche Erfolgsfaktoren für die Bildung quantitativer GFZ-Modelle folgen aus der Untersuchung der Zusammenhänge beim Slicing?

Forschungsfrage 1 adressierte das Problem, dass trotz der großen Anzahl verfügbarer Produktmodelle in der Gestaltung zur Abbildung von GFZ in einem GFZ-Modell keine strukturierte Übersicht dieser Produktmodelle existiert. Dadurch ist die Auswahl der Produktmodelle erschwert. Daher wurde in dieser Forschungsarbeit eine Strukturierung von Produktmodellen anhand des Modellzwecks und der Phase der Gestaltung durchgeführt. Zusätzlich wurden den Produktmodellen charakteristische Eigenschaften aufgrund der Art der Information und der Art der Abbildung zugeordnet. Dies ermöglichte eine Eingrenzung der Produktmodelle, die für die Bildung von GFZ-Modellen geeignet sind. Über eine systematische Literaturrecherche wurden bestehende Produktmodelle identifiziert. Darauf aufbauend wurde eine Auswahl an Produktmodellen für die Bildung von GFZ-Modellen mit unterschiedlichen Zwecken erarbeitet. Mit diesem Ergebnis wurde Forschungsfrage 1 beantwortet.

Forschungsfrage 2 wurde durch die Untersuchung der GFZ von Sichelmessern beantwortet. Diese Untersuchung wurde als Teil eines Industrieprojekts und daher unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt. Um die Forschungsfrage zu beantworten, wurden bekannte Zusammenhänge aus dem Stand der Forschung zum Schneiden von Lebensmitteln und der Schnittprozess von Sichelmessern qualitativ analysiert. Daraus wurden mehrere mögliche Einflüsse auf den Schnittprozess identifiziert. Aus diesen Ergebnissen wurde der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Schnittkräfte beim Schneiden von Scheiben mit Sichelmessern für die weitere Untersuchung ausgewählt. Dieser Einfluss wurde experimentell untersucht. Anhand von Versuchen mit zwei Lebensmitteln mit unterschiedlicher Textur wurde gezeigt, dass ein existierendes quantitatives GFZ-Modell die Schnittkraftverläufe nicht abbilden kann. Aus einer weiterführenden Interpretation der Daten wurde ermittelt, welche Effekte in einem quantitativen GFZ-Modell des Schnittprozesses abgebildet werden sollten. Weitere Untersuchungen der Effekte sind notwendig, um diese zu verstehen und anschließend das bestehende Modell zu erweitern. Zur abschließenden Beantwortung der Forschungsfrage 2 sind daher weitere Untersuchungen notwendig. In diesen muss ermittelt werden, ob die GFZ mit den hier benannten Zusammenhängen hinreichend abgebildet werden können.

Forschungsfrage 3 wurde durch Analyse des Vorgehens zur Untersuchung der GFZ von Sichelmessern und deren Abbildung in einem quantitativen GFZ-Modell in der Fallstudie beantwortet. Um die Erfolgsfaktoren abzuleiten, wurden kritische Schritte und Iterationen des Vorgehens zur Bildung des quantitativen GFZ-Modells identifiziert. Daraus wurden argumentativ die oben genannten Erfolgsfaktoren abgeleitet und damit Forschungsfrage 3 beantwortet.

Durch die Beantwortung der drei Forschungsfragen wurde die Zielstellung dieser Forschungsarbeit erreicht. Die Erfolgsfaktoren sind ein Beitrag zur Erforschung der Bildung quantitativer GFZ-Modelle in der Praxis. Zudem konnten in der Fallstudie Erkenntnisse zu den GFZ von Sichelmessern gewonnen werden.

8.2 Ausblick

Die in dieser Forschungsarbeit ermittelten Erfolgsfaktoren der Bildung quantitativer GFZ-Modelle sind ein Ausgangspunkt für weitere Forschung am Vorgehen zur Bildung von GFZ-Modellen. Weitere Forschung zur Absicherung der hier gezeigten Ergebnisse ist sinnvoll.

Das in Kapitel 5 erstellte Produktmodell Framework (PMF) integriert nur einen Teil der vorhandenen Produktmodelle. Produktmodelle, die für die Industrie entwickelt wurden und nicht veröffentlicht sind, konnten im PMF nicht berücksichtigt werden. Die Auswahl von Modellen anhand des PMFs war in der Fallstudie möglich. Eine genauere Betrachtung und Unterstützung für eine detaillierte Auswahl anhand objektiver Kriterien wurden bisher nicht betrachtet. Der Erfolgsfaktor *kombinierte Verwendung qualitativer und quantitativer Modelle* zeigt zudem, dass weitere Forschung zur Verknüpfung von Modellen sinnvoll ist. Ebenso ist weitere Forschung zur Erweiterung des PMF um Modelle aus der industriellen Praxis und zur methodischen Unterstützung der Auswahl von Modellen eine mögliche Anknüpfung an die hier vorgestellten Ergebnisse.

Wie in Kapitel 7.4 diskutiert ist eine Absicherung der Erfolgsfaktoren notwendig, da sie aus einem Einzelfall abgeleitet wurden. Ausgehend von den Ergebnissen dieser Forschungsarbeit sollten daher weitere Studien mit einer fokussierten Betrachtung auf einzelne Schritte des Vorgehens zur Bildung quantitativer GFZ-Modelle durchgeführt werden. Sowohl eine Betrachtung einzelner Erfolgsfaktoren in Laborstudien als auch die Betrachtung weiterer Einzelfallstudien in der industriellen Praxis sind denkbar. Die Fragestellungen sollten auf ein Verständnis der zugrundeliegenden Konzepte der Erfolgsfaktoren abzielen und wie deren Anwendung in der Praxis methodisch unterstützt werden kann.

Literaturverzeichnis

- Adams, R. S. & Atman, C. J. (2000). Characterizing engineering student design processes: An illustration of iteration. *2000 Annual Conference, St. Louis, Missouri*, 18. – 21. Juni, 5.143.1-5.143.11. <https://doi.org/10.18260/1-2--8204>
- Albers, A., Braun, A., Clarkson, J., Enkler, H.-G. & Wynn, D. (2009). Contact and Channel Modelling to support early design of technical systems. In M. Norell Bergendahl, M. Grimheden, L. Leifer, P. Skogstad & U. Lindemann (Hrsg.), *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED'09), Vol 5: Design Methods and Tools (pt.1)* (S. 61–72). Glasgow: The Design Society.
- Albers, A. & Matthiesen, S. (2002). Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme – Das Elementmodell "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zur Analyse und Synthese technischer Systeme. *Konstruktion*, 54(7-8), 55–60.
- Ameri, F., Summers, J. D., Mocko, G. M. & Porter, M. (2008). Engineering design complexity: An investigation of methods and measures. *Research in Engineering Design*, 19(2-3), 161–179. <https://doi.org/10.1007/s00163-008-0053-2>
- Andreasen, M. M., Hansen, C. T. & Cash, P. (2015). Designers and their knowing. In M. M. Andreasen, C. T. Hansen & P. Cash (Hrsg.), *Conceptual Design* (S. 37–70). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19839-2_3
- Atherton, M., Jiang, P., Harrison, D. & Malizia, A. (2018). Design for invention: Annotation of functional geometry interaction for representing novel working principles. *Research in Engineering Design*, 29(2), 245–262. <https://doi.org/10.1007/s00163-017-0267-2>
- Atkins, T. (2009). *The science and engineering of cutting* (1. Aufl.). Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-17178-7>
- Atkins, T. & Xu, X. (2005). Slicing of soft flexible solids with industrial applications. *International Journal of Mechanical Sciences*, 47(4-5), 479–492. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2005.01.013>
- Atkins, T., Xu, X. & Jeronimidis, G. (2004). Cutting, by 'pressing and slicing,' of thin floppy slices of materials illustrated by experiments on cheddar cheese and salami. *Journal of Materials Science*, 39(8), 2761–2766.
- Atman, C. J., Adams, R. S., Cardella, M. E., Turns, J., Mosborg, S. & Saleem, J. (2007). Engineering design processes: A comparison of students and expert practitioners. *Journal of Engineering Education*, 96(4), 359–379. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2007.tb00945.x>

- Balci, O. (1998). Verification, Validation, and Testing. In J. Banks (Hrsg.), *Handbook of simulation: Principles, methodology, advances, applications, and practice* (S. 335–393). New York, Chichester, Weinheim: John Wiley & Sons.
- Barbut, S. (2006). Fermentation and chemical acidification of salami-type products – Effect on yield, texture and microstructure. *Journal of Muscle Foods*, 17(1), 34–42. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4573.2006.00032.x>
- Baxter, D., Gao, J., Case, K., Harding, J., Young, B., Cochrane, S. & Dani, S. (2008). A framework to integrate design knowledge reuse and requirements management in engineering design. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(4), 585–593. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2007.07.010>
- Beetz, J.-P., Schlemmer, P. D., Kloberdanz, H. & Kirchner, E. (2018). Using the new Working Space Model for the development of hygienic products. In D. Marjanović, M. Štorga, S. Škec, N. Bojčetić & N. Pavković (Hrsg.), *Proceedings of the 15th International Design Conference (DESIGN 2018)* (S. 985–996). Glasgow: The Design Society. <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0142>
- Berk, Z. (2018). *Food process engineering and technology* (3. Aufl.). *Food Science and Technology International Series*. London: Academic Press.
- Berselli, G., Meng, Q., Vertechy, R. & Castelli, V. P. (2016). An improved design method for the dimensional synthesis of flexure-based compliant mechanisms: optimization procedure and experimental validation. *Meccanica*, 51, 1209–1225. <https://doi.org/10.1007/s11012-015-0276-z>
- Bilancia, P., Berselli, G., Bruzzone, L. & Fanghella, P. (2017). A practical method for determining the pseudo-rigid-body parameters of spatial compliant mechanisms via CAE tools. *Procedia Manufacturing*, 11, 1709–1717. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.374>
- Bobbe, T., Krzywinski, J. & Woelfel, C. (2016). A comparison of design process models from academic theory and professional practice. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković, N. Bojčetić & S. Škec (Hrsg.), *Proceedings of the 14th International Design Conference (DESIGN 2016)* (S. 1205–1214). Glasgow: The Design Society.
- Boersting, P., Keller, R., Alink, T., Eckert, C. M., Albers, A. & Clarkson, P. J. (2008). The relationship between functions and requirements for an improved detection of component linkages. In D. Marjanovic, M. Storga, N. Pavkovic, N. Bojčetić & D. Marjanović (Hrsg.), *Proceedings of the 10th International Design Conference (DESIGN 2008)* (S. 309–316). Glasgow: The Design Society.

- Boisly, M., Schuldt, S., Kästner, M., Schneider, Y. & Rohm, H. (2016). Experimental characterisation and numerical modelling of cutting processes in viscoelastic solids. *Journal of Food Engineering*, 191, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.06.019>
- Bonev, M., Hvam, L., Clarkson, J. & Maier, A. (2015). Formal computer-aided product family architecture design for mass customization. *Computers in Industry*, 74, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.07.006>
- Bremer, F. & Matthiesen, S. (2020). A review of research relating to food slicing in industrial applications. *Journal of Food Engineering*, 268, Artikel 109735. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109735>
- Bremer, F. & Matthiesen, S. (2021). High-speed cutting with involute blades: Experimental research on cutting forces. *Journal of Food Engineering*, 293, Artikel 110380. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110380>
- Bronštein, I. N. & Semendjaev, K. A. (2001). *Taschenbuch der Mathematik* (5. Aufl.). Thun und Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch.
- Brown, T., James, S. J. & Purnell, G. L. (2005). Cutting forces in foods: Experimental measurements. *Journal of Food Engineering*, 70(2), 165–170. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.09.022>
- Browning, T. R. (2016). Design Structure Matrix extensions and innovations: A survey and new opportunities. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 63(1), 27–52. <https://doi.org/10.1109/TEM.2015.2491283>
- Bryant, A., Ustunol, Z. & Steffe, J. (1995). Texture of cheddar cheese as influenced by fat reduction. *Journal of Food Science*, 60(6), 1216–1219. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1995.tb04559.x>
- Cao, D. X. & Fu, M. W. (2011). A knowledge-based prototype system to support product conceptual design. *Computer-Aided Design and Applications*, 8(1), 129–147. <https://doi.org/10.3722/cadaps.2011.129-147>
- Chakrabarti, A., Shea, K., Stone, R., Cagan, J., Campbell, M., Hernandez, N. V. & Wood, K. L. (2011). Computer-based design synthesis research: An overview. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 11(2), Artikel 021003. <https://doi.org/10.1115/1.3593409>
- Chen, L. & Opara, U. L. (2013). Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods – A review. *Journal of Food Engineering*, 119(3), 497–507. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.06.028>
- Cho, K. & Lee, D. (1998). Viscoelastic effects in cutting of elastomers by a sharp object. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 36(8), 1283–1291. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0488\(199806\)36:8%3C1283::AID-POLB3%3E3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0488(199806)36:8%3C1283::AID-POLB3%3E3.0.CO;2-T)
- Culioli, J. & Sherman, P. (1976). Evaluation of gouda cheese firmness by compression tests. *Journal of Texture Studies*, 7, 353–372. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1976.tb01142.x>

- Danjou, S., Lupa, N. & Koehler, P. (2008). Approach for automated product modeling using knowledge-based design features. *Computer-Aided Design and Applications*, 5(5), 622–629.
<https://doi.org/10.3722/cadaps.2008.622-629>
- Dantan, J. Y., Qureshi, A. J., Antoine, J. F., Eisenbart, B. & Blessing, L. (2013). Management of product characteristics uncertainty based on formal logic and characteristics properties model. *CIRP Annals*, 62(1), 147–150.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.077>
- Dorst, K. & Cross, N. (2001). Creativity in the design process: Co-evolution of problem–solution. *Design Studies*, 22(5), 425–437.
[https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(01\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(01)00009-6)
- Dowgiało, A. (2005). Cutting force of fibrous materials. *Journal of Food Engineering*, 66(1), 57–61. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.034>
- Dresch, A., Lacerda, D. P. & Antunes, J. A. V. (2015). Systematic literature review. In A. Dresch, D. P. Lacerda & J. A. V. Antunes (Hrsg.), *Design science research* (S. 129–158). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07374-3_7
- Du, D. & Tscheuschner, H.-D. (1986). Mechanische Modelle zur Beschreibung des Deformationsverhaltens von Lebensmitteln und ihre Klassifizierung. *Technische Mechanik*, 7(4), 43–50.
<https://doi.org/10.1515/9783110856125.11>
- Eckert, C. M. & Hillerbrand, R. (2018). Models in engineering design: Generative and epistemic function of product models. In P. E. Vermaas & S. Vial (Hrsg.), *Design Research Foundations. Advancements in the philosophy of design* (S. 219–242). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73302-9_11
- Eifler, T. & Howard, T. J. (2018). The importance of robust design methodology: Case study of the infamous GM ignition switch recall. *Research in Engineering Design*, 29(1), 39–53. <https://doi.org/10.1007/s00163-017-0251-x>
- Eisenbart, B., Gericke, K. & Blessing, L. (2017). Taking a look at the utilisation of function models in interdisciplinary design: Insights from ten engineering companies. *Research in Engineering Design*, 28(3), 299–331.
<https://doi.org/10.1007/s00163-016-0242-3>
- Eisenbart, B., Qureshi, A., Gericke, K. & Blessing, L. (2013). Integrating Different Functional Modeling Perspectives. In A. Chakrabarti & R. V. Prakash (Hrsg.), *Lecture Notes in Mechanical Engineering. ICoRD'13* (S. 85–97). India: Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1050-4_7
- Eppinger, S. D. & Browning, T. R. (2012). *Design structure matrix methods and applications. Engineering systems*. Cambridge, Mass, USA: MIT Press.

- Erden, M., Komoto, H., van Beek, T., D'Amelio, V., Echavarria, E. & Tomiyama, T. (2008). A review of function modeling: Approaches and applications. *Artificial Intelligence in Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 22(2), 147–169. <https://doi.org/10.1017/S0890060408000103>
- Everard, C. D., O'Callaghan, D. J., Howard, T. V., O'Donnell, C. P., Sheehan, E. M. & Delahunty, C. M. (2006). Relationships between sensory and rheological measurements of texture in maturing commercial cheddar cheese over a range of moisture and pH at the point of manufacture. *Journal of Texture Studies*, 37(4), 361–382. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2006.00057.x>
- Fang, H. C., Ong, S. K. & Nee, A. (2014). Product remanufacturability assessment based on design information. *Procedia CIRP*, 15, 195–200. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.050>
- Feldhusen, J., Grote, K.-H., Göpfert, J. & Tretow, G. (2013). Technische Systeme. In J. Feldhusen & K.-H. Grote (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (8. Aufl., S. 237–279). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29569-0_4
- Freund, T., Kloberdanz, H., Lotz, J. & Wuertenberger, J. (2015). An approach to analysing interface uncertainty using the Contact and Channel Model. In C. Weber, S. Husung, M. Cantamessa, G. Cascini, D. Marjanovic & S. Graziosi (Hrsg.), *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol. 6: Design Methods and Tools* (Bd. 2, S. 53–62). Glasgow: The Design Society.
- Gadeyne, K., Pinte, G. & Berx, K. (2014). Describing the design space of mechanical computational design synthesis problems. *Advanced Engineering Informatics*, 28(3), 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.03.004>
- Gao, F., Li, J., Qian, Q., Wang J., Bi, Z. M. & Zhang, W. J. (2015). A novel approach to embodiment design of a robotic system for maximum workspace. In *Proceedings of the 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* (S. 539–544). New York: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2015.7334170>
- Gericke, K. & Blessing, L. (2011). Comparisons of design methodologies and process models across domains: A literature review. In S. J. Culley, B. J. Hicks, T. C. McAlloone, T. J. Howard & P. J. Clarkson (Hrsg.), *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Impacting Society through Engineering Design, Vol. 1: Design Processes* (S. 393–404). Glasgow: The Design Society.
- Gericke, K. & Blessing, L. (2012). An analysis of design process models across disciplines. In D. Marjanovic, M. Storga, N. Pavkovic & N. Bojetic

- (Hrsg.), *Proceedings of the 12th International Design Conference (DESIGN 2012)* (S. 171–180). Glasgow: The Design Society.
- Gericke, K. & Eisenbart, B. (2017). The integrated function modeling framework and its relation to function structures. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 31(4), 436–457. <https://doi.org/10.1017/S089006041700049X>
- Gero, J. S. & Kannengiesser, U. (2004). The situated function–behaviour–structure framework. *Design Studies*, 25(4), 373–391. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2003.10.010>
- Gero, J. S. & Kannengiesser, U. (2014). The function-behaviour-structure ontology of design. In A. Chakrabarti & L. Blessing (Hrsg.), *An anthology of theories and models of design: Philosophy, approaches and empirical explorations* (S. 263–283). London: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1_13
- Goel, A. K., Vattam, S., Wiltgen, B. & Helms, M. (2012). Cognitive, collaborative, conceptual and creative — Four characteristics of the next generation of knowledge-based CAD systems: A study in biologically inspired design. *Computer-Aided Design*, 44(10), 879–900. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2011.03.010>
- Golomb, S. W. (1971). Mathematical models: Uses and limitations. *IEEE Transactions on Reliability*, R-20(3), 130–131. <https://doi.org/10.1109/TR.1971.5216113>
- Gu, C.-C., Hu, J., Peng, Y.-H. & Li, S. (2012). FCBS model for functional knowledge representation in conceptual design. *Journal of Engineering Design*, 23(8), 577–596. <https://doi.org/10.1080/09544828.2011.629318>
- Gunasekaran, S. & Ak, M. (2003). *Cheese rheology and texture*. Boca Raton FL: CRC Press.
- Günther, M. & Velten, K. (2014). *Mathematische Modellbildung und Simulation. Eine Einführung für Wissenschaftler, Ingenieure und Ökonomen*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Halmos, A. L., Pollard, A., Sherkat, F. & Seuret, M. G. (2003). Natural cheddar cheese texture variation as a result of milk seasonality. *Journal of Texture Studies*, 34(1), 21–40. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2003.tb01053.x>
- He, B., Cao, J. T., He, X. L., Jin, Z. X. & Fang, M. L. (2012). Lifting platform in jack-up offshore platform based on virtual prototyping. *Applied Mechanics and Materials*, 198-199, 154–157. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.198-199.154>
- He, B. & Huang, S. (2016). Functional synthesis of mechanisms under cost consideration. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*,

- Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(1), 91–99.
<https://doi.org/10.1177/0954405414542138>
- He, B., Song, W. & Wang, Y. (2013). A feature-based approach towards an integrated product model in intelligent design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(1-4), 15–30.
<https://doi.org/10.1007/s00170-013-4991-0>
- He, B., Song, W. & Wang, Y. (2015). Computational conceptual design using space matrix. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 15(1), Artikel 011004. <https://doi.org/10.1115/1.4029062>
- Heimicke, J., Dühr, K., Krüger, M., Ng, G.-L. & Albers, A. (2021). A framework for generating agile methods for product development. *Procedia CIRP*, 100, 786–791. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.043>
- Howard, T. J., Culley, S. J. & Dekoninck, E. (2008). Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. *Design Studies*, 29(2), 160–180.
<https://doi.org/10.1016/j.destud.2008.01.001>
- Isermann, R. (2008). *Mechatronische Systeme* (2. Aufl.). Berlin, Heidelberg, New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-32512-3>
- Kahl, P., Runkel, A., Knauf, M. & Schneider, T. (2017). Schneidmesser (EP 3459699 A1). Europäisches Patentamt.
- Kamyab, I., Chakrabarti, S. & Williams, J. G. (1998). Cutting cheese with wire. *Journal of Materials Science*, 33(11), 2763–2770.
<https://doi.org/10.1023/A:1017517332112>
- Künne, B. & Wiecezorek, D. (2010). Research to optimize the embodiment design of modules and components used in roller conveyors. In *2010 IEEE International Conference on Automation and Logistics* (S. 495–500). New York: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAL.2010.5585333>
- Langeveld, L. (2011). Product design with embodiment design as a new perspective. In D. Coelho (Hrsg.), *Industrial design - New frontiers* (S. 121–146). : InTech. <https://doi.org/10.5772/20579>
- Leu, M. C., Wu, J. C. & Liu, X. F. (2009). Axiomatic functional and object-oriented product design framework. *CIRP Annals*, 58(1), 147–152.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.017>
- Lin, C.-L. & Lan, G.-J. (2018). A computational approach to investigate optimal cutting speed configurations in rotational needle biopsy cutting soft tissue. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 22(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/10255842.2018.1535060>
- Ljung, L. (2010). Perspectives on system identification. *Annual Reviews in Control*, 34(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2009.12.001>

- Luyten, H., van Vliet, T. & Walstra, P. (1992). Comparison of various methods to evaluate fracture phenomena in food materials. *Journal of Texture Studies*, 23, 245–266. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1992.tb00524.x>
- Maher, M. L., Poon, J. & Boulanger, S. (1996). Formalising design exploration as co-evolution. In J. S. Gero & F. Sudweeks (Hrsg.), *Advances in formal design methods for CAD: Proceedings of the IFIP WG5.2 Workshop on Formal Design Methods for Computer-Aided Design, June 1995* (S. 3–30). Boston: Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-34925-1_1
- Maier, J. F., Eckert, C. M. & Clarkson, P. J. (2017). Model granularity in engineering design – Concepts and framework. *Design Science*, 3, Artikel e1. <https://doi.org/10.1017/dsj.2016.16>
- Marsot, J., Claudon, L. & Jacqmin, M. (2007). Assessment of knife sharpness by means of a cutting force measuring system. *Applied ergonomics*, 38(1), 83–89.
- Matthiesen, S. (2021). Gestaltung – Prozess und Methoden. In G. Pahl, W. Beitz, B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (9. Aufl., S. 397–465). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_13
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Bremer, F. & Nowoseltschenko, K. (2019). Product models in embodiment design: an investigation of challenges and opportunities. *SN Applied Sciences*, 1, Artikel 1078. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1115-y>
- McCarthy, C. T., Annaidh, A. N. & Gilchrist, M. D. (2010). On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part II – Analysis of blade geometry. *Engineering Fracture Mechanics*, 77(3), 437–451. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.10.003>
- McCarthy, C. T., Hussey, M. & Gilchrist, M. D. (2007). On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part I – Indentation experiments. *Engineering Fracture Mechanics*, 74(14), 2205–2224. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.10.015>
- McGorry, R. W., Dowd, P. C. & Dempsey, P. G. (2005). The effect of blade finish and blade edge angle on forces used in meat cutting operations. *Applied ergonomics*, 36(1), 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2004.08.002>
- Meboldt, M., Matthiesen, S. & Lohmeyer, Q. (2012). The dilemma of managing iterations in time-to-market development processes. In P. Heisig & J. Clarkson (Hrsg.), *Modelling and management of engineering processes: Concepts, tools and case studies. Proceedings of the second International Conference on Modelling and Management of Engineering Processes (MMEP 2012)* (S. 127–139). Cambridge: University of Cambridge.

- Michalski, M. C., Desobry, S. & Hardy, J. (1997). Food materials adhesion: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 37(7), 591–619.
<https://doi.org/10.1080/10408399709527791>
- Mokhtarian, H., Coatanéa, E. & Paris, H. (2017). Function modeling combined with physics-based reasoning for assessing design options and supporting innovative ideation. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 31(4), 476–500.
<https://doi.org/10.1017/S0890060417000403>
- Muenzer, C. & Shea, K. (2017). Simulation-based computational design synthesis using automated generation of simulation models from concept model graphs. *Journal of Mechanical Design*, 139(7), Artikel 071101.
<https://doi.org/10.1115/1.4036567>
- Müller, R.-P., Schneid, F. & Hörberg, W. (2014). Cutting blade having a changing cutting angle(WO 2014/114579 A2). Weltorganisation für geistiges Eigentum.
- Musselman, K. J. (1998). Guidelines for success. In J. Banks (Hrsg.), *Handbook of simulation: Principles, methodology, advances, applications, and practice* (S. 719–743). New York, Chichester, Weinheim: John Wiley & Sons.
<https://doi.org/10.1002/9780470172445.ch22>
- Nagel, R. L., Stone, R. B., Hutcheson, R. S., McAdams, D. A. & Donndelinger, J. A. (2008). Function Design Framework (FDF): Integrated process and function modeling for complex systems. In *Proceedings of the ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Volume 4: 20th International Conference on Design Theory and Methodology; Second International Conference on Micro- and Nanosystems*. (S. 273–286). New York: ASME. <https://doi.org/10.1115/DETC2008-49369>
- Patzak, G. (1982). *Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme Grundlagen, Methoden, Techniken*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.
- Paynter, H. (1961). *Analysis and design of engineering systems*. Cambridge: MIT Press. <https://doi.org/10.5040/9781350983120>
- Pidd, M. (1999). Just modeling through: A rough guide to modeling. *Interfaces*, 29(2), 118–132.
- Ponn, J. & Lindemann, U. (2008). *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-68563-0>
- Ponn, J. & Lindemann, U. (2011). Produktgestalt. In J. Ponn & U. Lindemann (Hrsg.), *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte* (2. Aufl., S. 133–158). Berlin, Heidelberg: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-20580-4_6

- Rajaguru, P., Stoyanov, S., Tang, Y. K., Bailey, C., Claverley, J., Leach, R. & Topham, D. (2010). Numerical modelling methodology for design of miniaturised integrated products – An application to 3D CMM micro-probe development. In *Proceedings of the 11th International Thermal, Mechanical & Multi-Physics Simulation, and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)* (S. 1–8). New York: IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ESIME.2010.5464573>
- Rasoulifar, G., Prudhomme, G. & Brissaud, D. (2012). Coupling engineering knowledge with product design knowledge by the means of multiple view product model. In *Proceedings of the ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. Volume 3: Advanced Composite Materials and Processing; Robotics; Information Management and PLM; Design Engineering* (S. 777–783). New York: ASME.
<https://doi.org/10.1115/ESDA2012-82773>
- Reifenhäuser, U. (1989). Messer zum Schneiden von Gut in Scheiben(EP362573B1). Europäisches Patentamt.
- Riascos, R., Levy, L., Stjepandić, J. & Fröhlich, A. (2015). Digital mock-up. In J. Stjepandić, N. Wognum & W. J.C. Verhagen (Hrsg.), *Concurrent engineering in the 21st century* (S. 355–388). Cham: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-13776-6_13
- Rihtaršič, J., Žavbi, R. & Duhovnik, J. (2012). Application of wirk elements for the synthesis of alternative conceptual solutions. *Research in Engineering Design*, 23(3), 219–234. <https://doi.org/10.1007/s00163-012-0127-z>
- Roddeck, W. (2019). *Bondgraphen*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-25921-1>
- Rodenacker, W. G. (1991). *Methodisches Konstruieren* (4. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87484-0>
- Sarkar, B., Chakrabarti, A. & Ananthasuresh, G. K. (2017). Synthesis of feedback-based design concepts for sensors. *Research in Engineering Design*, 28(1), 131–151. <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0231-6>
- Schmitt, T. L. & Andres, M. (2019). *Methoden zur Modellbildung und Simulation mechatronischer Systeme*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-25089-8>
- Schneider, Y., Zahn, S. & Linke, L. (2002). Qualitative process evaluation for ultrasonic cutting of food. *Engineering in Life Sciences*, 2(6), 153–157. [https://doi.org/10.1002/1618-2863\(200206\)2:6<153::AID-ELSC153>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/1618-2863(200206)2:6<153::AID-ELSC153>3.0.CO;2-Z)
- Schuldt, S., Arnold, G., Kowalewski, J., Schneider, Y. & Rohm, H. (2016). Analysis of the sharpness of blades for food cutting. *Journal of Food Engineering*, 188, 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.04.022>

- Schuldt, S., Boden, L., Schneider, Y. & Rohm, H. (2016). Pre-crack cutting properties of viscoelastic food models. *Journal of Food Engineering*, 169, 272–277.
- Schuldt, S., Schneider, Y. & Rohm, H. (2018). High-speed cutting of foods: Cutting behavior and initial cutting forces. *Journal of Food Engineering*, 230, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.024>
- Schuldt, S., Witt, T., Schmidt, C., Schneider, Y., Nündel, T., Majschak, J.-P. & Rohm, H. (2018). High-speed cutting of foods: Development of a special testing device. *Journal of Food Engineering*, 216, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.001>
- Schwaber, K. (1997). SCRUM development process. In J. Sutherland, C. Casanave, J. Miller, P. Patel & G. Hollowell (Hrsg.), *Business object design and implementation* (S. 117–134). London: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0947-1_11
- Singh, A. P., Lakes, R. S. & Gunasekaran, S. (2006). Viscoelastic characterization of selected foods over an extended frequency range. *Rheologica Acta*, 46(1), 131–142. <https://doi.org/10.1007/s00397-006-0107-1>
- Spagnoli, A., Brighenti, R., Terzano, M. & Artoni, F. (2019). Cutting resistance of soft materials: Effects of blade inclination and friction. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 101, 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.02.017>
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York: Springer-Verlag.
- Steward, D. V. (1981). The design structure system: A method for managing the design of complex systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, EM-28(3), 71–74. <https://doi.org/10.1109/TEM.1981.6448589>
- Stüdemann, H. & Müchler, W. (1956). *Entwicklung eines Verfahrens zur zahlenmäßigen Bestimmung der Schneideigenschaften von Messerklingen. Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen: Bd. 177*. Köln und Opladen: Westdeutscher Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-663-04804-6_6
- Suh, N. P. (1990). *The principles of design. Oxford series on advanced manufacturing: Bd. 6*. New York: Oxford University Press.
- Szczesniak, A. S. (1963). Classification of textural characteristics. *Journal of Food Science*, 28, 385–389. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1963.tb00215.x>
- Szczesniak, A. S., Brandt, M. & Friedman, H. H. (1963). Development of standard rating scales for mechanical parameters of texture and correlation between the objective and the sensory methods of texture evaluation. *Journal of Food Science*, 28, 397–403. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1963.tb00217.x>

- Terzano, M., Spagnoli, A. & Stähle, P. (2018). A fracture mechanics model to study indentation cutting. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 41(4), 821–830. <https://doi.org/10.1111/ffe.12750>
- Thau, S. L. (2013). Heuristiken zur Analyse und Synthese technischer Systeme mit dem C&C²-Ansatz auf Basis von Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld. Dissertation. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung* (Bd. 66). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000036948>
- Umeda, Y., Takeda, H., Tomiyama, T. & Yoshikawa, H. (1990). Function, behaviour, and structure. In J. S. Gero (Hrsg.), *Applications of artificial intelligence in engineering V* (S. 177–194). Southampton, Berlin: Computational Mechanics Publications und Springer-Verlag.
- Vajna, S., Weber, C., Zeman, K., Hehenberger, P., Gerhard, D. & Wartzack, S. (2018). *CAX für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung* (3. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- van Vliet, T., Luyten, H. & Walstra, P. (1993). Time dependent fracture behaviour of food. In E. Dickinson & Royal Society of Chemistry. Food Chemistry Group (Hrsg.), *Special publication / Royal Society of Chemistry: Bd. 113, Food colloids and polymers: Stability and mechanical properties* (S. 175–190). : Royal Soc. of Chemistry.
- van Vliet, T. & Walstra, P. (1995). Large deformation and fracture behaviour of gels. *Faraday Discussions*, 101, 359-370. <https://doi.org/10.1039/fd9950100359>
- Vandenberghe, E., Charalambides, M. N., Mohammed, I. K., Ketelaere, B. de, Baerdemaeker, J. de & Claes, J. (2017). Determination of a critical stress and distance criterion for crack propagation in cutting models of cheese. *Journal of Food Engineering*, 208, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.005>
- VDI 2206:2004-06. *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 2211 Blatt 2:2003-03. *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Berechnungen in der Konstruktion*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 3843 Blatt1:2018-02. *Modellbildung Schwingungsfähiger Systeme*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI2221 Blatt1:2019-11. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI2223:2004-01. *Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Vermaas, P. E. (2009). The flexible meaning of function in engineering. In M. Norrell Bergendahl, M. Grimheden, L. Leifer, P. Skogstad & U. Lindemann (Hrsg.), *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering*

- Design (ICED 09), Vol. 2, Design Theory and Research Methodology* (S. 113–124). Glasgow: The Design Society.
- Vermaas, P. E. (2010). Technical functions: Towards accepting different engineering meanings with one overall account. In I. Horváth, F. Mandorli & Z. Rusák (Hrsg.), *Tools and methods of competitive engineering: Proceedings of TMCE 2010, April 12-16, Ancona, Italy* (S. 183–194). Delft: Delft University of Technology, Faculty of Design Engineering.
- Walter, C. (1931). Slicing machine(US1957623A). United states patent office.
- Watkinson, P., Coker, C., Crawford, R., Dodds, C., Johnston, K., McKenna, A. & White, N. (2001). Effect of cheese pH and ripening time on model cheese textural properties and proteolysis. *International Dairy Journal*, 11(4), 455–464. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(01\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(01)00070-X)
- Weber, C. (2005). CPM/PDD – An extended theoretical approach to modelling products and product development processes. In H. Bley, H. Jansen, F.-L. Krause & M. Shpitalni (Hrsg.), *Advances in methods and systems for development of products and processes: Proceedings of the 2. German-Israeli Symposium for Design and Manufacturing, Berlin, 6.-10.7.2005* (S. 159–179). Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag.
- Weber, C. (2012). Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften – eine kritische Zwischenbilanz. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X: Beiträge zum 23. DfX-Symposium Oktober 2012* (S. 25–62). Hamburg, Germany: Tuttech Verlag.
- Weber, C. (2014). Modelling products and product development based on characteristics and properties. In A. Chakrabarti & L. Blessing (Hrsg.), *An anthology of theories and models of design: Philosophy, approaches and empirical explorations* (S. 327–352). London: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1_16
- Wegener, F. E. & Cash, P. (2020). The future of design process research? Exploring process theory and methodology. In S. Boess, M. Cheung & R. Cain (Hrsg.), *Proceedings of DRS2020 International Conference, Vol. 5: Processes* (S. 1977–1992). : Design Research Society. <https://doi.org/10.21606/drs.2020.132>
- Weidmann, D., Isemann, M., Kandlbinder, P., Hollauer, C., Kattner, N., Becerril, L. & Lindemann, U. (2017). Product models in mechatronic design: Literature analysis on the interdisciplinary character of product models. In D. F. Kocaoglu (Hrsg.), *Proceedings of the 2017 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)* (S. 1–7). New York: IEEE. <https://doi.org/10.23919/PICMET.2017.8125397>

- Wettstein, A., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2021). Modeling dynamic mechanical system behavior using sequence modeling of embodiment function relations: case study on a hammer mechanism. *SN Applied Sciences*, 3, Artikel 128. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04149-8>
- Williams, J. G. (1998). Friction and plasticity effects in wedge splitting and cutting fracture tests. *Journal of Materials Science*, 33(22), 5351–5357.
- Wölkl, S. & Shea, K. (2009). A computational product model for conceptual design using SysML. In *Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Volume 2: 29th Computers and Information in Engineering Conference, Parts A and B*. (S. 635–645). New York: ASME. <https://doi.org/10.1115/DETC2009-87239>
- Wynn, D. C. & Clarkson, P. J. (2018). Process models in design and development. *Research in Engineering Design*, 29(2), 161–202. <https://doi.org/10.1007/s00163-017-0262-7>
- Wynn, D. C. & Eckert, C. M. (2017). Perspectives on iteration in design and development. *Research in Engineering Design*, 28(2), 153–184. <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0226-3>
- Wynn, D. C., Eckert, C. M. & Clarkson, P. J. (2007). Modelling iteration in engineering design. In J.-C. Bocquet (Hrsg.), *Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design (ICED 2007)* (Nr. DS42_P_561). Glasgow: The Design Society.
- Zheng, C., Hehenberger, P., Le Duigou, J., Bricogne, M. & Eynard, B. (2017). Multidisciplinary design methodology for mechatronic systems based on interface model. *Research in Engineering Design*, 28(3), 333–356. <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0243-2>
- Zingel, C., Albers, A., Matthiesen, S. & Maletz, M. (2012). Experiences and advancements from one year of explorative application of an integrated model-based development technique using C&C2-A in SysML. *IAENG International Journal of Computer Science*, 39(2), 165–181.

Vorveröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Forschungsarbeit entstanden sind:

- Bremer, F., Heimberger, F., Reichard, J. & Matthiesen, S. (2021). Analyzing iterations in mechanical design processes – a method for data acquisition in meso-level studies. *Procedia CIRP*, 100, 756–761. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.048>
- Bremer, F. & Matthiesen, S. (2020). A review of research relating to food slicing in industrial applications. *Journal of Food Engineering*, 268, Artikel 109735. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109735>
- Bremer, F. & Matthiesen, S. (2021). High-speed cutting with involute blades: Experimental research on cutting forces. *Journal of Food Engineering*, 293, Artikel 110380. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110380>
- Grauberger, P., Bremer, F., Sturm, C., Hoelz, K., Wessels, H., Gwosch, T., Wagner, R., Lanza, G., Albers, A. & Matthiesen, S. (2020). Qualitative modelling in embodiment design - Investigating the contact and channel approach through analysis of projects. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, 897–906. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.260>
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Bremer, F. & Nowoseltschenko, K. (2019). Product models in embodiment design: an investigation of challenges and opportunities. *SN Applied Sciences*, 1, Artikel 1078. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1115-y>
- Sturm, C., Bremer, F. & Matthiesen, S. (2019). Design for vibration reduction – An overview of models for product development with focus on excitation and transmission of vibrations of technical systems. *Procedia CIRP*, 84, 662–666. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.254>
- Sturm, C., Steck, M., Bremer, F., Revfi, S., Nelius, T., Gwosch, T., Albers, A. & Matthiesen, S. (2021). Creation of digital twins - Key characteristics of physical to virtual twinning in mechatronic product development. *Proceedings of the Design Society*, 1, 781–790. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.78>

Glossar

Begriff	Definition
Gestalt-Funktion-Zusammenhang	Als Gestalt-Funktion-Zusammenhang (GFZ) wird der Zusammenhang zwischen den Merkmalen und Eigenschaften einer Gestalt und der Funktion oder dem Verhalten bezeichnet (Matthiesen, 2021).
Erfolgsfaktor	Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird Erfolgsfaktor als Bezeichnung zusammenfassender Begriff für Aspekte verwendet, die ein erfolgreiches Vorgehen ausmachen. Die Erfolgsfaktoren sollen Aufschluss darüber geben, worauf bei der Planung und Durchführung von Vorhaben geachtet werden sollte.
Slicer	Bezeichnung für Maschinen zum Aufschneiden von Lebensmitteln für die Produktion von Selbstbedienungsware im industriellen Maßstab.
Sichelmesser	Bezeichnung für Messer mit sichelförmiger Schneidkante.