

Modelle und Methoden zur systematischen Entwicklung hygienegerechter Produkte

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Jean-Paul Beetz, M.Sc.

aus Schotten

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen

Tag der Einreichung: 02.10.2018

Tag der mündlichen Prüfung: 05.12.2018

Darmstadt 2018

D17

Beetz, Jean-Paul:

Modelle und Methoden zur systematischen Entwicklung hygienegerechter Produkte
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2018

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-82814

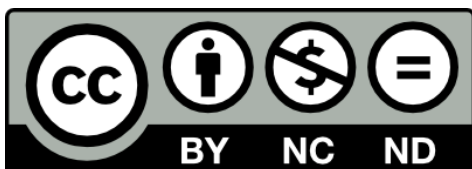
URI: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/8281>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von TUprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente pmd der Technischen Universität Darmstadt. Nach vier intensiven Jahren am Fachgebiet möchte ich mich all denjenigen Personen bedanken, die mich während dieser Zeit unterstützt haben.

Besonders möchte ich mich bei meinem Doktorvater und Leiter des Fachgebiets Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner für die Betreuung der Arbeit sowie der vielen fachlichen Anregungen bedanken. Die intensiven Gespräche und die Beispiele aus der Automobilindustrie haben unter anderem dazu geführt, dass diese Arbeit die notwendige inhaltliche Breite erhielt. Ich möchte mich bei dir für das entgegengebrachte Vertrauen bedanken, die vielschichtigen Anregungen und Hinweise waren mir nicht allein für diese Arbeit von großem Nutzen, sondern haben auch meine persönliche sowie fachliche Entwicklung geprägt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen danke ich für die freundliche Übernahme der Mitberichterstattung sowie die intensiven und spannenden Gespräche, in welchen Sie durch Ihre gezielten Fragen zu einer inhaltlichen Schärfung meiner Arbeit verholfen haben. Mit Ihrer wissenschaftlichen Expertise im Bereich der Konstruktionsmethodik haben Sie mich stets inspiriert und waren der ideale Ansprechpartner für meine Forschungsarbeit.

Dr.-Ing. Hermann Kloberdanz danke ich für das entgegengebrachte Vertrauen mich in einer schwierigen Phase für das Fachgebiet eingestellt und mir während der gesamten Zeit am Fachgebiet motivierend und fördernd zur Seite gestanden zu haben. Unsere Gespräche, die oftmals über die reine Forschungsarbeit hinausgingen, werde ich in guter Erinnerung behalten.

Für die spannende Zeit, in der ich viel Praxiserfahrung sammeln durfte, danke ich den Mitarbeitern der OKA-Spezialmaschinenfabrik. Die Möglichkeit bei der Entwicklung einer derartigen Maschine maßgeblich beitragen zu dürfen empfinde ich als große Bereicherung und möchte mich an dieser Stelle bei Matthias Drees für das Vertrauen bedanken. Bessere Kollegen als Jens Sensfelder und Aaron Wendt kann ich mir für ein solches Projekt nicht vorstellen, ich habe vieles durch euch gelernt und werde mich gerne an die Zeit zurückerinnern.

Weiterhin gilt mein Dank allen ehemaligen Mitarbeitern sowie den derzeitigen Mitarbeitern der AB Smart Bearings, Mechatronische Maschinenelemente sowie dem AB Additive Fertigung des Fachgebiets pmd für eine konstruktive, kreative, stets kollegiale und anregende Arbeitsatmosphäre. Namentlich hervorheben möchte ich hier besonders Tillmann Freund, Christian Wagner, Jan Würtenberger, Sven Vogel, Sandra Link, Tobias Schirra sowie Pia Schlemmer. Ihr habt das Arbeiten am Fachgebiet neben der vielen fachlichen

Diskussionen auch durch persönliche Gespräche und durch die richtigen Worte in den richtigen Momenten sehr angenehm gestaltet.

Ein großer Dank für die entgegengebrachte Geduld und die stets kompetente Unterstützung in der Werkstatt gilt Torsten Beer und Matthias Schaschek. Ich danke darüber hinaus allen Studenten, die durch ihre studentischen Arbeiten oder HiWi-Tätigkeiten zum Inhalt meiner Arbeit beigetragen haben.

Zuletzt gilt mein größter Dank den drei wichtigsten Personen in meinem Leben. Meiner Mutter und meiner Schwester, die immer weit über den Umfang dieser Forschungsarbeit an mich geglaubt und mich unterstützt haben. Aus tiefstem Herzen danke ich meiner Freundin Tanja. Du hast mir in den schwierigsten Phasen den Rücken freigehalten, mich stets motiviert und mir Kraft gegeben, diesen Weg zu meistern. Ich bin sehr froh, euch zu haben.

Bad Soden am Taunus, 17.12.2018

Jean-Paul Beetz

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	1
Abstract	2
1 Einleitung	3
1.1 Motivation.....	3
1.2 Aufbau der Arbeit	7
2 Stand der Forschung	9
2.1 Grundlagen zur hygienegerechten Gestaltung	9
2.1.1 Bestehende Konstruktionshilfsmittel für eine hygienegerechte Produktgestalt.....	11
2.1.2 Risikobewertung hygienegerechter Produkte	13
2.1.3 Sauberkeitsanforderungen in weiteren Anwendungsgebieten.....	18
2.2 Grundlagen der Konstruktionsmethodik	20
2.2.1 Grundlagen und Definitionen zu Modellen und Methoden	21
2.2.2 Technische Systeme, Produkte und Prozesse	23
2.2.3 Grundlagen zu Produktentwicklungsprozessen.....	37
3 Forschungsbedarf und Zielsetzung der Arbeit	44
3.1 Ausgangssituation und Forschungsbedarf	44
3.2 Zielsetzung der Arbeit und Forschungsfragen.....	46
4 Zentrale Modelle der Arbeit	48
4.1 Zweck der Modellbildung.....	48
4.2 Prozessmodell.....	48
4.2.1 Prozesse und Verfahren im Prozessmodell.....	49
4.2.2 Funktionale Zusammenhänge im System	52
4.2.3 Modellierung technischer Systeme.....	54
4.3 Wirkraummodell	59
4.3.1 Elemente des Wirkraummodells und Definitionen	59
4.3.2 Eigenschaften des Wirkraummodells und der Modellelemente	63
4.3.3 Modellierung technischer Systeme mittels Wirkraummodell.....	66
4.4 Zusammenfassung der zentralen Modelle der Arbeit	68
5 Wirkraumbasierte Analyse für eine hygienegerechte Gestalt	70
5.1 Zentrale Phasen und Prozesse im Produktlebenslauf hygienegerechter Produkte	71
5.2 Kategorisierung unbeabsichtigter Wirkungen	73

5.3	Abgeleitete Anforderungen zur Entwicklung hygienegerechter Produkte.....	75
5.4	Analyseschritte zur Entwicklung hygienegerechter Produkte	80
5.4.1	Nutzung des Wirkraummodell zur Analyse beabsichtigter Prozesse und Funktionen.....	81
5.4.2	Nutzung des Wirkraummodells zur Analyse unbeabsichtigter Prozesse und Ermittlung von Nicht-Funktionen.....	87
6	Synthese hygienegerechter stoffverarbeitender Systeme.....	100
6.1	Syntheseprinzipien in der Gestaltung.....	101
6.2	Gestaltsynthese hygienegerechter Produkte mit dem Wirkraummodell	102
6.2.1	Umsetzung von Anforderungen an eine hygienegerechte Gestalt....	102
6.2.2	Ausnutzung synergetischer Zusammenhänge.....	112
6.3	Ableiten von Gestalteigenschaften mit Hilfe des Wirkraummodells.....	115
7	Evaluation anhand der Konstruktion einer hygienegerechten Schokoladengießmaschine.....	121
7.1	Grundlagen und Ausgangslage der Entwicklung.....	121
7.2	Schwachstellenanalyse des Ausgangssystems	124
7.3	Gestaltsynthese neuer Lösungen.....	131
8	Fazit.....	140
8.1	Ergebnisse	140
8.2	Ausblick auf weitere Forschung.....	142
	Anhang A – Hauptteil	143
	Anhang B – Glossar	145
	Literaturverzeichnis	148
	Eigene Veröffentlichungen	162
	Betreute studentische Arbeiten	163

Abkürzungsverzeichnis

ASME	American Society of Mechanical Engineers
AZ	Anfangszustand
C	Connector
CCP	Critical Control Point
CiP	Cleaning in Place
CoP	Cleaning off Place, Cleaning out of Place
CPM	Characteristics-Properties-Modelling
C&CM	Contact and Channel Modell
C&C ² -A	Contact and Channel-Ansatz
E	Eigenschaft
EG	Europäische Gemeinschaft
EHEDG	European Hygienic Equipment and Design Group
EU	Europäische Union
EZ	Endzustand
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GMP	Good Manufacturing Practice
GPPE	Ganzheitliche Produkt- und Prozessentwicklung
HACCP	Hazard Analysis and Critical Control Points
HEPA	High Efficiency Particulate Air Filter
IAFIS	International Association of Food Industry Suppliers
iPeM	Integriertes Produktentstehungs-Modell
KA	Kernanforderung
LSS	Leitstützstruktur
MIF	Milk Industry Foundation
NSF	National Sanitation Foundation
ULPA	Ultra Low Penetration Air Filter
UMEA	Uncertainty Mode and Effects Analysis
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
WB	Wirkbewegung
WE	Wirkelement
WF	Wirkfläche
WFP	Wirkflächenpaar
WG	Wirkgröße
WHO	World Health Organization

WK	Wirkkörper
WRK	Wirkraumkontakt
WRF	Wirkraumfläche
ZHO	Zielsystem, Handlungssystem, Objektsystem
ZZ	Zwischenzustand

Kurzfassung

Die Motivation dieser Forschungsarbeit begründet sich in dem steigenden Bedarf an Produkten mit einer hygienegerechten Produktgestalt, nicht nur in der Lebensmittelindustrie, sondern gleichermaßen in anderen Bereichen, beispielsweise in der Medizintechnik. Die Folgen der Missachtung von Hygieneanforderungen bei der Gestaltung sind sehr unterschiedlich und betreffen in der Lebensmittelindustrie einerseits den Maschinenbetreiber durch einen erhöhten Reinigungsaufwand, andererseits durch eine Erhöhung des Kontaminationsrisikos den Endkunden des Maschinenbetreibers, also den Lebensmittelkonsumenten. Bisherige Konstruktionshilfsmittel für die Entwicklung hygienegerechter Produkte fokussieren vor allem die Entwicklungsphase der Feingestaltung und basieren auf der Erfahrung von Experten hinsichtlich spezieller Baugruppen. Die Konstruktionshilfsmittel liegen zumeist in Form von Gestaltungsbeispielen vor und sollen bei der Optimierung bereits festgelegte Bauteile unterstützen. Gilt es hingegen neue, innovative Produkte zu entwickeln, existieren oftmals nur unzureichende oder nicht passende Hilfsmittel, da die Gestaltungsbeispiele lediglich bei der Optimierung bekannter Probleme einen Nutzen beitragen.

Eine vielversprechende Möglichkeit zur Erweiterung der Unterstützung bei der Entwicklung hygienegerechter Produkte, welche von den bisherigen Konstruktionshilfsmitteln nicht erfasst werden, stellen Modellansätze dar, welche die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge eines Produkts abbilden, bspw. der Contact and Channel-Ansatz (C&C²-Ansatz). Diese Ansätze beschränken sich jedoch auf die Abbildung beabsichtigter Funktionen oder Fehlfunktionen und sind nicht in der Lage bei der Aufdeckung fehlender Funktionen, beispielsweise fehlender Dichtfunktionen, die zur Leckage führen, zu unterstützen, welche im Bereich der Entwicklung hygienegerechter Produkte von zentraler Bedeutung sind.

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist die bisherigen Möglichkeiten zur Entwicklung hygienegerechter Produkte zu erweitern, sodass Produktentwickler nicht mehr ausschließlich auf bestehende Gestaltungsbeispiele zurückgreifen müssen. Grundlage für die methodische Unterstützung bei der Umsetzung hygienerelevanter Anforderungen in der Phase der Gestaltung ist das in dieser Forschungsarbeit entwickelte *Wirkraummodell* als Erweiterung des C&C²-Ansatzes. Es wird gezeigt, dass fehlende Funktionen eines Produkts, sogenannte *Nicht-Funktionen*, Schwachstellen sind, die zu Kontamination führen können. Mit Hilfe des Wirkraummodells lassen sich systematisch verschiedene technische Systeme mit Hygienerelevanz analysieren und bisher nicht identifizierbare Schwachstellen aufdecken. Darauf aufbauend wird gezeigt, dass verschiedene Syntheseprinzipien zur Umsetzung einer hygienegerechten Produktgestalt genutzt werden können. Das Wirkraummodell wird während des Festlegens von Gestalteeigenschaften unterstützend genutzt, um die Anzahl hygienerelevanter Schwachstellen zu senken.

Abstract

The need for hygienic products does not only affect products of the food industry but also in other areas such as medical products and has seen immense growth in recent years. The consequences of disregarding hygienic requirements are different: on the one hand within the food industry they affect the machine operator by an increased cleaning effort, on the other hand, they affect food consumers by an increased risk of contamination. Previous tools for the development of cleanliness relevant products focus on design details and are based on empirical knowledge of experts with regard to special assemblies. Most tools are design examples and aim on assisting during the optimisation of already designed components. When it comes to designing new, innovative products, existing tools are often insufficient or inappropriate, since the design examples only contribute to the optimization of known problems.

Promising approaches to extend the support for designing cleanliness relevant products are product models that represent embodiment-function relationships of a product, such as the Contact and Channel-approach (C&C²-approach). However, these approaches are limited since they focus on intended functions or malfunctions and are unable to assist in detecting missing functions, such as missing sealing functions that lead to leakage, which are of central importance in the area of cleanliness relevant products.

The aim of this research is to extend the possibilities for the development of hygienic products, so that developers do no longer have to rely exclusively on design examples. The methodological support for the implementation of hygiene-relevant requirements into the embodiment phase is based on the *Working Space Model* as an extension of the C&C² approach. This research work shows that missing functions of a product, so-called *not-functions*, are triggers for weak points, which can lead to contamination. With the help of the *Working Space Model*, designers are able to analyse systematically various technical systems with hygiene relevance. Previously unidentifiable not-functions are detectable with the help of the *Working Space Model*. Based on this finding, it is shown that various principles of synthesis can be used to realise a hygienic product design. The *Working Space Model* supports designer during the definition of design properties in order to reduce the number of hygiene-relevant weak points.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Eine hygienegerechte Produktgestalt ist im Bereich lebensmittelverarbeitender Maschinen von zentraler Wichtigkeit, da hierdurch einerseits ein geringerer Aufwand hinsichtlich der Reinigung der Maschine zu erwarten ist, andererseits führt eine hygienegerechte Produktgestalt zu einer Senkung des Kontaminationsrisikos des zu verarbeitenden Lebensmittels. Aber nicht nur im Bereich der Lebensmittelindustrie spielt Sauberkeit in der heutigen Zeit eine wichtige Rolle, andere Industriezweige erfahren durch strikere Anforderungen ebenfalls die Notwendigkeit Produkte derart zu konstruieren, dass in relevanten Phasen des Produktlebenslaufs das Risiko einer Kontamination gesenkt wird.

Der extreme technische Fortschritt in der Automobilbranche hinsichtlich der Effizienzsteigerung im Bereich der Antriebstechnik, der Reduzierung von Verbrauch und Emissionen sowie die Erhöhung der Zuverlässigkeit durch die konsequente Weiterentwicklung von Sicherheitssystemen bedingt eine Erhöhung der Sauberkeitsanforderungen in der Fertigung und Montage von Automobilkomponenten. Auf Grund vermehrter Schädigungen durch Restschmutz, d. h. durch Kontamination, beispielsweise bei Anti-Blockier-Systemen oder Direkteinspritz-Systemen in Fahrzeugen, entwickelte sich bereits in den 1990er Jahren ein erhöhtes Interesse an dem Thema der *Technischen Sauberkeit*. Infolgedessen fand in den Jahren ab 2000 eine fortschreitende Standardisierung hinsichtlich der Sauberfertigung sowie dem Nachweis der Sauberkeit statt und *Technische Sauberkeit* entwickelte sich zu einem zentralen Qualitätsmerkmal der Automobilbranche.¹

Befinden sich unbeabsichtigt Partikel in Fluidsystemen von Fahrzeugen, kann dies zu erheblichen Störungen oder dem Versagen ganzer sicherheitsrelevanter Systeme führen.² Aufgrund dessen stellt das Vermeiden des Partikeleintrags, der Partikelverschleppung sowie der Partikelentstehung in jedem einzelnen Prozess entlang des Produktlebenszyklus die zentrale Vorgabe der *Technischen Sauberkeit* dar.

Anhand des nachfolgenden Beispiels soll die Motivation zur Anfertigung dieser Forschungsarbeit aufgezeigt werden. Bei modernen Sportwagen, wie z. B. dem Honda NSX, werden Automatikgetriebe mit Doppelkupplungen eingesetzt, die ein Fahren ohne Zugkraftunterbrechung ermöglichen. Zur automatisierten Kupplungsansteuerung hat *Schaeffler* den in Abbildung 1.1 schematisch dargestellten hydrostatischen Kupplungsaktor entwickelt, welcher durch Betätigung eines Kolbens mit Hilfe eines EC-Motor ein Fluid verdrängt, das über einen Mitnehmerzylinder die Kupplungsbetätigung ermöglicht.

¹ Vgl. Rochowicz, Ernst (2006), S. 60-63.

² Vgl. Kolaric (2015), S. 120.

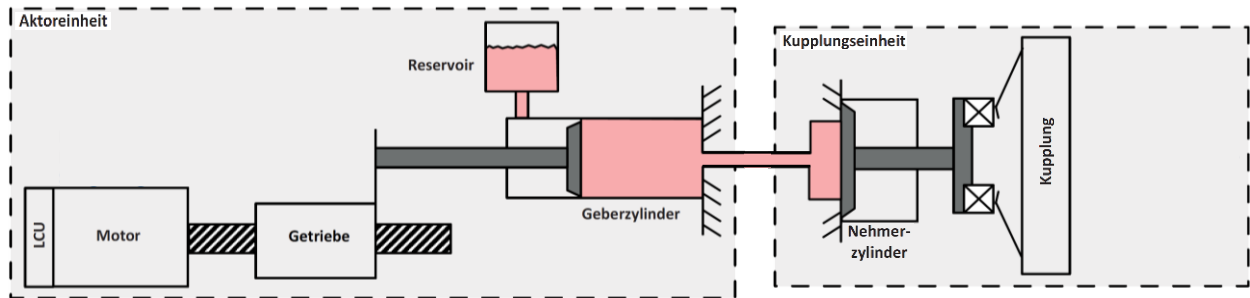


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung des Kupplungssystems³

Insbesondere im Fluidsystem dürfen während der Nutzung keine Partikel vorhanden sein, da hierdurch beispielsweise Dichtungen beschädigt oder Sensoren negativ beeinflusst werden, sodass ein Ansteuern der Doppelkupplung nicht mehr sichergestellt wird. Bei der Montage des *T-Adapters* im Gehäuse, vgl. Abbildung 1.2a und b, wurde das Entstehen von Spänen festgestellt, vgl. Abbildung 1.2c, wodurch wesentliche Anforderungen der *Technischen Sicherheit* nicht mehr erfüllt werden.

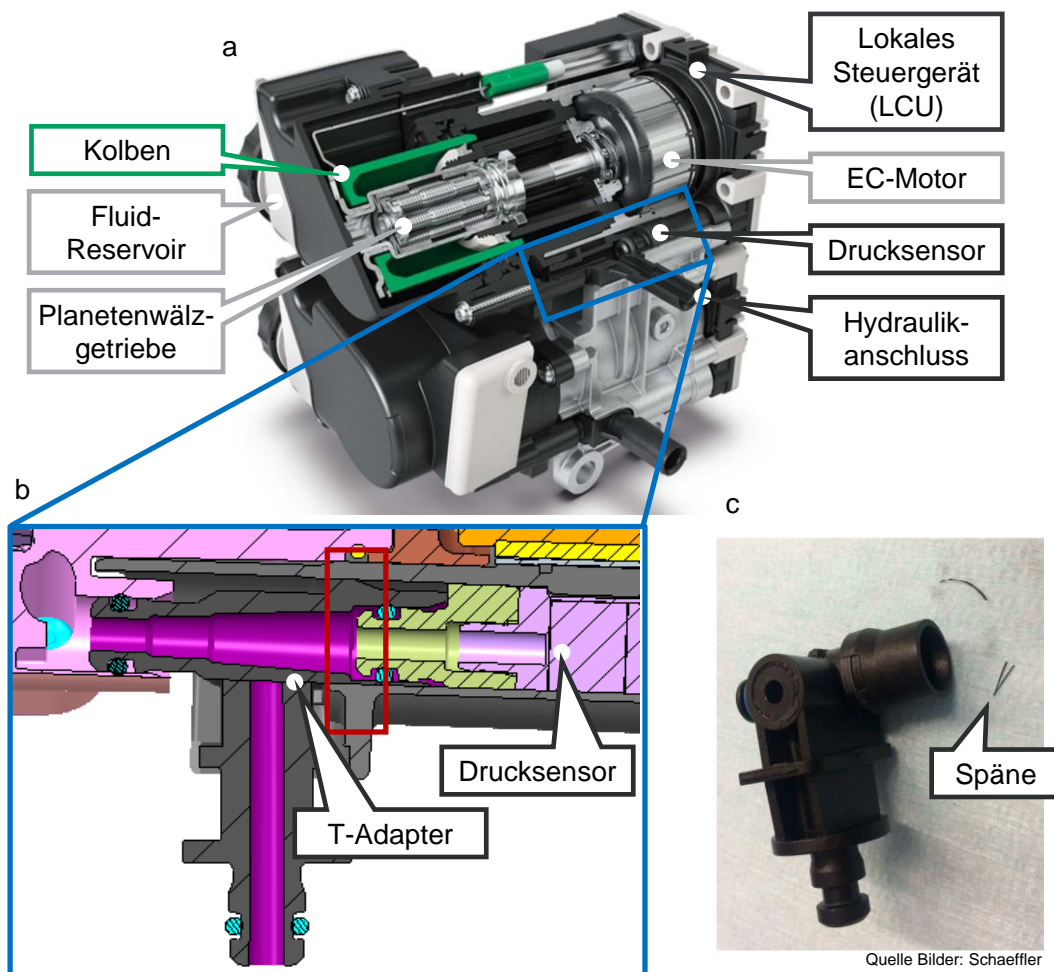


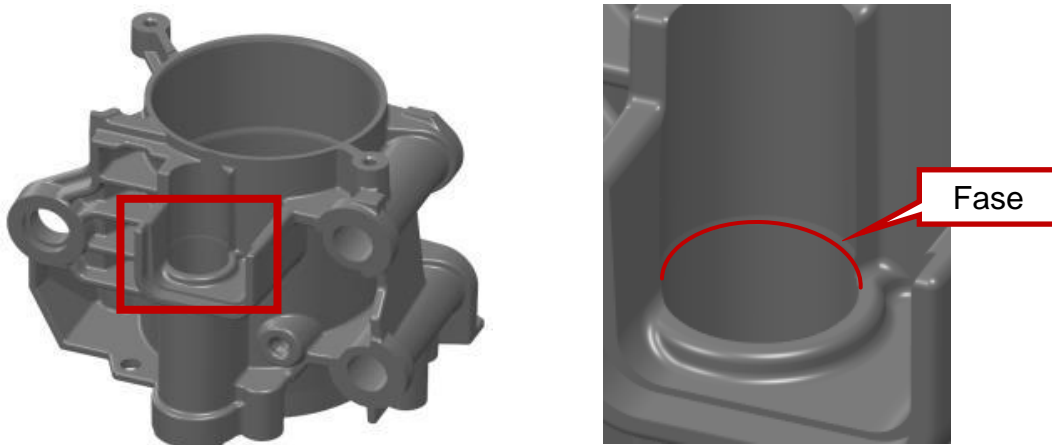
Abbildung 1.2: a: Aufbau des hydrostatischen Kupplungsaktors, b: Ort der Spanentstehung, c: T-Adapter im Detail mit entstandenen Spänen

³ In Anlehnung an Müller et al. (2010), S. 174.

Eine Verlegung der Montage in einen Sauberraum führt in diesem Fall zu keiner Reduktion der Spanentstehung, da die Späne erst durch den Prozess des *Einpressens* des T-Adapters in das Gehäuse entstehen und die Späne im geschlossenen Gehäuse verbleiben. Dieses Beispiel zeigt, dass nachträgliche Maßnahmen zur Vermeidung der Kontaminationsbildung nicht immer zu einem befriedigenden Ergebnis führen und in einem Fehlschlagen der Entwicklung resultieren können.

Erfolgreiche Produkte zeichnen sich oftmals dadurch aus, dass sämtliche Prozesse des Produktlebenslaufs antizipiert werden und notwendige Maßnahmen zu potenziell auftretenden Schwachstellen bereits während der Entwicklung berücksichtigt werden.⁴

Die Ursachen für die Spanentstehung wurden von *Schaeffler* anhand von zwei Schwachstellen begründet. Einerseits entstehen Späne durch eine Gehäusefase, welche durch die Lage sowie die scharfe Kante die Wahrscheinlichkeit der Spanentstehung erhöht, vgl. Abbildung 1.3.



Quelle Bilder: Schaeffler

Abbildung 1.3: Fase im Gehäuse als eine Ursache der Spanentstehung

Andererseits erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Spanentstehung durch die große Anzahl von Klemmrippen des T-Adapters, wodurch die Funktion der Klemmung sichergestellt werden soll, vgl. Abbildung 1.4. Jede Klemmrippe besitzt auf Grund der Geometrie während des Einpressprozesses das Potenzial abgetragen zu werden, d. h. existieren mehr Klemmrippen als für die Klemmwirkung notwendig sind erhöht sich das Potenzial zur Spanbildung.

⁴ Vgl. Lossack (2006), S. 262.

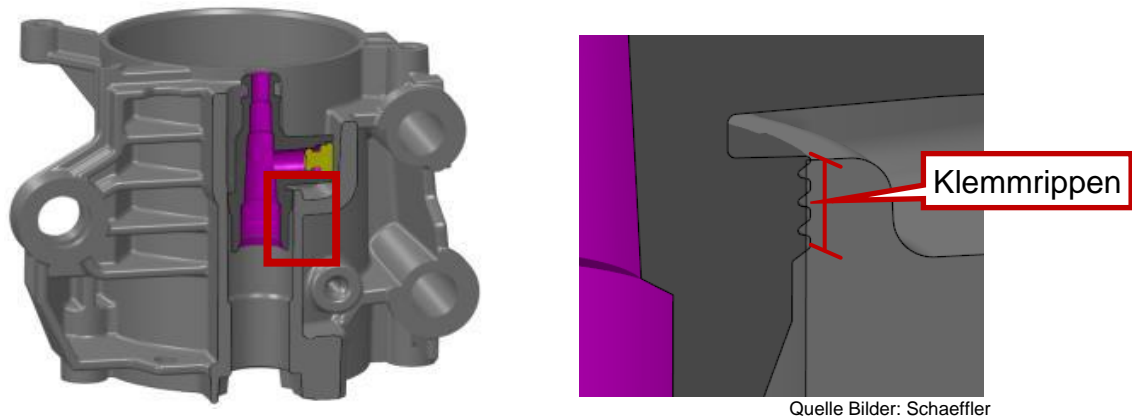


Abbildung 1.4: Anzahl und Größe der Klemmrippen im T-Adapter als weitere Ursache der Spanentstehung

Aus diesen Gründen wurde nachträglich die Gestalt der Bauteile gemäß Abbildung 1.5 angepasst. Die scharfe Kante im Gehäuse wurde verschoben, vgl. Abbildung 1.5a, sowie der Durchmesser der Bohrung vergrößert, vgl. Abbildung 1.5b. Weiterhin wurde die Anzahl der Klemmrippen soweit reduziert, dass immer noch eine ausreichend große Klemmkraft erreicht und zeitgleich die Spanbildung minimiert wird. Neben den geometrischen Anpassungen wurden die Montageprozesse angepasst, indem der T-Adapter nach dem ersten Einpressen erneut entfernt wird, die möglicherweise entstandenen Späne entfernt werden und schließlich der T-Adapter spanfrei eingepresst wird.

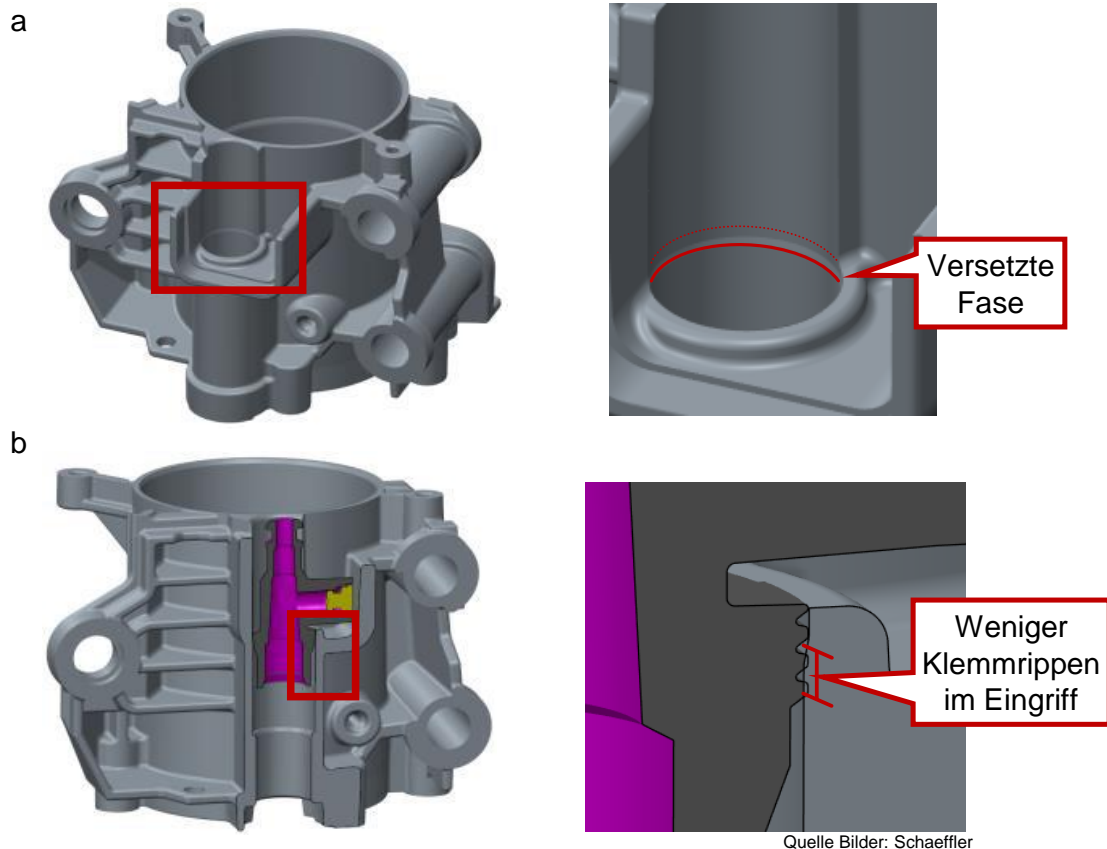


Abbildung 1.5: Maßnahmen zur Reduzierung der Spanentstehung a: Versetzte Fase im Gehäuse, b: Weniger Klemmrippen im Eingriff durch Anpassung des Gehäuses

Im Nachhinein erscheint das Beheben derartiger Schwachstellen oftmals offensichtlich, jedoch existieren während des Entwicklungsprozesses zahlreiche derartiger potenzieller Kontaminationsursachen, welche es zu bewältigen gilt. Aus diesem Grund ergibt sich das Potenzial Produktentwickler methodisch bei dem Aufdecken derartiger Schwachstellen während des Entwicklungsprozesses zu unterstützen, sodass nachträgliche, möglicherweise aufwendige Änderungen verhindert werden. Hierzu müssen geeignete Produkt- und Prozessmodelle sowie Methoden gefunden oder entwickelt werden, die bei der Entwicklung hygienegerechter Produkte, d. h. Produkte, bei denen Sauberkeit eine hohe Wichtigkeit hat, genutzt werden können. Diese Forschungsarbeit leistet hierzu einen Beitrag, indem mit Hilfe geeigneter Modelle das Aufdecken hygienerelevanter Schwachstellen ermöglicht und das Umsetzen in eine hygienegerechte Produktgestalt unterstützt werden soll.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in insgesamt acht Kapitel. Aufbauend auf der *Einleitung* wird im *Stand der Forschung* in Kapitel 2 ein Überblick der relevanten Grundlagen für die nachfolgenden Kapitel gegeben. Im Fokus stehen die Grundlagen und Ziele zur Entwicklung hygienegerechter Produkte sowie bisherige Ansätze zur Modellierung technischer Produkte, technischer Prozesse sowie von Produktentwicklungsprozessen.

In Kapitel 3 werden basierend auf dem Stand der Forschung die Defizite existierender Ansätze zur Entwicklung hygienegerechter Produkte dargelegt und in einen darauf aufbauenden Forschungsbedarf überführt. Die Zielstellung der Arbeit wird anschließend durch Forschungsfragen, welche innerhalb dieser Arbeit beantwortet werden, detailliert.

Kapitel 4 umfasst die zentralen Modelle der Arbeit. Dieses Kapitel thematisiert die theoretischen Grundlagen zur Modellierung technischer Systeme unter dem Aspekt von Hygiene. Hierzu wird zunächst ein vorhandenes Prozessmodell, das für die spezielle Anwendung angepasst wird, genutzt, um den Zusammenhang von einer hygienegerechten Produktgestalt sowie (Nutzungs-)Prozessen und Produkt herauszuarbeiten. Anschließend wird das neue Wirkraummodell vorgestellt, welches die zweckmäßige Modellierung von Produkten unter hygienerelevanten Aspekten ermöglicht.

Mit Hilfe der erarbeiteten Modelle aus Kapitel 4 werden in Kapitel 5 zunächst basierend auf den relevanten Produktlebenslaufphasen die Anforderungen an hygienegerechte Produkte strukturiert abgebildet und unbeabsichtigte Wirkungen charakterisiert. Nachfolgend werden verschiedene Methoden erarbeitet, welche die Analyse technischer Systemen unter dem Aspekt von Hygiene ermöglichen. Dabei soll wird aufgezeigt, wie das Wirkraummodell bei der Analyse hygienerelevanter Schwachstellen eingesetzt werden kann.

Kapitel 6 verdeutlicht, inwieweit mit Hilfe der Analyseergebnisse das Wirkraummodell bei der Synthese hygienegerechter Produkte eingesetzt werden kann. Hierbei wird insbesondere auf die Phase des Gestaltens Bezug genommen. Weiterhin wird an verschiedenen Beispielen unterschiedlicher Industriebereiche verdeutlicht, dass mit Hilfe des Wirkraummodells Gestalteigenschaften abgeleitet werden können.

Kapitel 7 evaluiert die Möglichkeiten für den Einsatz des Wirkraummodells bei der Analyse und Synthese hygienegerechter Produkte anhand der Entwicklung einer Schokoladengießmaschine innerhalb eines Industrieprojekts.

Abschließend werden in Kapitel 8 werden die zentralen Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und Möglichkeiten zu nachfolgenden Forschungsvorhaben in Form eines Ausblicks aufgezeigt.

2 Stand der Forschung

Dieses Kapitel beinhaltet die Grundlagen aus dem Stand der Forschung, die für das Verständnis der Arbeit in den Kapiteln 3, 4, 5 und 6 notwendig sind. Das vorliegende Kapitel gliedert sich in zwei wesentliche Teile. Zunächst werden in Abschnitt 2.1 die Grundlagen und Ziele der hygienegerechten Gestaltung beschrieben, bestehende Hilfsmittel zur Umsetzung der Anforderungen an die Gestalt erläutert sowie angrenzende Themengebiete aufgegriffen. Der zweite Teil des Kapitels, Abschnitt 2.2, fokussiert die Grundlagen der Konstruktionsmethodik. Da Konstruktionsmethodik auf Modellen und Methoden aufbaut, wird zunächst die Theorie von Modellen und Methoden besprochen. Daran schließen sich die Grundlagen zur Modellierung technischer Systeme an, die einen entscheidenden Beitrag zum Verständnis des Zusammenwirkens von Elementen technischer Systeme beitragen. Abschließend werden wesentliche Vorgehensweisen zur systematischen Produktentwicklung dargelegt.

2.1 Grundlagen zur hygienegerechten Gestaltung

Der Begriff „Hygiene“ stammt aus der griechischen Sprache „ὑγιεινή [τέχνη]“ – „hygieiné [téchne]“ und bedeutet „*der Gesundheit zuträglich[e Kunst, Wissenschaft]*“.⁵ Nach der Weltgesundheitsorganisation WHO umfasst das Thema *Hygiene* Bedingungen und Praktiken, die auf den Erhalt der Gesundheit und Verhinderung der Ausbreitung von Krankheiten zielen.⁶

Ziel staatlicher Gesundheitsbehörden ist es, Produkte für die Ernährung oder zur Behandlung von Lebewesen⁷ weitestgehend frei von schädlichen Einflüssen zu halten. Der Verbraucherschutz zielt daher auf Produktsicherheit ab, um Lebewesen vor Hygienerisiken⁸, wie z. B. gesundheitsgefährdenden Substanzen zu schützen.⁹ Hygienerisiken entstehen ebenfalls durch das Vorhandensein von Mikroorganismen¹⁰ im Lebensmittel, die meist am Verderbprozess des Lebensmittels beteiligt sind.¹¹ In Abhängigkeit der Anfälligkeit des Lebensmittels gegenüber des Mikroorganismen-Ansiedelns und -Wachstums, existieren unterschiedlich strikte Anforderungen hinsichtlich der Hygiene.¹²

⁵ Dudenredaktion (2018a).

⁶ Vgl. WHO (2000), S. 5.

⁷ Hierzu zählen insbesondere Menschen sowie Tiere.

⁸ Im Gegensatz zu Risiken, die den Anwender der Maschine betreffen (Sicherheitsrisiken), betreffen Hygienerisiken primär die Kontamination des zu verarbeitenden Produkts.

Vgl. DIN EN ISO 14159 (2008), S. 4.

⁹ Vgl. DIN EN ISO 14159 (2008), S. 4.

¹⁰ Hierzu zählen u. a. Pilze, Bakterien und Hefen, vgl. Fritsche (2016), S. 2-3.

¹¹ Vgl. Wallhäußer (1990), S. 33-51.

¹² Vgl. EHEDG (2004), S. 5.

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für Deutschland für den Umgang mit Lebensmitteln sind in dem Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch (LFGB) verankert, die auf den EU-Verordnungen Nr. 178/2002 (Basisverordnung), 852-854/2004 (Hygienepaket) sowie 1935/2002 (Materialien und Gegenstände) basieren und in nationales Recht umgesetzt wurden. Dieser rechtliche Rahmen stellt bei der Verarbeitung von Lebensmitteln die Lebensmittelsicherheit in den Fokus und beinhaltet alle Produktions- und Verarbeitungsstufen der Lebensmittelkette.¹³

Hygienic Design umfasst die hygiene- bzw. reinigungsgerechte Gestaltung von Produkten (Maschinen und Anlagen), um eine kontaminationsfreie Verarbeitung von Lebensmitteln im Sinne des Verbraucherschutzes zu gewährleisten.¹⁴ Weiterhin trägt die hygiene-gerechte Gestaltung dazu bei, die „[...] *Reinigung und Desinfektion sicherer, einfacher und kostengünstiger zu machen* [...]“.¹⁵

Unter Kontamination (lateinisch „contaminare“ – „besudeln“) wird bei der Lebensmitteltechnik das nicht beabsichtigte Zusetzen oder Entstehen von biologischen und chemischen Substanzen und anderweitigen Fremdstoffen¹⁶, als Folge von Prozessen während der gesamten Lebensmittelverarbeitungskette bezeichnet. Hierzu zählen insbesondere die Lebenslaufphasen der Rohstoffverarbeitung, der Herstellung, der Verarbeitung, der Vorbereitung, der Behandlung, des Verpackens, des Transports sowie des Besitzes.¹⁷ In der Medizintechnik wird unter Kontamination insbesondere die mikrobiologische Verunreinigung durch Mikroorganismen oder andere schädliche Substanzen verstanden.¹⁸ In der Automobilbranche werden im Zuge der technischen Sauberkeit alle Partikel, die der Funktionsausführung schädigend entgegenwirken, als Kontamination bezeichnet.¹⁹

Hygienic Design, also die hygienegerechte Produktgestalt, zielt darauf ab, Bauteile derart zu konstruieren, dass diese „*schnell und vollständig gereinigt werden können*“.²⁰ Die Reinigbarkeit beschreibt diejenige Eigenschaft eines Gegenstandes, so konstruiert zu sein, dass Verschmutzungen mit geeigneten Reinigungsverfahren restlos entfernbar sind.²¹

¹³ Vgl. Europäisches Parlament (2002), Art. 1 (3).

¹⁴ Vgl. Hauser (2008b), S. 1 sowie EHEDG (2004), S. 5.

¹⁵ Vgl. Hauser (2008b), S. 11.

¹⁶ Vgl. DIN EN 1672-2 (2009), S. 8 sowie DIN EN ISO 14159 (2008), S. 8.

¹⁷ Vgl. FAO/WHO (2009), S. 23.

¹⁸ Vgl. Petek et al. (2009), S. 749.

¹⁹ Vgl. VDA (2010).

²⁰ Hofmann (2007), S. 69.

²¹ Vgl. DIN EN 1672-2 (2009), S. 6.

2.1.1 Bestehende Konstruktionshilfsmittel für eine hygienegerechte Produktgestalt

Produktentwicklern stehen unterschiedliche Arten von Konstruktionshilfsmitteln zur Verfügung, die bei der hygiene- und reinigungsgerechten Gestaltung unterstützen sollen. Bei Hygienic Design Konstruktionshinweisen handelt es sich um Konstruktionsrichtlinien, die auf spezielle Anwendungsbereiche fokussieren. Sie bestehen aus Informationen, die häufig tabellarisch angeordnet sind und durch Abbildungen und Gut-Schlecht-Beispiele unterstützt werden können.²² Die Umsetzung der Konstruktionshinweise ist nicht zwingend, vielmehr umfassen sie Empfehlungen, die zu einer hygiene- und reinigungsgerechten Gestalt führen können.²³

Wichtige Empfehlungen finden sich u. a. in DIN EN 1672- 1 und DIN EN 1672-2, in Unterlagen der *European Hygienic Engineering and Design Group* (EHEDG) und der Organisation 3-A²⁴ sowie in der Literatur von HAUSER. Ausgewählte Empfehlungen werden im Folgenden näher beleuchtet.

DIN EN 1672-2 umfasst allgemeine Hygieneanforderungen für Maschinen, „[...] die zur Vorbereitung und Verarbeitung von Lebensmitteln für den menschlichen Verzehr und, wo zutreffend, zur Verarbeitung von Tierfutter verwendet werden, um das Risiko von Infektion, Erkrankung, Ansteckung oder Verletzung, das vom Lebensmittel ausgehen kann, auszuschließen oder auf ein Mindestmaß herabzusetzen.“²⁵ Die aufgeführten Anforderungen gliedern sich zunächst in Anforderungen, die die Werkstoffe betreffen, und Anforderungen, die sich auf die „Konstruktion“²⁶ beziehen. In Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit des Lebensmittelkontakts werden die Abschnitte weiter untergliedert. Es wird gemäß der Unterteilung von Abbildung 2.1 zwischen drei Produktbereichen unterschieden:

- *Lebensmittelbereich* – Oberflächen, die mit Lebensmittel unter üblichen Betriebsbedingungen in Kontakt gelangen und von denen das Lebensmittel selbstständig wieder in den Hauptproduktbereich zurückgelangen. Für diesen Bereich gelten die strengsten Anforderungen.

²² Vgl. Freund (2018), S. 96-97.

²³ Vgl. EHEDG (2004), S. 5.

²⁴ Der Name 3-A wurde von den Gründerorganisationen *International Association of Food Industry Suppliers* (IAFIS), *International Association for Food Protection* (IAFP) und *Milk Industry Foundation* (MIF) gewählt.

²⁵ DIN EN 1672-2 (2009), S. 5.

²⁶ DIN EN 1672-2 (2009) führt hierzu Hinweise zu Oberflächen, Verbindungen, Verbindungselemente, Ableiten von Flüssigkeit, innere Winkel und Ecken, Toträume, Lager und Wellendurchgänge, Messgeräte und Probenahmegeräte, Verkleidungen, Abdeckungen, Türen sowie Steuereinheiten auf.

- *Spritzbereich* – Oberflächen, an die Lebensmittel im Rahmen üblicher Verwendung spritzen kann, jedoch nicht zurück in das Lebensmittel gelangt.
- *Nicht-Lebensmittelbereich*: alle Oberflächen, die den vorig genannten Bereichen nicht zugeordnet werden können.²⁷

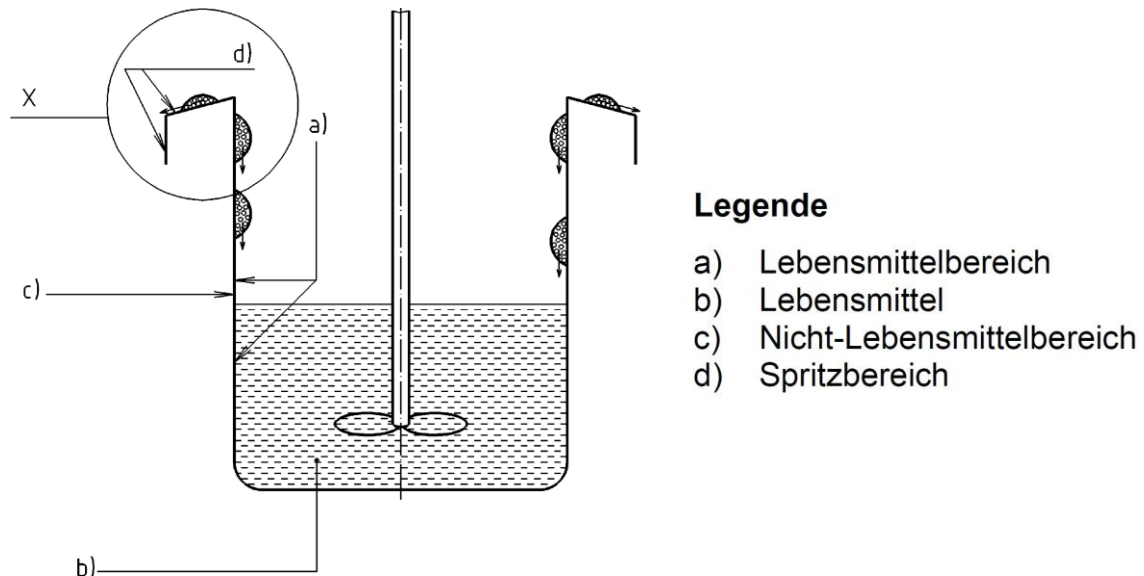


Abbildung 2.1: Bereiche einer lebensmittelverarbeitenden Maschine²⁸

Die EHEDG veröffentlicht seit dem Jahr 1989 Leitlinien. Derzeit umfasst die Sammlung 42 Dokumente²⁹ mit konkreten Ausführungsbeispielen, um Entwickler von Maschinen und Anlagen die Anwendung der Anforderungen aus DIN EN 1672-2 zu vereinfachen und dem Stand der Technik gerecht zu werden.³⁰ Die Leitlinien werden stetig aktualisiert und darüber hinaus unterstützt die EHEDG eine weltweite Harmonisierung von Leitlinien und Normen insbesondere in Kooperation mit der Organisation 3-A aus den USA.³¹ Die EHEDG gliedert die Dokumente in folgende Themenbereiche: generelle Hygienic Design Prinzipien (inkl. Werkstoffe und Oberflächen), Testmethoden, Fabrikplanung, geschlossene Anlagen für flüssige Lebensmittel, geschlossene Anlagen für Trockenfeststoffe, offene Anlagen, Verpackungsanlagen inkl. Abfüllanlagen, Wärmebehandlung sowie Reinigung & Validierung.

HAUSER stellt umfassende Sammlungen zur Gestaltung von hygienegerechten Anlagen zur Verfügung. In den zwei wesentlichen Bänden werden physikalische und gesetzliche Grundlagen des Hygienic Designs sowie zahlreiche Beispiele³² der hygienegerechten

²⁷ Vgl. DIN EN 1672-2 (2009), S. 6 und S. 18.

²⁸ Quelle: DIN EN 1672-2 (2009), S. 18.

²⁹ Stand: Oktober 2018.

³⁰ Vgl. EHEDG (2004), S. 5-6.

³¹ Vgl. Hauser (2008b), S. 44-45.

³² Die Darstellung erfolgt zumeist in Gut-Schlecht-Form.

Gestaltung „[...] von Behältern, Apparaten und Prozesslinien sowie von Anlagen, [...] der Gesamtplanung, die Ausführung des Betriebsgeländes sowie die Gestaltung der Gebäude und Räumlichkeiten bis hin zu Anforderungen an die hygienegerechte Versorgung mit Hilfsmedien [...]“ bereitgestellt.³³

2.1.2 Risikobewertung hygienegerechter Produkte

Die Bewertung des Hygienierisikos ist im Bereich der Lebensmittelverarbeitung ein verpflichtender Schritt, bei dem einerseits während der Entwicklung verifiziert wird, ob Lebensmittelmaschinen entsprechend den rechtlichen Rahmenbedingungen konstruiert und produziert werden, sowie andererseits während des Betriebs validiert wird, ob Lebensmittelmaschinen entsprechend definierter Qualitätsstandards betrieben werden, vgl. Abschnitt 2.1.1. Die Risikobewertung setzt sich aus der Beurteilung der *Auftrittswahrscheinlichkeiten* der Gefahren, die zu einer Schädigung von Beschäftigten im Prozessbereich der Maschine führen oder das Lebensmittel negativ beeinflussen können, sowie der Beurteilung des *Ausmaßes* eines möglichen Schadens zusammen.

Die Methoden zur Bewertung des Restrisikos lassen sich unterscheiden in Methoden, die aus den Forderungen der EG-Maschinenrichtlinie hervorgehen und sicherheitstechnische Aspekte fokussieren sowie Methoden, die eine lebensmittelorientierte Sichtweise beinhalten. Allen Verifizierungsmethoden ist gemein, dass sie keine oder keine ausreichenden Hinweise zur hygienegerechten Gestaltung der Maschine geben.³⁴

Methoden zur Bewertung des Restrisikos basierend auf sicherheitstechnischen Aspekten

Die EG-Maschinenrichtlinie³⁵ beinhaltet technische Sicherheitsaspekte, die es während der Konstruktion von Maschinen für das spätere Inverkehrbringen zu beachten gilt. Maschinenhersteller sind für die Ermittlung von Gefahren und Risiken, die von der Maschine ausgehen, verpflichtet, Gefahrenanalysen und Risikobewertungen durchzuführen und Maßnahmen bei der Konstruktion umzusetzen, die zu einer Minderung des Risikos führen.³⁶ Zudem werden in der EG-Maschinenrichtlinie explizit Anforderungen an Maschinen der Nahrungsmittel-, Kosmetik- und Pharmaindustrie aufgeführt.³⁷

³³ Hauser (2008a), S. XIV.

³⁴ Vgl. Hauser (2008b), S. 75-76.

³⁵ Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung), kurz: EG-Maschinenrichtlinie (EG: Europäische Gemeinschaft). Vgl. Europäisches Parlament (2006)

³⁶ Vgl. Feldhusen, Grote (2013), S. 515.

³⁷ Vgl. Europäisches Parlament (2006), Anhang I, Abschnitt 2.1.

Produktentwickler sind während der Entwicklung verpflichtet, alle Hygienerisiken, die von der Maschine ausgehen und zu Gefährdungen für Benutzer und Endverbraucher führen können, zu ermitteln.³⁸ Ziel der Analyse ist das Festlegen geeigneter Maßnahmen zur Reduzierung relevanter Hygiene-Risiken.³⁹ Da für Hygienic Design neben den Maschinen auch die herzustellenden Lebensmittel beachtet werden müssen, stellt dies eine Herausforderung dar, für die eine spezielle Risikobewertung notwendig ist. Eine Möglichkeit der Risikobewertung zeigt Abbildung 2.2. Der abgebildete Risikograph stellt eine Konkretisierung der in DIN EN ISO 12100 beschriebenen Methoden zur Risikobeurteilung im allgemeinen Maschinenbau dar.⁴⁰ Als Zusatz zu DIN EN ISO 12100 bilden im Hygienic Design das Lebensmittel (Produkt), die Reinigung, die Inspektion und Risikoverminderungsfaktoren die Risikoelemente als Entscheidungskriterien des Risikographen.⁴¹ Der Risikograph dient zur Kategorisierung der Maschine in Risikoanforderungsklassen, die sich in der Strenge der Hygienic Design Anforderungen und umzusetzender Maßnahmen⁴² unterscheiden.⁴³

Die internationale Norm DIN EN ISO 14159, die parallel zu DIN EN 1672-2 entwickelt wurde, beinhaltet ebenfalls eine Ablaufbeschreibung zur Risikoanalyse.⁴⁴ Die Risikoanalyse dient zur Einstufung der Maschine hinsichtlich der zu erfüllenden Hygieneanforderungen. Für die Analyse werden verschiedene maschinen- und produktbetreffende Parameter bewertet.

Zu den maschinenbetreffenden Parametern zählt zunächst die Feststellung der bestimmungsgemäßen Verwendung der Maschine. Dazu wird analysiert, ob die Maschine „[...] ausschließlich für einen speziellen Zweck verwendet, für den die Gefährdungen leicht festzustellen sind, oder [...] für ein breites Produktspektrum in vielen verschiedenen Industriezweigen [...]“ genutzt werden soll.⁴⁵ Weiterhin ist die Kategorisierung abhängig von der Entscheidung, ob die Maschine regelmäßig nach dem Einsatz gereinigt wird oder ob die Reinigung in regelmäßigen Zeitintervallen erfolgen muss. Dabei muss beachtet werden, ob die Maschine voraussichtlich „häufig oder selten“ benutzt wird, die Nutzung unterbrochen wird oder dauerhaft ist und ob sie einfach zu warten ist.⁴⁶

Weiterhin müssen produktbetreffende Parameter bewertet werden. Dazu ist es notwendig, alle Gefährdungen, die mit dem Umgang, der Vorbereitung und der Verarbeitung des

³⁸ Vgl. Europäisches Parlament (2006), Anhang I, Allgemeine Grundsätze, 1.

³⁹ Vgl. Hauser (2008b), S. 77.

⁴⁰ Vgl. DIN EN ISO 12100 (2010).

⁴¹ Vgl. Wickert, Defren (1999).

⁴² Entsprechende Maßnahmen finden sich u. a. in den in Abschnitt 2.1.1 vorgestellten Stellen.

⁴³ Vgl. Wickert, Defren (1999).

⁴⁴ Vgl. Hauser (2008b), S. 82-83.

⁴⁵ Vgl. DIN EN ISO 14159 (2008), S. 9.

⁴⁶ Vgl. DIN EN ISO 14159 (2008), S. 9.

Lebensmittels verbunden sein können, zu identifizieren.⁴⁷ Die Betrachtung der Verarbeitungsverfahren des Lebensmittels lässt zudem Aussagen zu einer Ausschaltung einer Gefährdung zu, wie beispielsweise durch eine Hitzebehandlung bezüglich Mikroorganismen.⁴⁸ Weiterhin gilt es die Verwendungsart des Lebensmittels zu berücksichtigen. Hierbei wird zwischen einem unmittelbaren Verbrauch nach der Herstellung und einem späteren Verbrauch unterschieden.⁴⁹

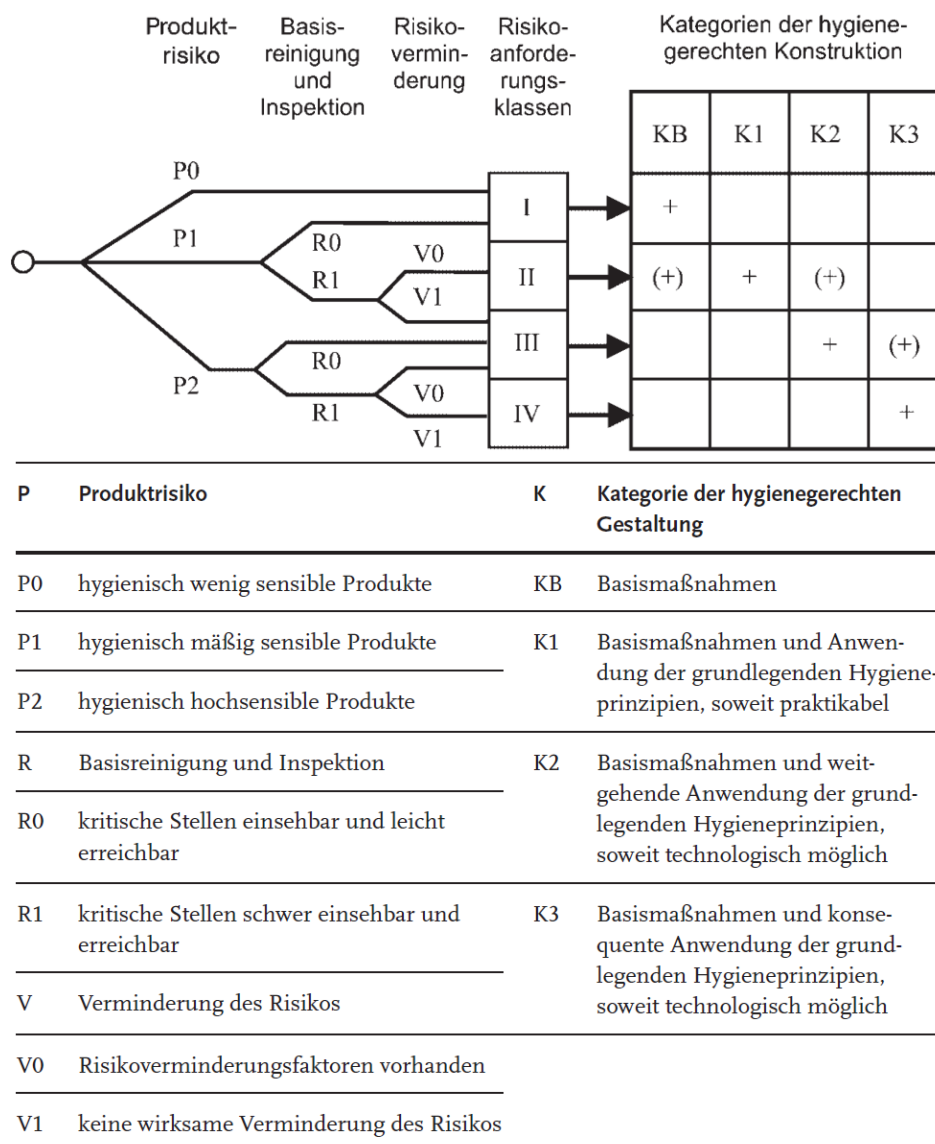


Abbildung 2.2: Risikograph zur Bewertung hygienebetreffender Risiken⁵⁰

Abschließend müssen verbraucher-spezifische Einflüsse bewertet werden. Hierbei wird eruiert, welche Zielgruppe mit den herzustellenden Lebensmitteln angesprochen wird.

⁴⁷ Vgl. DIN EN ISO 14159 (2008), S. 8 sowie Abschnitt 2.1.

⁴⁸ Vgl. Hauser (2008b), S. 84.

⁴⁹ Vgl. DIN EN ISO 14159 (2008), S. 9.

⁵⁰ Quelle: Hauser (2008b), S. 78 und 79.

Dabei sind insbesondere Lebensmittel für Säuglinge und Kinder sowie ältere Personengruppen auf Grund ihrer erhöhten Anfälligkeit von großer Bedeutung.⁵¹

Das Ergebnis der Risikoanalyse stellt die Einordnung in eine Hygienestufe dar, wobei zwischen fünf verschiedenen Stufen unterschieden wird. Stufe 1 repräsentiert Maschinen, die nur einen Teil der Hygieneanforderungen erfüllen müssen. Stufe 5 gilt Maschinen, die alle Hygieneanforderungen erfüllen müssen und zudem Maßnahmen zur aktiven Verhinderung und Beseitigung mikrobiellen Befalls aufweisen müssen.⁵²

Basierend auf einer lebensmittelorientierten Sichtweise

Im Gegensatz zu den technischen Sicherheitsaspekten der EG-Maschinenrichtlinie, die insbesondere die Konstruktion von Maschinen fokussiert, existiert die sogenannte lebensmittelorientierte, oder auch produktorientierte, Sichtweise. Sie repräsentiert die Sicht der Nahrungsmittelindustrie auf die Lebensmittel, wodurch der Fokus auf der Garantie einer gewissen Lebensmittellebensdauer sowie der gesundheitlichen Unbedenklichkeit des Lebensmittels liegt.⁵³

Die lebensmittelorientierte Sichtweise umfasst sowohl die Lebensmittelproduktion als auch die Qualitätskontrolle und -sicherung der Lebensmittel. Die Regelungen dieser Sichtweise beinhalten jedoch keine detaillierten Hygienic Design Anforderungen oder Hinweise für den Konstrukteur.⁵⁴

Das sogenannte *Hazard-Analysis-and-Critical-Control-Points-Konzept* (HACCP-Konzept) ist ein Qualitätswerkzeug, welches Teil des Selbstkontrollsystems eines lebensmittelproduzierenden Unternehmens ist, und zum Schutz der Lebensmittelkonsumenten eingeführt wurde. Zur Anwendung wird ein bereits eingerichtetes Hygienekonzept im Unternehmen benötigt.⁵⁵ Das Konzept beinhaltet ein systematisches Vorgehen, welches den Vorgang zur Gefahrenidentifizierung während der Lebensmittelherstellung beschreibt und die Einrichtung von Kontrollsystemen strukturiert. Es soll die Lebensmittelüberwachung des jeweiligen Unternehmens unterstützen und optimieren.⁵⁶

Zur Erstellung eines HACCP-Plans existiert eine Reihe von Regeln. Dazu gehören die Durchführung einer Gefahrenanalyse („*hazard analysis*“), das Bestimmen sogenannter „*Critical Control Points (CCPs)*“, das Festlegen von Grenzwerten, das Aufstellen eines Systems zur Überwachung der CCPs, die Festlegung von Korrekturmaßnahmen für den

⁵¹ Vgl. Hauser (2008b), S. 84.

⁵² Vgl. DIN EN ISO 14159 (2008), S. 17.

⁵³ Vgl. Hauser (2008b), S. 86.

⁵⁴ Vgl. Hauser (2008b), S. 86.

⁵⁵ Vgl. Bundesinstitut für Risikobewertung (2005), S. 2.

⁵⁶ Vgl. Bundesinstitut für Risikobewertung (2005), S. 1.

Fall, dass ein CCP nicht mehr beherrscht werden kann, die Verifizierung eines funktionierenden HACCP-Systems und das Einführen einer Dokumentation.⁵⁷ Abbildung 2.3 zeigt das grundsätzliche Vorgehen zur Bestimmung von Critical Control Points.

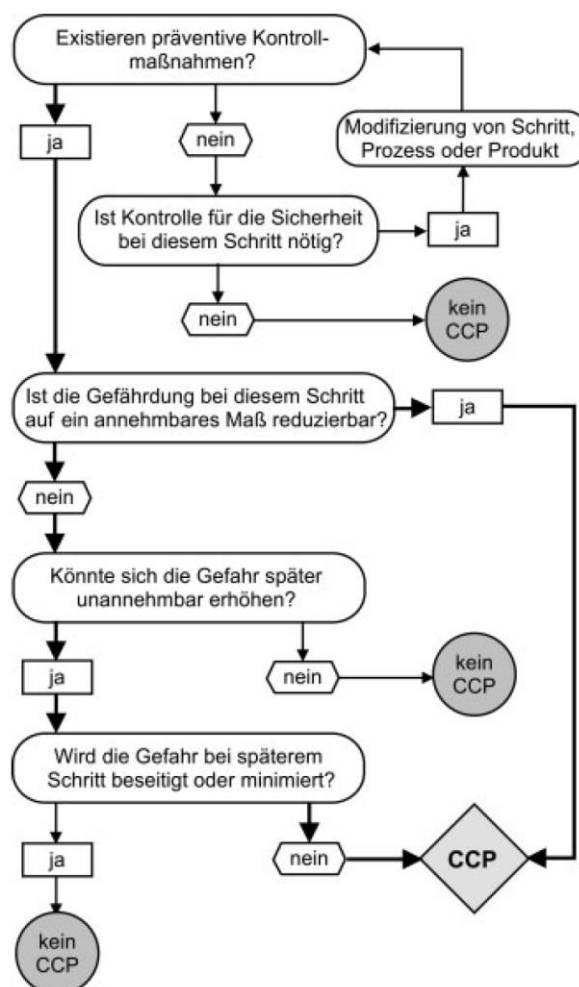


Abbildung 2.3: Vorgehen zur Ermittlung von Critical Control Points⁵⁸

Neben dem HACCP-Konzept existiert die sogenannte Qualifizierung nach *Good-Manufacturing-Practice-Regelungen* (GMP-Regelungen, deutsch: *Gute Herstellungspraxis*) mit dem Ziel der Qualitätssicherung. Die GMP-Regelungen wurden ursprünglich für die Produktion von Arzneimitteln entwickelt, werden jedoch heutzutage ebenso bei der Lebensmittelproduktion eingesetzt. Sie umfassen keine detaillierten Vorschriften, sondern beschreiben grundsätzliche Anforderungen an die Herstellungspraxis. GMP bedeutet daher, dass geeignete, bewährte und anerkannte Verfahren aus dem Stand der Technik bei der Produktion, Behandlung und Lagerung von Arznei- und Lebensmitteln angewendet und dokumentiert werden.⁵⁹

⁵⁷ Vgl. Bundesinstitut für Risikobewertung (2005), S. 1, Hauser (2008b), S. 88-89 und FAO/WHO (2009), S. 26-30.

⁵⁸ Quelle: Hauser (2008b), S. 92.

⁵⁹ Vgl. Pichhardt (1998), S. 213-214.

Eine wichtige Grundanforderung ist die klare Definition der Herstellungsvorgänge in Form einer Dokumentation, sodass das Produktionsverfahren für das jeweilige Produkt als geeignet eingestuft und auf seine Qualität überprüft werden kann. Die GMP-Regelungen umfassen des Weiteren Anforderungen an Hygiene, Räumlichkeiten, Personal, Ausrüstung, Dokumentationen und Kontrollen. Die Umsetzung der GMP-Regelungen ist jedem Betrieb frei überlassen. Die im jeweiligen Unternehmen aufgestellten Regeln müssen jedoch „*stichhaltig und logisch aufgebaut sowie lückenlos dokumentiert sein*“.⁶⁰

2.1.3 Sauberkeitsanforderungen in weiteren Anwendungsgebieten

Der Fokus von Sauberkeit in der Lebensmittelindustrie liegt auf Partikeln, die in das Lebensmittel gelangen können und zu einer unerwünschten Wirkung beim Verbraucher führen. Sauberkeit von Produkten bzw. Maschinen und Anlagen spielt jedoch nicht nur im Bereich der Lebensmittelproduktion eine wesentliche Rolle.

Unter *Technischer Sauberkeit* wird ein bestimmtes, geringes Maß an Kontamination durch schädliche Partikel in sauberkeitssensiblen technischen Produkten verstanden, vgl. Abschnitt 1.1.⁶¹ Dies betrifft in der Automobilbranche, in der die Bauteilsauberkeit besonders in den Bereichen der Hydraulik und der Halbleitertechnik ein Qualitätsmerkmal darstellt, beispielsweise Kraftstoff-Einspritzanlagen oder andere Kfz-Systeme mit Sicherheitsrelevanz, bei denen es auf höchste Sauberkeit und Partikelfreiheit im Einsatz ankommt. Bereits kleinste Mengen von Fremdpartikeln führen in diesen Bauteilen zum Versagen des Systems und zu Ausfällen. Dabei müssen sich die Partikel nicht bereits zu Beginn an einem sicherheitskritischen Ort befinden, sondern können sich im Laufe des Betriebs erst dorthin ausbreiten. Gelangen beispielsweise Partikel aus der Kraftstoffleitung in den Einspritzinjektor, führt dies dort zur Verklebung und damit eingehend zu einem Funktionsausfall.⁶²

Der Bereich der Mikroelektronik umfasst das Entwickeln und Herstellen von elektronischen Schaltungen. Diese Schaltungen haben in der Regel sehr kleine Abmaße und werden oftmals in andere Bauelemente integriert. Sie sind gegenüber äußeren Einflüssen sehr empfindlich und müssen daher mit extrem hoher Präzision gefertigt sowie vor äußeren Einflüssen geschützt werden.⁶³ Aus diesem Grund werden für die Fertigung von Mikroelektronik, insbesondere in der Halbleiterfertigung, Reinräume genutzt, um die Bauelemente vor schädigenden Partikeln zu schützen und definierte Bedingungen hinsichtlich Temperatur und Luftfeuchtigkeit zu ermöglichen.⁶⁴

⁶⁰ Hauser (2008b), S. 94.

⁶¹ VDA (2010).

⁶² Vgl. ZVEI (2013), S. 8.

⁶³ Vgl. Wellmann (2017), S. 118.

⁶⁴ Vgl. Wellmann (2017), S. 133-134.

Der Einsatz von Reinräumen spielt auch im Bereich der Medizintechnik eine entscheidende Rolle. Neben der Verhinderung des Eindringens von Staub, Pollen oder Aerosolen muss in der Medizintechnik weiterhin die Zahl von Bakterien und Keimen gesenkt werden.⁶⁵ Als Beispiel lässt sich hier die Fertigung von Implantaten nennen. Implantate müssen frei von Kontaminationen sein, da sie ansonsten nach dem Einsetzen bei Patienten Infektionen verursachen können. Hierfür existieren Reinräume, die den Einsatz unterschiedlicher Fertigungsverfahren, wie beispielsweise Spritzgießen, 3D-Fräsen, Heißpressen sowie Tiefziehen und Siegeln von Verpackungen, ermöglichen.⁶⁶

Grundsätzlich gilt es bei Anlagen und Maschinen der Medizintechnik, die für den Einsatz im Reinraum genutzt werden sollen, zu bedenken, dass folgende Anforderungen⁶⁷ beachtet werden müssen:

- Einsatz glatter, leicht zu reinigender, abriebfester Oberflächen, vorzugsweise Edelstahl
- Ermöglichen einer leichten Reinigung, d. h. beispielsweise, dass alle zu reinigenden Oberflächen leicht zugänglich sein müssen
- Strömungsgünstiges Anordnen der Baugruppen
- Nutzung reinraumtauglicher Antriebe
- Einsatz von geschlossenen oder abriebarmen Energie- und Medienführungen
- Kapselung von Partikelemittern

Die Anwendungsmöglichkeiten von Reinräumen sind sehr vielfältig und der Bedarf an Reinräumen in speziellen Anwendungsgebieten nimmt stetig zu. Aus diesem Grund existieren genormte Standards mit speziellen Reinheitsanforderungen sowie angepassten Empfehlungen, Ablaufbeschreibungen sowie Kriterien zur Auswahl von Reinräumen. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Beschreibung von einheitlichen Reinheitsklassen der Reinräume. Jeder Reinraum kann in Abhängigkeit der Partikelkonzentration einer Reinheitsklasse zugeordnet werden. Insbesondere sei an dieser Stelle auf DIN EN ISO 14644-1 verwiesen, deren Klassifizierung Abbildung 2.4 zeigt.⁶⁸

Abzugrenzen von Reinräumen sind die oftmals in der Automobilbranche eingesetzten Sauberräume. Die kleinsten zulässigen Partikelgrößen werden hierbei nicht von den Definitionen der Reinraumklassen erfasst. Diese liegen beispielsweise bei ölführenden Mo-

⁶⁵ Vgl. Petek et al. (2009), S. 725-726.

⁶⁶ Vgl. Petek et al. (2009), S. 757-759.

⁶⁷ Vgl. Petek et al. (2009), S. 754.

⁶⁸ Weitere Festlegungen finden sich in dem EU-GMP-Leitfaden sowie in der US-amerikanischen Standard FED-STD-209E, die sich vornehmlich durch die Einheiten der Messvolumina unterscheiden.

torkomponenten bei 50-100 μm und umfassen nicht alleine die Größe der Partikel, sondern auch deren Materialeigenschaften.⁶⁹ Reinräume und Sauberräume unterscheiden sich konstruktiv insbesondere durch die Voraussetzung einer nach DIN EN 1822 vorgeschriebenen Reinflufttechnik mit HEPA- oder ULPA-Schwebstofffiltration bei Reinräumen.⁷⁰

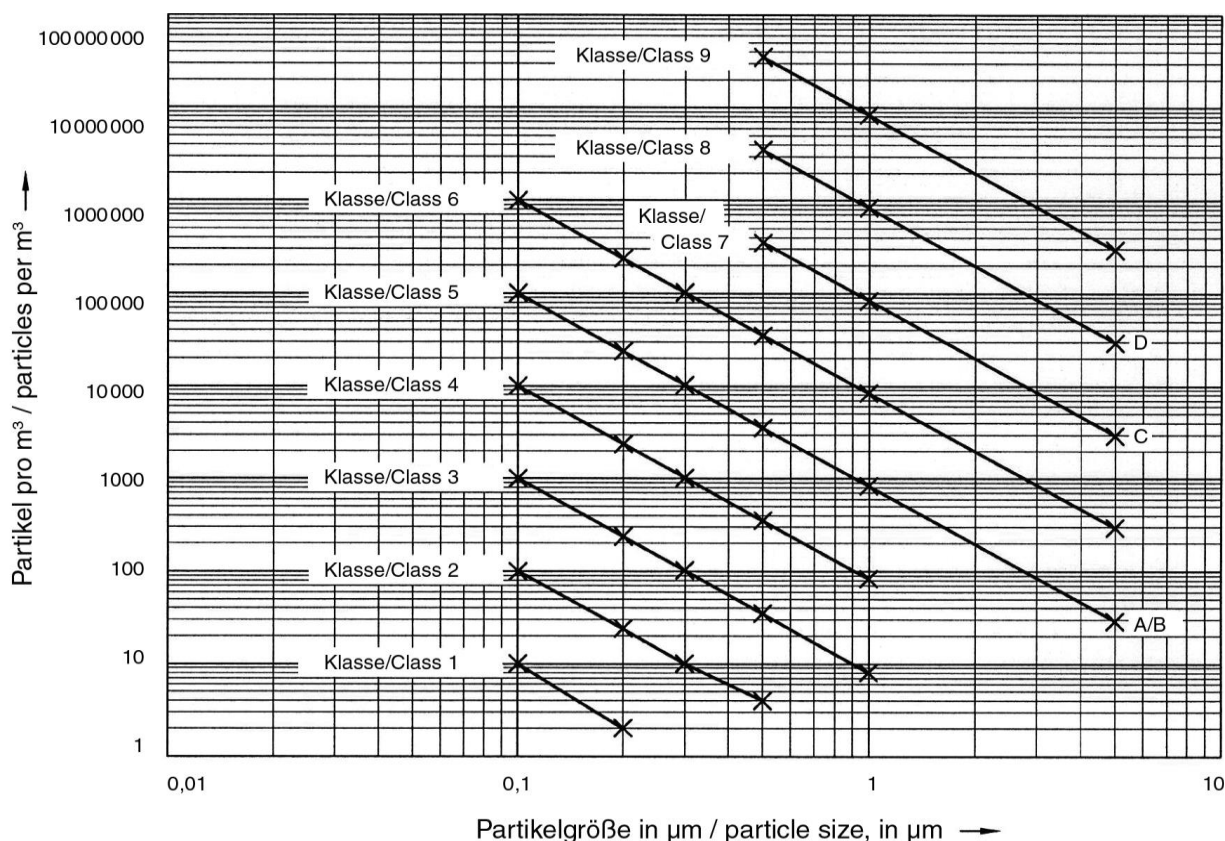


Abbildung 2.4: Reinheitsklassen von Reinräumen nach DIN EN ISO 14644-1⁷¹

2.2 Grundlagen der Konstruktionsmethodik

HUBKA und SCHREGENBERGER differenzieren zwischen *Konstruktionswissenschaft* und *Konstruktionsmethodik*.⁷² Der Begriff Konstruktionswissenschaft beschreibt „ein System von logisch miteinander verknüpften Kenntnissen [...], welches das komplette Wissen über und für Konstruieren beinhalten und ordnen soll.“⁷³ Nach PAHL et al. zielt die Konstruktionswissenschaft auf die Analyse des Aufbaus technischer Systeme sowie deren Relation zu ihrem Umfeld unter Anwendung wissenschaftlicher Methoden ab, sodass

⁶⁹ Vgl. Schmauz, Ernst (2012) (2012), S. 624.

⁷⁰ Vgl. Schmauz, Ernst (2012), S. 627 sowie DIN EN 1822-1 (2009), S. 5ff.

⁷¹ Quelle: VDI 2083 (2013), S. 8.

⁷² Vgl. Hubka, Schregenberger (1989), S. 33-36.

⁷³ Hubka, Eder (1992), S. 61.

„[...] aus den daraus erkannten Zusammenhängen und Systemkomponenten Regeln zu deren Entwicklung abgeleitet werden können“.⁷⁴

Darauf aufbauend beschreibt PAHL et al. die *Konstruktionsmethodik* als „[...] ein geplantes Vorgehen mit konkreten Handlungsanweisungen zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme, die sich aus den Erkenntnissen der Konstruktionswissenschaft und der Denkpsychologie, aber auch aus den Erfahrungen in unterschiedlichen Anwendungen ergeben haben. Hierzu gehören Vorgehenspläne zur inhaltlichen und organisatorischen Verknüpfung von Arbeitsschritten und Konstruktionsphasen, die flexibel an die jeweilige Problemlage angepasst werden [...]. Die Beachtung von generellen Zielsetzungen und die Verwirklichung von Regeln und Prinzipien (Strategien) insbesondere bei der Gestaltung sowie Methoden zur Lösung einzelner Konstruktionsprobleme oder -teilaufgaben sind notwendig.“⁷⁵

Die Basis der Konstruktionsmethodik stellen Modelle und darauf aufbauende Methoden dar, die durch Werkzeuge unterstützt werden können.⁷⁶

Im Folgenden werden Grundlagen und Definitionen dieser zentralen Begriffe näher beleuchtet. Sie bilden die Basis zum Verständnis technischer Systeme sowie deren Zusammenwirken in Form von Prozessen innerhalb der Phasen des Produktlebenslaufs. Neben der *Theorie der technischen Systeme* stellt die *Theorie der Konstruktionsprozesse* eine zweite wichtige Voraussetzung für die Konstruktionsmethodik dar.⁷⁷ Daher werden in diesem Abschnitt zusätzlich verschiedene Vorgehensweisen zur systematischen Produktentwicklung erläutert.

2.2.1 Grundlagen und Definitionen zu Modellen und Methoden

Modellbegriff

Modelle sind vereinfachte, zweckorientiert abstrahierte Abbilder der komplexen Realität, die bestimmte Rückschlüsse auf das Original zulassen.⁷⁸ Sie treten in gegenständlicher oder theoretischer Form auf und werden dazu genutzt unübersichtliche oder komplexe Sachverhalte besser zu verstehen und Problemstellungen bearbeiten zu können.⁷⁹

Nach der allgemeinen Modelltheorie von STACHOWIAK verfügen Modelle über die drei Hauptmerkmale *Abbildung*, *Verkürzung* und *Pragmatismus*. Das *Abbildungsmerkmal* beschreibt, dass Modelle Abbildungen oder Repräsentationen natürlicher oder künstlicher

⁷⁴ Pahl et al. (2007b), S. 10.

⁷⁵ Pahl et al. (2007b), S. 10.

⁷⁶ Vgl. Gramlich (2013), S. 13-14.

⁷⁷ Vgl. Ehrlenspiel (2009), S. 17.

⁷⁸ Vgl. Lindemann (2007), S. 11.

⁷⁹ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 21.

Originale⁸⁰ sind. Das *Verkürzungsmerkmal* besagt, dass Modelle nicht alle Attribute des Originals beinhalten, sondern nur diejenigen Attribute, die dem Anwender oder Ersteller relevant erscheinen. Der den Modellen zugrundeliegende Zweck und Nutzen wird durch das *pragmatische Merkmal* betont. Modelle können nicht immer eindeutig den Originalen zugeordnet werden. Sie erfüllen eine Ersatzfunktion für bestimmte modellnutzende Subjekte innerhalb bestimmter Zeitintervalle unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen.⁸¹

Nach LINDEMANN stellen Modelle „*gegenüber einem Original zweckorientiert[e] vereinfachte[] gedankliche[] oder stoffliche[] Gebilde*“ dar, welche durch Analogien zu Originalen Rückschlüsse auf Originale zulassen.⁸² Aufbauend auf dieser Definition lassen sich mit Hilfe von Modellen beispielsweise Aussagen über das Verhalten von realen sowie noch nicht real existierenden Objekten prognostizieren.⁸³

Im Bereich der Produktentwicklung werden Modelle erstellt und verwendet, um Entwickler hinsichtlich der Beherrschung der hohen Komplexität eines technischen Systems zu unterstützen.⁸⁴ Hierbei sind insbesondere Produktmodelle, d. h. produktdarstellende Modelle, ablauforientierte Modelle sowie Prozessmodelle relevant.⁸⁵

Method

Der Begriff *Method* wird im Sprachgebrauch je nach Fachdisziplin sehr unterschiedlich verwendet.

Nach LINDEMANN kennzeichnet eine Methode „*die Beschreibung eines regelbasierten und planmäßigen Vorgehens, nach dessen Vorgabe bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind, um ein gewisses Ziel zu erreichen*“.⁸⁶

Im Bereich der Produktentwicklung wird der Methodenbegriff von verschiedenen Autoren oft sinngleich definiert. Eine Methode beschreibt demnach ein planmäßiges, regelbasiertes Vorgehen⁸⁷, nach dessen Vorgabe mit Hilfe bestimmter Handlungen ein zuvor definiertes Ziel erreicht werden soll.⁸⁸ Eine Methode gibt dazu Empfehlungen oder Anwei-

⁸⁰ Das Original selbst kann ebenfalls Modell eines anderen Originals sein.

⁸¹ Vgl. Stachowiak (1973), S. 131-133.

⁸² Vgl. Lindemann (2007), S. 331.

⁸³ Vgl. Gramlich (2013), S. 12.

⁸⁴ Vgl. Lindemann (2007), S. 11.

⁸⁵ Vgl. Wäldele (2012), S. 28-38.

⁸⁶ Lindemann (2009), S. 57.

⁸⁷ Vgl. VDI 2223 (2004), S. 88.

⁸⁸ Vgl. Lindemann (2009), S. 57.

sungen, die bei der Durchführung der Arbeitsschritte und der Dokumentation der Ergebnisse helfen sollen. Werden mehrere Methoden und Werkzeuge in ein planmäßiges Vorgehen einbezogen, wird dieses Vorgehen als Methodik bezeichnet.⁸⁹

2.2.2 Technische Systeme, Produkte und Prozesse

Systembegriff

Nach HUBKA wird ein System als eine endliche Menge an Elementen nach bestimmten Regeln geordnetes Ganzes bezeichnet.⁹⁰ Es ist über die Beziehungen zwischen den Elementen charakterisiert und durch eine Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzt und steht mit ihr im Falle eines offenen Systems über Ein- und Ausgangsgrößen in Beziehung.⁹¹

ROPOHL differenziert zwischen drei verschiedenen Systemkonzepten, welche jeweils andere Systemaspekte fokussieren. Abbildung 2.5 zeigt die drei Systemkonzepte. ROPOHL unterscheidet funktionale, strukturelle und hierarchische Systemkonzepte.⁹² Die Systemkonzepte schließen einander nicht aus, sondern können vielmehr untereinander kombiniert werden.⁹³

Das funktionale Systemkonzept beschreibt das System als eine Blackbox und ist durch Zusammenhänge zwischen beobachtbaren Größen von außen beschreibbar. Hierunter zählen insbesondere Eingangsgrößen, sogenannte Inputs, Ausgangsgrößen bzw. Outputs sowie die Zustände. Diese Sichtweise exkludiert beabsichtigt die materielle Konkretisierung sowie den inneren Aufbau des Systems und beschränkt sich ausschließlich auf die Untersuchung des Systemverhaltens in der Umgebung.⁹⁴

Das strukturelle Systemkonzept betrachtet ein System als Ganzheit, welches aus miteinander verknüpften, in Relation stehenden Elementen besteht. Hierbei steht insbesondere die Vielfalt möglicher Beziehungsgeflechte zwischen den Elementen im Fokus. Unterschiedliche Systemeigenschaften begründen sich in diesem Konzept durch die Vielfalt möglicher Relationen zwischen den Elementen. Gemäß dem strukturalen Systemdenken stehen Systemelemente stets in wechselseitiger Relation und dürfen niemals isoliert betrachtet werden.⁹⁵

⁸⁹ Vgl. VDI 2223 (2004), S. 88.

⁹⁰ Vgl. Hubka (1984), S. 11.

⁹¹ Vgl. Ehrlenspiel (2009), S. 19.

⁹² Vgl. Ropohl (2009), S. 75-77.

⁹³ Vgl. Ropohl (2009), S. 77.

⁹⁴ Vgl. Ropohl (2009), S. 75-76.

⁹⁵ Vgl. Ropohl (2009), S. 75.

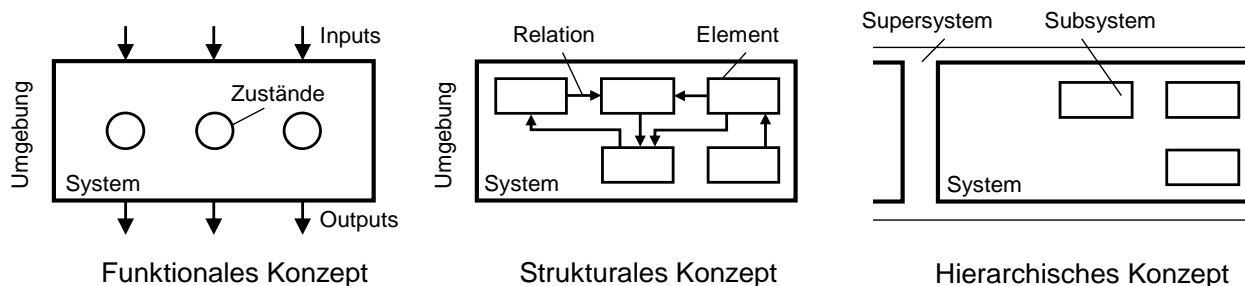


Abbildung 2.5: Konzepte der Systemtheorie⁹⁶

Das hierarchische Systemkonzept betont, dass Elemente eines Systems selbst als Subsysteme verstanden werden können, welche wiederum Bestandteil eines umfassenderen Supersystems sein können. Charakterisierend für dieses Systemkonzept ist die hierarchische Struktur, worin unterschiedliche Hierarchiestufen voneinander abhängig sind. Für eine detaillierte Erklärung des Systems werden niedriger liegende Hierarchiestufen fokussiert, während zur Steigerung des übergeordneten Verständnisses seiner Bedeutung höhere Hierarchiestufen zu betrachten sind. Je nach Zielstellung der Betrachtung können mehrere Hierarchiestufen gleichzeitig abgebildet werden.⁹⁷

Technische Systeme

Technische Systeme stellen künstlich erzeugte Gebilde in geometrischer und stofflicher Form dar. *Technische Produkte* genügen als technische Systeme der zuvor genannten Beschreibung.⁹⁸ Sie dienen einer bestimmten Zweckerfüllung mit Hilfe der technischen Umsetzung physikalischer Effekte.⁹⁹

Wie Abbildung 2.6 zeigt, stehen technische Produkte gemäß der Definition des funktionalen Systemkonzepts durch In- und Outputs mit der Umgebung in Relation.¹⁰⁰ Mit Hilfe der Systemgrenze wird die Zugehörigkeit von Elementen zum technischen Produkt festgelegt und von Elementen der Umgebung abgegrenzt. Technische Produkte bestehen neben den Elementen gemäß dem strukturalen Systemkonzept auch aus Beziehungen zwischen den Elementen. Zur zweckmäßigen Gliederung auf benötigten Abstraktionsniveaus kann das System gemäß dem hierarchischen Systemkonzept in bedarfsgerechte Subsysteme unterteilt werden.¹⁰¹

Technische Systeme dienen der Erfüllung von Aufgaben, insbesondere von technischen *Prozessen*,¹⁰² bei denen die Energien, Stoffe oder Signale umgesetzt, d. h. geleitet

⁹⁶ Quelle: Ropohl (2009), S. 76.

⁹⁷ Vgl. Ropohl (2009), S. 77.

⁹⁸ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 27.

⁹⁹ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 27 sowie Feldhusen (2016), S. 155.

¹⁰⁰ Vgl. Hubka (1984), S. 15; VDI 2221 (1993), S. 41.

¹⁰¹ Vgl. Feldhusen, Grote (2013), S. 238.

¹⁰² Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 27

und/oder verändert werden. In Abhängigkeit des Hauptflusses des Systems lassen sich technische Produkte mit primärem Energieumsatz, Stoffumsatz und Signalumsatz unterscheiden.¹⁰³ Als Beispiel für Produkte mit primärem Energieumsatz lassen sich Elektromotoren nennen, die zur Wandlung von elektrischer in mechanische Energie genutzt werden. Zu Produkten, bei denen der Stoffumsatz dominiert, zählen beispielsweise Pumpen oder Fertigungsanlagen, bei denen aus Halbzeugen Fertigprodukte entstehen. Häufig stehen Energie, Stoff- und Signalflüsse nicht alleine, sondern werden von den jeweils anderen begleitet.¹⁰⁴

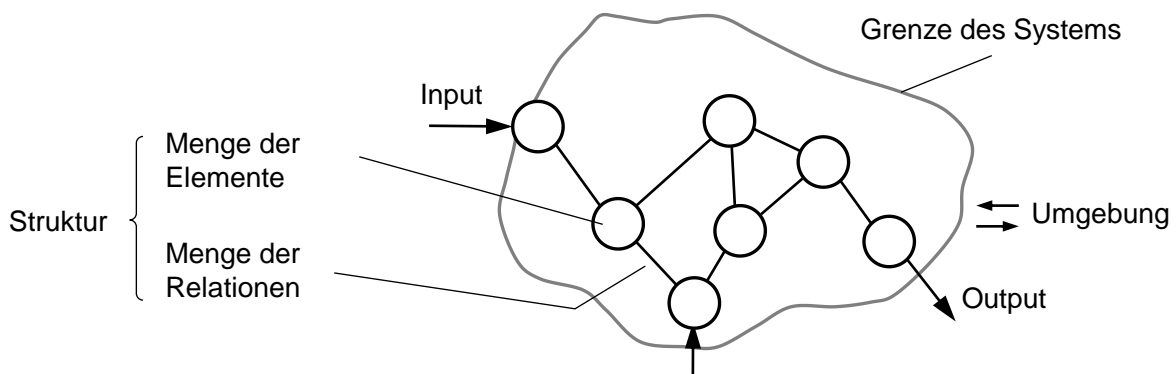


Abbildung 2.6: Modell eines technischen Systems¹⁰⁵

Beschreibung von Systemen mittels Eigenschaften

Technische Systeme werden stets für die Erfüllung bestimmter, vorgesehener Zwecke in Form der Funktionserfüllung entwickelt, produziert und eingesetzt. Da jedes System durch eine Vielzahl von Eigenschaften charakterisiert ist, stellt das Erzeugen technischer Produkte mit gewissen Eigenschaften das Ziel jeder Entwicklung dar.¹⁰⁶ Alles, was durch „Beobachten, Messergebnisse, Berechnungen, allgemein akzeptierte Aussagen usw.“ von einem System identifiziert werden kann, wird als Eigenschaft bezeichnet.¹⁰⁷ Eine Eigenschaft ist demnach ein gedanklich abgegrenzter Teil einer Beschreibung eines Objekts bzw. eines technischen Systems.¹⁰⁸ Die Beschreibung technischer Systeme erfolgt daher durch die Angabe ihrer zugrundeliegenden Eigenschaften.¹⁰⁹ Über die Angabe dieser Eigenschaften ist ein technisches System, beispielsweise in Form eines technischen Produkts, eindeutig identifizierbar.¹¹⁰

¹⁰³ Vgl. Feldhusen, Grote (2013), S. 241.

¹⁰⁴ Vgl. Feldhusen, Grote (2013), S. 240-241.

¹⁰⁵ Vgl. Hubka (1984), S. 15.

¹⁰⁶ Vgl. Wäldele (2012), S. 15; Weber (2012), S. 36.

¹⁰⁷ Ehrlenspiel (2009), S. 28; Wäldele (2012), S. 16.

¹⁰⁸ Vgl. Gramlich (2013), S. 17.

¹⁰⁹ Vgl. Birkhofer (1980), S. 5.

¹¹⁰ Vgl. Birkhofer (1980), S. 5.

Eigenschaften setzen sich aus einem *Merkmal* und einer zugewiesenen *Ausprägung* zusammen.¹¹¹ Ein Merkmal wird dabei als ein „*charakteristisches, unterscheidendes Zeichen, an dem eine bestimmte Person, Gruppe oder Sache, auch ein Zustand erkennbar wird*“¹¹² definiert. Unterscheiden sich zwei Systeme in mindestens einer quantitativen oder qualitativen Ausprägung einer Eigenschaft, werden sie als unterschiedlich bezeichnet.¹¹³ Aus der Beschreibung von Eigenschaften resultiert, dass Eigenschaften quantitativer, qualitativer sowie komparativer Natur sein können und nicht notwendigerweise eine Einheit aufweisen müssen.¹¹⁴ Die Beschreibung von Eigenschaften umfasst neben den Merkmalen zugehörige Ausprägungen, welche aus einer merkmalspezifischen Menge möglicher Ausprägungen resultieren.¹¹⁵

Eigenschaften, die der Beschreibung eines technischen Produkts dienen, werden als *Produkteigenschaft* bezeichnet. BIRKHOFFER und WÄLDELE differenzieren *abhängige* und *unabhängige Produkteigenschaften*, wobei abhängige Produkteigenschaften von unabhängigen Produkteigenschaften abhängig sind und indirekt festgelegt werden. Unabhängige Produkteigenschaften werden von Produktentwicklern, losgelöst von anderen Eigenschaften, festgelegt.¹¹⁶ Abbildung 2.7 verdeutlicht den Unterschied zwischen unabhängigen und Abhängigen Produkteigenschaften anhand des Beispiels einer Schraube. Dabei können beispielsweise die Schraubenlänge oder der Außendurchmesser direkt von Produktentwicklern festgelegt werden, wohingegen die Steifigkeit oder die Masse der Schraube von diesen Festlegungen abhängig sind.

Eine Produktgestalt wird durch die Menge aller unabhängigen Gestalteigenschaften beschrieben, wobei Gestalteigenschaften die geometrischen und werkstofflichen Eigenschaften eines Produkts umfassen. Werkstoffliche Eigenschaften umfassen gleichermaßen mechanische Eigenschaften, Oberflächeneigenschaften sowie physikalische Eigenschaften.¹¹⁷

¹¹¹ Vgl. Lindemann (2009), S. 160; Leinemann (1974), S. 439; Birkhofer (1980), S. 6.

¹¹² Dudenredaktion (2018b).

¹¹³ Vgl. Franke (1976), S. 184.

¹¹⁴ Vgl. Gramlich (2013), S. 18.

¹¹⁵ Vgl. Birkhofer (1980), S. 5-6; Roos (2018), S. 21.

¹¹⁶ Vgl. Birkhofer, Wäldele (2008), S. 4-9.

¹¹⁷ Vgl. Ponn, Lindemann (2008), S. 124.



Abbildung 2.7: Unabhängige und abhängige Produkteigenschaften einer Schraube

Modellierung und Beschreibung von Produkten

In Anlehnung an die Definitionen von Modellen werden Produktmodelle bzw. produktdarstellende Modelle¹¹⁸ als vereinfachte, abstrahierte und zweckmäßige Repräsentationen des Produkts auf einer definierten, abstrakten Ebene ohne zeitliche Dimension verstanden.¹¹⁹ In Produktmodellen werden produktrelevante Informationen und Daten abgebildet, die während des Produktentwicklungsprozesses festgelegt werden und in den jeweiligen Arbeitsschritten notwendig sind.¹²⁰ Das in dieser Arbeit zugrundeliegende Verständnis von Produktmodellen stützt sich auf den im Rahmen der Konstruktionsmethodik verwendeten Zweck von Produktmodellen. Dieser liegt darin, Produktentwickler bei der methodischen Lösungsfindung zu unterstützen.¹²¹

EHRENSPIEL, ANDREASEN sowie SAUER beschreiben verschiedene Partialproduktmodelle, die bei der Systematisierung des Vorgehens zur Lösungsfindung während der Produktentwicklung eingesetzt werden können, und ordnen sie einzelnen Ebenen einer Produktmodellpyramide¹²² zu.¹²³ Jedes Partialmodell umfasst eine geschlossene Menge von Objekttypen, die jeweils eine bestimmte Klasse von Produktmerkmalen abbildet. Die zugeordnete Ebene der Produktmodellpyramide repräsentiert einen bestimmten Konkretisierungsgrad mit relevanten Produkteigenschaften des zu konstruierenden Produkts, wobei der Konkretisierungsgrad und die Komplexität zu den unteren Abstraktionsebenen der Produktmodellpyramide zunehmen.¹²⁴

¹¹⁸ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 41.

¹¹⁹ Vgl. Wäldele (2012), S. 28; VDI 2221 (1993), S. 41.

¹²⁰ Vgl. Ehrlenspiel (2009), S. 695; Wäldele (2012), S. 28; Lindemann (2009), S. 334.

¹²¹ Die Nutzung von Produktmodellen im Sinne der Konstruktionsmethodik findet sich u. a. in Ehrlenspiel (2009); Matthiesen (2002); Andreasen, Hein (1987); Sauer (2006); Gramlich (2013); Birkhofer (2011).

¹²² In der Zunahme der Menge an Eigenschaften bzw. Lösungsmöglichkeiten begründet sich die Pyramidenform der Modelle.

¹²³ Vgl. Ehrlenspiel (2009), S. 37-39; Andreasen, Hein (1987), S. 51-67; Sauer (2006), S. 67-84.

¹²⁴ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 40; Wäldele (2012), S. 28.

Die Produktmodellpyramide nach SAUER, Abbildung 2.8, gliedert sich in die horizontalen Ebenen der *Funktionen*, *Effekte*, *Wirkprinzip* sowie *Gestalt*.¹²⁵ Diesen Ebenen werden entsprechende Partialmodelle verschiedener Konkretisierungsstufen hinterlegt, welche die Bearbeitung der zugeordneten Entwicklungsschritte gezielt unterstützen sollen.¹²⁶ Ein wesentlicher Bestandteil des Pyramidenmodells findet sich in Form des technischen Prozesses an der Spitze der Pyramide. Über Anforderungen, die sich aus den Prozessen ergeben, bringt er die Prozesse mittelbar mit der Produktentwicklung in Verbindung.

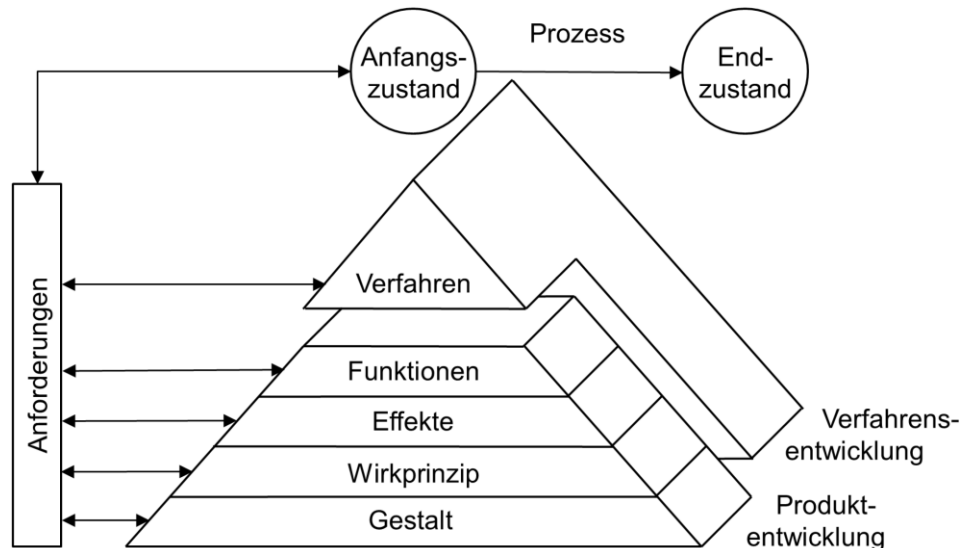


Abbildung 2.8: Pyramidenmodell nach SAUER¹²⁷

Diese Ergänzung betont den Gedanken, dass der Zweck eines Produkts auf der Festlegung sowie Erfüllung des Einsatzprozesses und dessen verfahrenstechnischen Umsetzung basiert.¹²⁸ Damit überführt SAUER die *integrierte Produktentwicklung* in eine *integrierte Produkt- und Prozessentwicklung*. Die aus der Antizipation angedachter Nutzungsprozesse abgeleiteten Anforderungen bilden in Zusammenhang mit den verfahrenstechnischen Umsetzungsmöglichkeiten die Ausgangssituation des Produktentwicklungsprozesses.¹²⁹ Der Gedanke des Antizipierens und Berücksichtigens sämtlicher Prozesse aus Phasen des Produktlebenszyklus stellt die Basis für eine *ganzheitliche Produkt- und Prozessentwicklung (GPPE)* dar, vgl. Abschnitt 2.2.3.¹³⁰

¹²⁵ Das Pyramidenmodell nach Ehrlenspiel beinhaltet in ähnlicher Weise die Ebenen *Funktion*, *Physik*, *Gestalt* sowie zusätzlich *Produktionsbereich*, vgl. Ehrlenspiel (2009), S. 37.

¹²⁶ Vgl. Sauer (2006), S. 67-84.

¹²⁷ Quelle: Sauer (2006), S. 68.

¹²⁸ Vgl. Sauer (2006), S. 68-74.

¹²⁹ Vgl. Sauer (2006), S. 67-68.

¹³⁰ Vgl. Birkhofer et al. (2018), S. 604-605.

Auf der Ebene der *Funktionen* erfolgt die Modellierung des Produkts in Form einer Gesamtfunktion sowie wesentlicher, zu erfüllender Teilfunktionen.¹³¹ Unter einer Funktion wird in der Konstruktionswissenschaft die lösungsneutrale Beschreibung des kausalen Zusammenhangs zwischen Ein- und Ausgangsgrößen des technischen Produkts¹³² verstanden. Nach GRAMLICH können als Ein- und Ausgangsgrößen ausschließlich Energien und Signale fungieren.¹³³

Diese Einschränkung begründet sich in der Differenzierung der Rollen von *Objekten* und *Größen* in unterschiedlichen Modellen. *Objekte* sind geometrisch, stoffliche Gebilde, welche einen Zustand besitzen, der durch die Angabe seiner Objekteigenschaften zu einem bestimmten Zeitpunkt beschrieben wird.¹³⁴ *Größen* beschreiben Eigenschaften von Objekten und Vorgängen. Sie sind durch ein Merkmal und seine Ausprägung charakterisiert und sind daher nicht gegenständlicher Natur.¹³⁵ Größen werden in dieser Arbeit als Prozessgrößen verstanden.¹³⁶ Während Objekteigenschaften den Zustand eines Objekts zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreiben, umfassen (Prozess-)Größen Energien und Signale, die zwischen Objekten während Prozessen ausgetauscht werden.¹³⁷

Die Unterteilung der Gesamtfunktion eines Produkts in zueinander in Beziehung stehenden Teilfunktionen zielt auf die Verbesserung der Lösbarkeit der Gesamtaufgabe durch Lösen von beherrschbaren Teilproblemen.¹³⁸ Die durch das In-Beziehung-setzen resultierende Verknüpfung von Teilfunktionen wird als Funktionsstruktur bezeichnet.¹³⁹

Real existierende Produkte können von den gewollten, idealen Funktionen, die beispielsweise für die Lösungsfindung genutzt werden, abweichen. Nach BIRKHOFFER beschreibt das *Verhalten* den beobachteten oder gemessenen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen bei *realen Produkten*.¹⁴⁰ Die Analyse des Verhaltens stellt die Basis der Beurteilung von Abweichungen hinsichtlich der beabsichtigten Funktionen. Insbesondere bei der Entwicklung hygienegerechter Produkte spielen diese Abweichungen eine wesentliche Rolle, da hierüber beispielsweise geeignete Maßnahmen zur Annäherung des realen Verhaltens zur idealen Funktion abgeleitet werden können.

¹³¹ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 10.

¹³² Bei funktionalen Zusammenhängen werden oftmals *gewollte* Ein- und Ausgangsgrößen herangezogen, vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 745; Feldhusen, Grote (2013), S. 242.

¹³³ Vgl. Gramlich (2013), S. 68.

¹³⁴ Vgl. Gramlich (2013), S. 62.

¹³⁵ Vgl. Gramlich (2013), S. 63.

¹³⁶ Diese Unterteilung in Zustandsgrößen und Prozessgrößen geht aus dem Bereich der Thermodynamik hervor.

¹³⁷ Vgl. Gramlich (2013), S. 63.

¹³⁸ Vgl. Feldhusen, Grote (2013), S. 242-246.

¹³⁹ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 418.

¹⁴⁰ Vgl. Birkhofer, Kloberdanz (2017), S. 65.

Auf der Ebene der *Effekte* werden Funktionen bzw. Teilfunktionen durch physikalische, biologische oder chemische Effekte realisiert. Diese physikalischen, biologischen oder chemischen Erscheinungen können als Gesetzmäßigkeiten, beispielsweise als *Keileffekt*, COULOMBSches *Reibungsgesetz* oder Effekt der *Druckfortpflanzung*, formuliert werden.¹⁴¹

Die Ebene des *Wirkprinzips* konkretisiert die physikalischen Effekte durch Elemente des Wirkmodells und bringt sie in einen Zusammenhang, dem sogenannten *Wirkprinzip*, auf Basis dessen das Lösungsprinzip ersichtlich wird.¹⁴² Zu den Elementen des Wirkmodells zählen *Wirkflächen (WF)*, *Wirkkörper (WK)*, *Wirkräume (WR)* und *Wirkbewegungen (WB)*. Die Verknüpfung mehrerer Wirkprinzipien wird als Wirkstruktur bezeichnet.¹⁴³ Wirkflächen stehen dauernd oder zeitweise mit anderen Wirkflächen in Kontakt, wodurch *Wirkflächenpaare (WFP)* ausgeformt werden. Über Wirkflächenpaare werden im technischen System Energien, Stoffe und Informationen ausgetauscht.¹⁴⁴

Nach dem von MATTHIESEN entwickelten *Contact&Channel-Ansatz (C&C²-Ansatz)*, welcher die *Funktion* und die *Gestalt* eines Produkts miteinander verknüpft, bilden *Leitstützstrukturen (LSS)* die Verbindung (Channel) zwischen Wirkflächenpaaren (Contacts) wie Abbildung 2.9 zeigt. Leitstützstrukturen ermöglichen die dauerhafte oder zeitweilige Leitung von Energie, Stoff oder Information zwischen den Wirkflächen von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern. Als Reststruktur werden hingegen Volumen bezeichnet, die Teil eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines Gases oder eines felderfüllten Raums sind, und nie Teil einer Leitstützstruktur werden.¹⁴⁵

Als Wirkstruktur wird nach MATTHIESEN die „*Menge aller Wirkflächen und Leitstützstrukturen eines technischen Systems, eines technischen Teilsystems oder eines Bauteils*“¹⁴⁶ bezeichnet. Die Menge aller möglichen Leitstützstrukturen wird Tragstruktur genannt.¹⁴⁷ Eine Funktion wird nach MATTHIESEN durch die Ausbildung von zwei Wirkflächenpaaren und der verbindenden Leitstützstruktur erfüllt.¹⁴⁸ Am Beispiel der Stirnradstufe in Abbildung 2.9 wird durch das WFP_{21; 22} und WFP_{13; 14} sowie der verbindenden LSS_{2 2; 1 3} die Funktion „*Antriebsmoment durch Zahnrad 2 leiten*“ realisiert. Mit Hilfe des Ansatzes lassen sich Systeme hinsichtlich Produktfunktionen analysieren, wobei zwischen gewollten

¹⁴¹ Vgl. Koller (1994), S. 52; Ponn, Lindemann (2008), S. 306-307.

¹⁴² Vgl. Pahl et al. (2007b), S. 54; Ponn, Lindemann (2008), S. 79.

¹⁴³ Vgl. Ponn, Lindemann (2008), S. 79; Birkhofer, Kloberdanz (2017), S. 56.

¹⁴⁴ Vgl. Matthiesen (2002), S. 53.

¹⁴⁵ Vgl. Matthiesen (2002), S. 49 und 51.

¹⁴⁶ Matthiesen (2002), S. 51.

¹⁴⁷ Vgl. Matthiesen (2002), S. 51.

¹⁴⁸ Vgl. Matthiesen (2002), S. 54; Albers (2010), S. 6.

Funktionen und Fehlfunktionen, d. h. ungewollten Funktionen wie beispielsweise ungewollter Verschleiß, zu differenzieren ist.¹⁴⁹

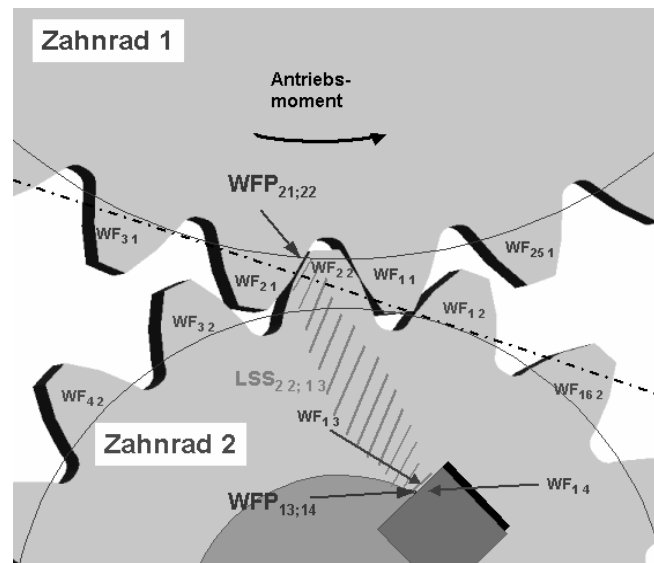


Abbildung 2.9: Elemente des C&C²-Ansatzes am Beispiel einer Stirnradstufe mit mittelbarer formschlüssiger Welle-Nabe-Verbindung eines Stirnrades¹⁵⁰

Vorgehen zur Analyse und Synthese technischer Systeme unter Anwendung der beschriebenen Modellvorstellung finden sich u. a. in Arbeiten von MATTHIESEN¹⁵¹ und LEMBURG^{152, 153}. Der Fokus dieser Arbeiten liegt zumeist auf der Analyse und Synthese von Systemen, die zum Ziel haben Kräfte und Momente innerhalb des Systems zu leiten oder umzuformen.¹⁵⁴

Auf der Ebene der *Gestalt* werden im Gestaltmodell, welches das Produktmodell mit höchstem Konkretisierungsgrad darstellt, alle Wirkelemente durch Gestaltelemente geometrisch und werkstofflich konkretisiert und die Produktgestalt somit vollständig festgelegt.¹⁵⁵ Die Produktgestalt umfasst die Summe geometrischer und werkstofflich beschreibbarer Eigenschaften eines Produkts.¹⁵⁶ Die Darstellung von Gestaltmodellen erfolgt oftmals rechnerunterstützt mit CAD-Systemen. Das Ergebnis dieser Ebene ist der

¹⁴⁹ Vgl. Thau (2013), S. 106.

¹⁵⁰ Quelle: Matthiesen (2002), S. 111.

¹⁵¹ Vgl. Matthiesen (2002); Matthiesen (2019); Wintergerst (2015); Thau (2013).

¹⁵² Vgl. Lemburg (2009).

¹⁵³ Weitere Beschreibungen zum Verständnis von Wirkflächen und Wirkflächenkopplungen finden sich in Arbeiten von Ersoy (1975), Birkhofer (1980); Roth (2000); Frei (2002).

¹⁵⁴ Vgl. Ersoy (1975), S. 101-110; Birkhofer (1980), S. 28-41; Roth (2000), S. 150-166; Roth (2001), S. 43-66; Matthiesen (2002), S. 104-141; Frei (2002), S. 46; Lemburg (2009), S. 87-99

¹⁵⁵ Vgl. Wäldele (2012), S. 33; Rude (1998), S. 301.

¹⁵⁶ Vgl. Ponn, Lindemann (2008), S. 124.

Entwurf des Produkts, welcher in Form von technischen Zeichnungen dokumentiert werden kann und die Schnittstelle zur Produktion des Produkts darstellt.¹⁵⁷

Modellierung und Beschreibung technischer Prozesse

Technische Systeme dienen der Umsetzung technischer Prozesse.¹⁵⁸ Technische Prozesse werden im Zuge der Produktentwicklung als Transformationsprozesse verstanden, welche eine definierte Zustandsänderung eines Objekts, folgend *Operand* genannt, innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls beschreiben.¹⁵⁹ Technische Systeme stellen also das (Arbeits-)Mittel dar, mit dessen Hilfe im Zuge eines technischen Prozesses ein bestimmter Zweck erfüllt werden kann.¹⁶⁰ Der Zweck lässt sich dabei als Transformation eines Anfangszustands in einen beabsichtigten Endzustand des Operanden beschreiben.¹⁶¹ Aufbauend auf den zuvor genannten Einschränkungen zur Beschreibung von Funktionen, schränkt GRAMLICH technische Prozesse auf die Zustandsänderung stofflicher Gebilde ein, sodass Energien und Signale¹⁶² definitionsgemäß nicht als Operand dienen können.¹⁶³

Zur Abbildung von technischen Prozessen stehen sich stark unterscheidende und vom Anwendungszweck abhängige Prozessmodelle zur Verfügung.¹⁶⁴ An dieser Stelle sollen das *Prozessmodell* nach HEIDEMANN sowie das *Sequenzmodell* nach MATTHIESEN näher beleuchtet werden.

Prozessmodell nach HEIDEMANN

Abbildung 2.10 zeigt das von HEIDEMANN entwickelte *Prozessmodell* zur Abbildung von Prozessen der Nutzungsphase. Das technische Produkt stellt das *Arbeitsmittel*¹⁶⁵ in Form des Operators dar, welches eine geeignete *Wirkgröße*¹⁶⁶ bereitstellt, die auf den Operanden einwirkt und so zur Transformation seines Anfangs- in einen Endzustand in einem entsprechenden Zeitintervall genutzt wird.¹⁶⁷ Das Erreichen des beabsichtigten Endzustands stellt den Zweck des Nutzungsprozesses dar.

¹⁵⁷ Vgl. Wäldele (2012), S. 33.

¹⁵⁸ Vgl. Pahl et al. (2007b), S. 42.

¹⁵⁹ Vgl. Hubka (1984), S. 23-29.

¹⁶⁰ Vgl. Heidemann (2001), S. 21.

¹⁶¹ Vgl. Hubka (1984), S. 23.

¹⁶² Es sei denn, sie sind an stoffliche Gebilde gebunden, vgl. Roos (2018), S. 27.

¹⁶³ Vgl. Gramlich (2013), S. 63-64.

¹⁶⁴ Vgl. u. a. Hubka (1984), S. 30-50; Petri (1961); Baumgarten (1996).

¹⁶⁵ Vgl. Heidemann (2001), S. 88-92.

¹⁶⁶ Vgl. Heidemann (2001), S. 86-88.

¹⁶⁷ Vgl. Heidemann (2001), S. 76-88

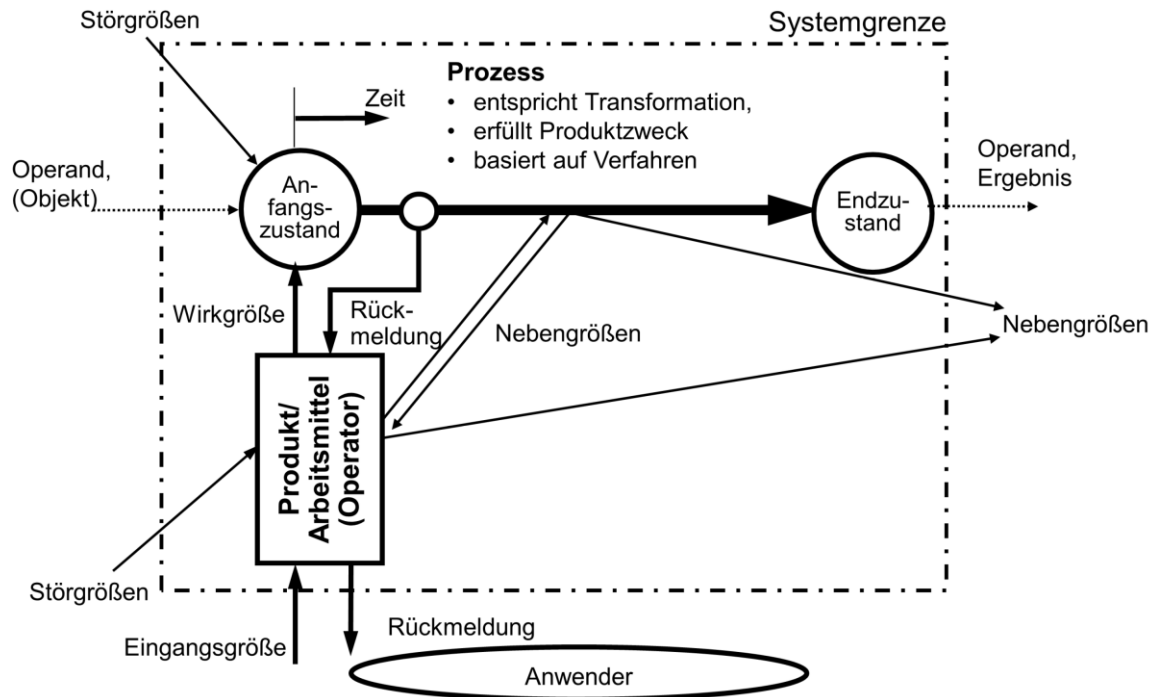


Abbildung 2.10: Prozessmodell nach HEIDEMANN¹⁶⁸

Das Arbeitsmittel selbst erfährt keine Zustandsänderung. Weiterhin beinhaltet das Prozessmodell *Prozessgrößen* in Form von *Wirk-, Neben-, Eingangs- und Störgrößen* sowie *Rückmeldungen* aus dem Prozess. *Ungewollte Größen* sind in der Modelldarstellung beabsichtigt schräg angeordnet, wohingegen *gewollte Größen*, wie beispielsweise Eingangsgrößen oder Wirkgrößen, horizontale bzw. vertikale Pfeile besitzen. *Störgrößen* wirken aus der *Umgebung* auf den Prozess und/oder das Arbeitsmittel. Andersherum resultieren aus dem Prozess oder dem Arbeitsmittel selbst sogenannte *Nebengrößen*, die sowohl über die Systemgrenze hinweg auf die Umgebung oder innerhalb des Systems ungewollte Einflüsse bewirken.¹⁶⁹ *Ungewollte Größen* können nach HEIDEMANN Energie, Stoffe und Signale darstellen.¹⁷⁰ Zur Ermittlung der Vielzahl an Stör- und Nebengrößen sowie unbeabsichtigten Wechselwirkungen existieren beispielsweise Checklisten nach MATHIAS oder MATTHIASSEN.¹⁷¹

Durch Weglassen bestimmter Modellelemente bietet das Prozessmodell die Möglichkeit, bestimmte Aspekte in den Vordergrund zu stellen. Das Ausblenden des Arbeitsmittels ermöglicht – ähnlich der Gliederung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen – eine Auftei-

¹⁶⁸ Quelle: Gramlich (2013), S. 32 in Anlehnung an Heidemann (2001), S. 138; begrifflich und grafisch angepasst nach Birkhofer (2011), S. 354.

¹⁶⁹ Vgl. Heidemann (2001), S. 101-110.

¹⁷⁰ Vgl. Heidemann (2001), 102 und 106.

¹⁷¹ Vgl. Mathias (2016), S. XVI-XXIV sowie Matthiassen (1997).

lung komplexer Prozesse mit beispielsweise mehreren Operanden am Eingang in Teilprozesse innerhalb von *Prozessstrukturen*.¹⁷² Mit Hilfe von Prozessstrukturmodellen können verschiedene parallele oder in Reihe geschaltete Teilprozesse mit definierten Zwischenzuständen miteinander verknüpft und abgebildet werden.

Abbildung 2.11 zeigt eine beispielhafte Prozessstruktur einer Ansetzmaschine, bei der ein Druckknopfoberteil und ein -unterteil durch einen Jeansstoff mit Hilfe eines Umformvorgangs formschlüssig miteinander verbunden werden. Die Darstellung ist losgelöst von der produktseitigen Umsetzung und beschreibt im Wesentlichen den Gesamtprozess als eine Aufeinanderfolge von Teilprozessen mit Zwischenzuständen und Verknüpfungen.

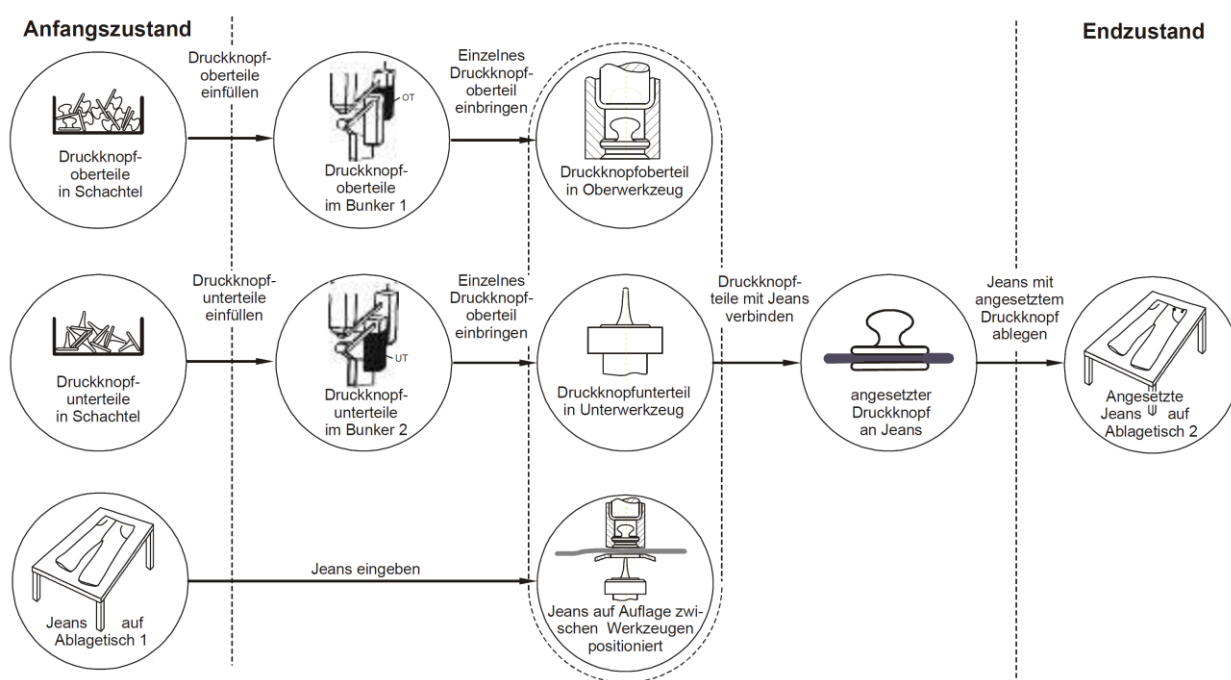


Abbildung 2.11: Prozessstrukturmodell des Jeansknopf-Ansetzprozesses¹⁷³

Im Rahmen der Produktentwicklung wird das Prozessmodell insbesondere im Bereich der Aufgabenklärung und Anforderungsermittlung genutzt. Dabei wird das Prozessmodell in unterschiedlichen Detaillierungsgraden zur Checklisten-unterstützten Analyse¹⁷⁴ genutzt, indem beispielsweise einzelne Modellelemente gezielt abgefragt und geklärt werden. Im Rahmen der Synthese bietet das Prozessmodell die Möglichkeit durch Lösen von Bekanntem neue Lösungen mit Hilfe variiertes Prozessstrukturen zu erzeugen.¹⁷⁵

Erweiterungen des Prozessmodells werden u. a. in Arbeiten von KLOBERDANZ et al. und FREUND vorgestellt. KLOBERDANZ et al. erweitert das Prozessmodell mit dem Ziel Prozesse systematisch hinsichtlich des Auftretens von Unsicherheit zu analysieren. Neben

¹⁷² Vgl. Heidemann (2001), S. 84.

¹⁷³ Quelle: Birkhofer, Kloberdanz (2017), S. 28.

¹⁷⁴ Vgl. Heidemann (2001), S. 143.

¹⁷⁵ Vgl. Heidemann (2001), S. 140-141.

dem Systemelement des *Anwenders* finden sich in dem erweiterten Prozessmodell nach Abbildung 2.12 die Elemente „*Umgebung*“, „*Ressourcen*“ sowie „*parallele Prozesse*“, wodurch ein detailliertes Verständnis zur Aufdeckung von Unsicherheitsursachen erlangt werden soll.¹⁷⁶ Das *Modell technischer Systeme* nach FREUND erweitert das Prozessmodell nach HEIDEMANN um die Ergebnisse des Sonderforschungsbereichs 805 der TU Darmstadt, indem allen Elemente des Prozessmodells über Eigenschaften sowie deren Schwankungen beschrieben werden. Hierdurch sollen die Wechselwirkungen zwischen Unsicherheit in den Prozessen und dem technischen Produkt detailliert verstanden werden.¹⁷⁷

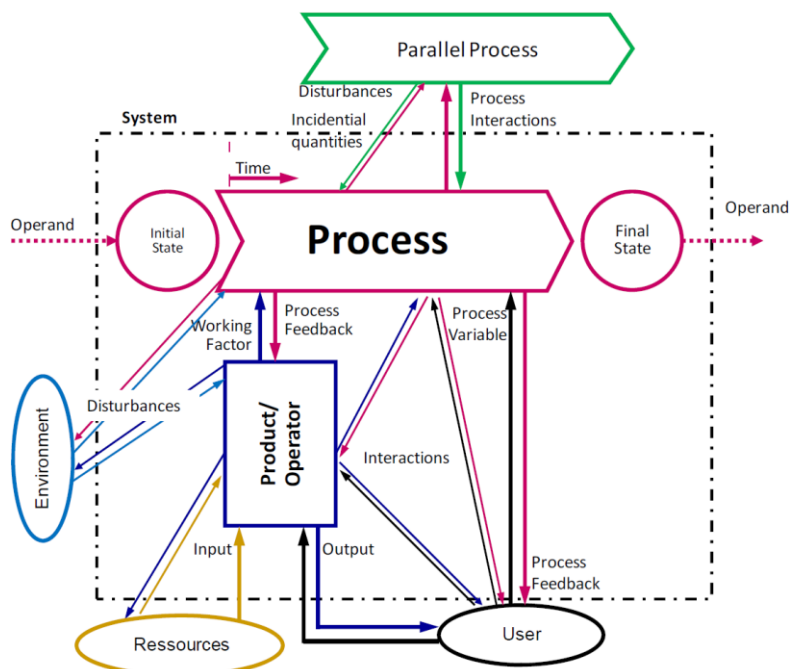


Abbildung 2.12: Erweitertes Prozessmodell nach KLOBERDANZ et al.¹⁷⁸

Sequenzmodell nach ALBERS & MATTHIESEN

Zur Erweiterung des C&C²-Ansatzes entwickelten ALBERS und MATTHIESEN das sogenannte *Sequenzmodell*, welches zur Abbildung dynamischer Vorgänge technischer Systeme genutzt wird.¹⁷⁹ Komplexe Konstruktionsprobleme, wie beispielsweise Einschraubvorgänge selbstpenetrierender Schrauben in Abbildung 2.13, werden einerseits mit Hilfe des C&C²-Ansatzes durch die Verknüpfung von Funktion und Gestalt abgebildet, andererseits muss für dynamische Vorgänge eine ähnliche Dekomposition hinsichtlich der Zeit erfolgen.¹⁸⁰

¹⁷⁶ Vgl. Kloberdanz et al. (2009), S. 6-9.

¹⁷⁷ Vgl. Freund (2018), S. 56-62.

¹⁷⁸ Quellen: Kloberdanz et al. (2009), S. 5:

¹⁷⁹ Vgl. Matthiesen, Ruckpaul (2012), S. 1022.

¹⁸⁰ Vgl. Albers et al. (2008b), S. 7; Matthiesen et al. (2018), S. 13.

Die zeitliche Zerlegung des Konstruktionsproblems durch die Definition von *Sequenzen*, in denen ein bestimmter Satz von WFP und LSS betrachtet wird, bietet zusätzlich die Möglichkeit die Komplexität zu bewältigen.¹⁸¹ Während Zustand 1 in Abbildung 2.13 wird die Funktion „*Schraube körnt den Untergrund*“ realisiert, wobei WFP A-1 zur Funktionserfüllung beiträgt. In Zustand 2 wird durch WFP B-2 die zusätzliche Funktion „*Schraube verdrängt den Untergrund*“ ermöglicht.¹⁸²

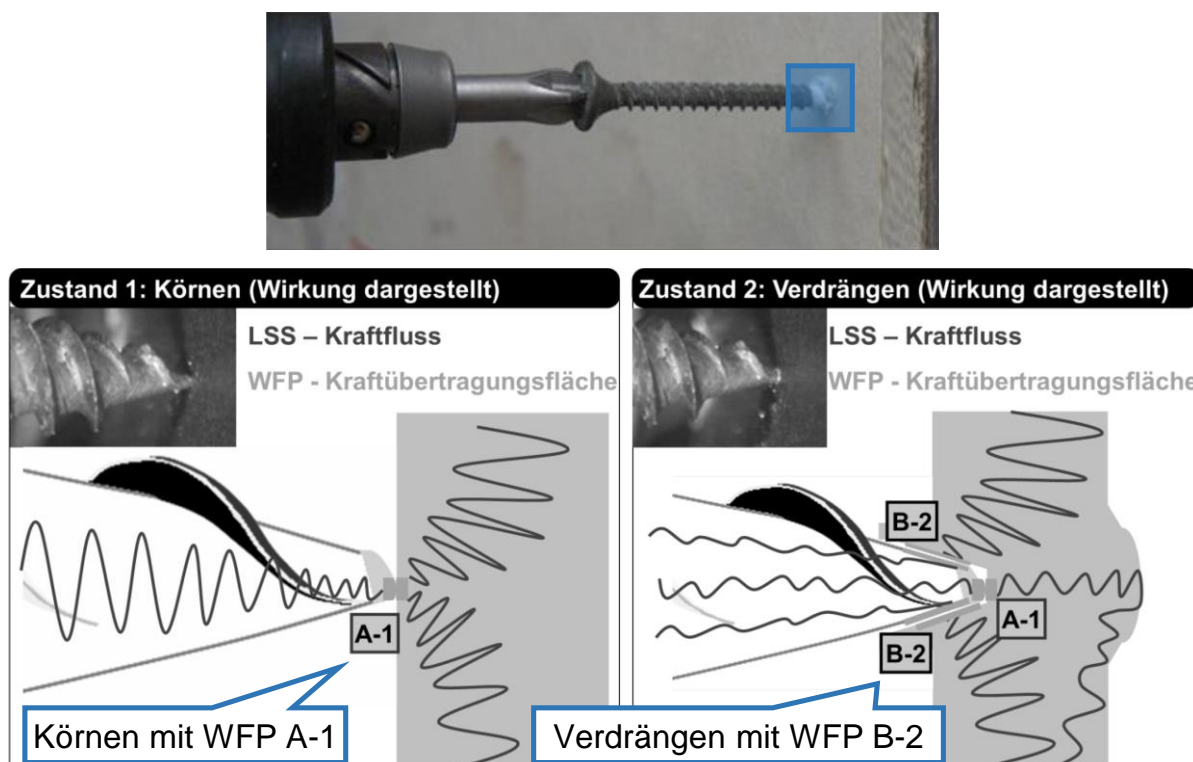


Abbildung 2.13: Beispiel eines Sequenzmodells eines Einschraubvorgangs einer Schnellbauschraube¹⁸³

Sequenzen bestehen aus mindestens zwei *Zuständen* und umfassen ein bestimmtes Set an WFP und LSS. Jeder Zustand eines Systems wird durch die stattfindenden Funktionen bzw. über WFP und LSS beschrieben.¹⁸⁴ Innerhalb jedes Zustands können beliebig viele Funktionen gleichzeitig erfüllt werden, jedoch mindestens eine. Während eines Zustands werden die Funktionen und Wirkungen als statisch und nicht veränderlich betrachtet, WFP und LSS ändern sich also nicht. Wenn ein WFP aufgelöst oder ein neues WFP und somit eine weitere Funktion auftritt oder sich ändert, endet der Zustand und der nächste Zustand folgt.¹⁸⁵

¹⁸¹ Vgl. Albers et al. (2008a), S. 249.

¹⁸² Vgl. Thau (2013), S. 86.

¹⁸³ Quelle: Matthiesen et al. (2018), S. 11 sowie Thau (2013), S. 86.

¹⁸⁴ Vgl. Albers et al. (2008a), S. 249.

¹⁸⁵ Vgl. Matthiesen, Ruckpaul (2012), S. 1022-1023.

Eine *Sequenz* besteht aus einer definierte Abfolge von Zuständen, die immer auf die gleiche Weise ausgeführt wird. WFP und LSS können in mehreren Zuständen auftreten. Technische Systeme basieren auf mindestens einer Sequenz. Weitere Sequenzen können berücksichtigt werden, sofern die Komplexität der Probleme dies erfordert. Sequenzen sind durch die Abfolge einer bestimmten, gleichbleibenden Chronologie der Zustände charakterisiert.¹⁸⁶

Mit Hilfe des Sequenzmodells lassen sich dynamische Vorgänge auf Basis des C&C²-Ansatzes zustandsübergreifend analysieren, woraus ein verbessertes Systemverständnis resultiert.¹⁸⁷ Anhand des Einschraubvorgangs in Abbildung 2.13 zeigt sich beispielsweise, dass während verschiedener Zustände unterschiedliche Wirkflächenpaare zur Realisierung der jeweiligen Funktionen notwendig sind und diese nicht immer parallel existieren müssen.

2.2.3 Grundlagen zu Produktentwicklungsprozessen

Zur Beschreibung und Modellierung von Produktentwicklungsprozessen finden sich in der Literatur unterschiedliche Ansätze, die auf ein geplantes Vorgehen mit konkreten Handlungsanweisungen im Sinne der Konstruktionsmethodik zielen. Im Folgenden sollen relevante Vorgehensmodelle vorgestellt werden, welche sich durch Fokussierung auf unterschiedliche Schwerpunkte hinsichtlich der Konstruktionsaufgabe voneinander unterscheiden.

Methodisches Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte nach VDI 222x

Die VDI-Richtlinienreihe 222x beinhaltet international anerkannte Erkenntnisse verschiedener Autoren zur Konstruktionsmethodik.¹⁸⁸ Insbesondere die VDI-Richtlinie 2221 (kurz: VDI 2221), welche als Kernrichtlinie ein generisches Vorgehensmodell zur Entwicklung technischer Systeme beschreibt, dient als Rahmenwerk zur detaillierten Beschreibung des Produktentwicklungsprozesses, welchem verschiedene Methoden zur Durchführung der Arbeitsschritte zugeordnet werden.¹⁸⁹ Seit 2018 wird die Richtlinie in zwei Teile geteilt.¹⁹⁰ Blatt 1 umfasst Grundlagen zur methodischen Entwicklung technischer Produkte und beschreibt mit Hilfe des *Modells der Produktentwicklung* zentrale Ziele, Aktivitäten und Arbeitsergebnisse.¹⁹¹ In Blatt 2 finden sich exemplarische Produktentwicklungsprozesse, die in verschiedenen Kontexten durchgeführt wurden, inklusive Erläuterungen und

¹⁸⁶ Vgl. Albers et al. (2008a), S. 249-250; Thau (2013), S. 33.

¹⁸⁷ Vgl. Albers et al. (2008a), S. 250; Albers et al. (2008a), S. 1027.

¹⁸⁸ Vgl. Weber (2012), S. 26.

¹⁸⁹ Vgl. VDI 2221 (1993).

¹⁹⁰ Vgl. VDI 2221-1 (2018); VDI 2221-2 (2018).

¹⁹¹ Vgl. VDI 2221-1 (2018), S. 2.

Zuordnung möglicher Aktivitäten und Vorschläge zu den jeweiligen Produktentwicklungsphasen.¹⁹²

Abbildung 2.14 zeigt das Vorgehensmodell der VDI 2221, welches sieben aufeinander aufbauende, wesentliche Arbeitsschritte beschreibt.¹⁹³ Jedem Arbeitsschritt ist ein definiertes Arbeitsergebnis zugeordnet. Obwohl die Anordnung des Modells ein sequentielles Vorgehen vermuten lässt, ist ein iteratives Vor- und Zurückspringen zwischen den Arbeitsschritten ausdrücklich möglich.¹⁹⁴

In Abhängigkeit des Neuheitsgrads des zu entwickelnden Produkts, wobei zwischen Neukonstruktionen, Anpassungskonstruktionen und Variantenkonstruktionen unterschieden wird, werden bestimmte Arbeitsschritte nicht vollständig oder gar nicht bearbeitet.¹⁹⁵

Inhaltlich ähnliche Arbeitsschritte lassen sich branchenspezifisch zu Phasen zusammenfassen.¹⁹⁶ Häufig erfolgt die Einteilung in die in Abbildung 2.14 gezeigten vier Phasen.¹⁹⁷

Während Phase I – *Projektdefinitionsphase* – gilt es, beginnend bei einer Aufgabe oder einem Problem, die Aufgabenstellung zu klären, zu präzisieren, verfügbare Informationen zum Produktkontext zusammenzutragen und Anforderungen in einer Anforderungsliste zu dokumentieren.¹⁹⁸ Die Anforderungsliste wird in anschließenden Phasen verfeinert und dient zum Abgleich der Arbeitsergebnisse.¹⁹⁹

Die eigentliche Lösungsfindung findet in den Phasen II und III – *Konzeptphase* und *Entwurfsphase* – statt. Während der Konzeptphase werden die Gesamtfunktion des zu entwickelnden Produkts sowie die zu erfüllenden Teilfunktionen bestimmt. Die daraus zu bildende Funktionsstruktur dient als abstraktes Hilfsmittel für die systematische Lösungssuche für die einzelnen Teilfunktionen. Die als geeignet befundenen Teillösungen werden zu einer prinzipiellen Gesamtlösung konkretisiert. In Phase II erfolgt die Entwicklung strukturiert und wird durch den Einsatz von Methoden unterstützt.²⁰⁰ Die Entwurfsphase ist im Wesentlichen durch das *Gestalten* geprägt. Hierbei wird die prinzipielle Gesamtlösung durch Festlegen von Geometrie- und Werkstoffeigenschaften schrittweise konkretisiert.²⁰¹

¹⁹² Vgl. VDI 2221-2 (2018), S. 2-3.

¹⁹³ In VDI 2221-1 (2018) werden die Arbeitsschritte „Aktivitäten“ genannt und es wird darauf hingewiesen, dass die Anzahl je nach Aufgabenkomplexität variieren kann, VDI 2221-1 (2018), S. 18.

¹⁹⁴ Vgl. VDI 2221-1 (2018), S. 18.

¹⁹⁵ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 6.

¹⁹⁶ Beispielhafte Einteilungen finden sich in VDI 2221-2 (2018), S. 14-21.

¹⁹⁷ Vgl. Birkhofer (2011), S. 335.

¹⁹⁸ Vgl. VDI 2221-1 (2018), S. 18-19.

¹⁹⁹ Vgl. VDI 2221-1 (2018), S. 16.

²⁰⁰ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 33-38.

²⁰¹ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 11

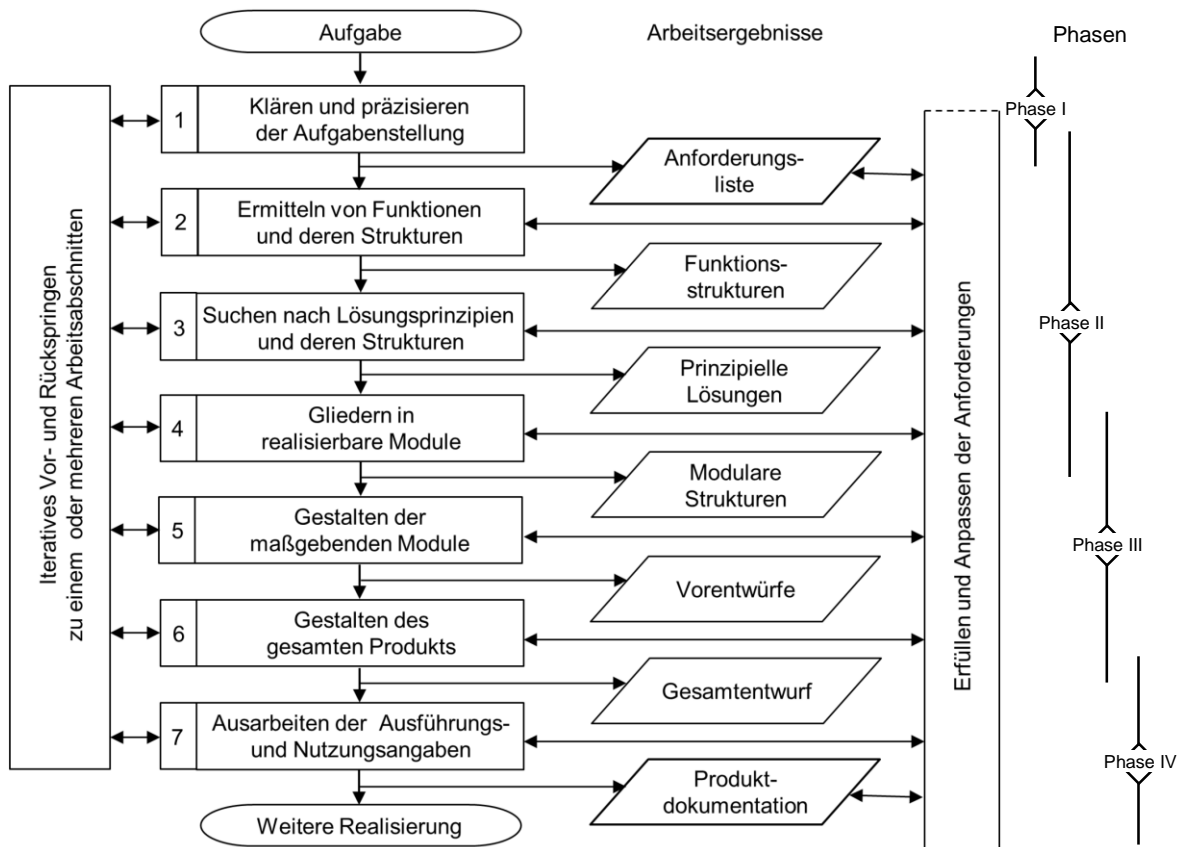


Abbildung 2.14: Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221²⁰²

Die VDI-Richtlinie 2223 vermittelt hierfür ein tiefer gehendes Verständnis für den komplexen Vorgang des Gestaltens, indem sie dazu beiträgt den Vorgang als „*methodisch durchzuführenden Arbeitsschritt*“ zu begreifen.²⁰³ Im Gegensatz zu dem stark strukturierten Vorgehen vorhergehender Phasen ist das Gestalten durch ein iteratives Vorgehen charakterisiert. Dies begründet sich in der starken Vernetzung der festzulegenden und festgelegten Eigenschaften des Produkts sowie der großen Anzahl von Eigenschaften.²⁰⁴ Zur Steigerung der Beherrschbarkeit werden beim Gestalten sowohl *strategische*²⁰⁵ als auch *taktische*²⁰⁶ Vorgehensweisen herangezogen.²⁰⁷ Das übergeordnete, strategische Vorgehen fokussiert die Effektivität des Gestaltens, sodass möglichst wenige Rücksprünge oder Doppelarbeiten anfallen. Das taktische Vorgehen wird genutzt, um Gestaltungsprobleme im Detail iterativ und korrektiv zu lösen. Dieses Vorgehen ist durch stän-

²⁰² Quelle: VDI 2221 (1993), S. 9.

²⁰³ Vgl. VDI 2223 (2004), S. 5.

²⁰⁴ Vgl. Birkhofer, Kloberdanz (2017), S. 184.

²⁰⁵ Vgl. VDI 2223 (2004), S. 14-27.

²⁰⁶ Die taktische Vorgehensweise wird auch als operatives Vorgehen bezeichnet, vgl.

VDI 2223 (2004), S. 44-64

²⁰⁷ Vgl. Giapoulis (1996), S. 94-123.

dige Wechsel zwischen Analyse- und Syntheseschritten, welche oftmals nicht klar voneinander getrennt werden können, geprägt.²⁰⁸ Ergebnis von Phase III stellt der Gesamtentwurf dar, welcher durch alle wesentlichen Geometrie- und Werkstoffeigenschaften beschrieben werden kann.

Phase IV – *Ausarbeitungsphase* – schließt den Produktentwicklungsprozess durch die Anfertigung und Bereitstellung einer vollständigen Produktdokumentation ab.²⁰⁹

Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung (GPPE)

Aufbauend auf dem Vorgehensmodell der VDI-Richtlinien 222x existieren eine Vielzahl von artverwandten Varianten sowie Erweiterungen. Abbildung 2.15 zeigt das Modell der *ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung (GPPE)*²¹⁰, welches den Entwicklungsprozess, angelehnt an VDI 2221, als vierstufige Prozesskette auffasst. Das Modell vereint diese *virtuelle* Prozesskette mit den Phasen des Produktlebenslaufs des *realen* Produkts.²¹¹

Der Produktlebenslauf setzt sich aus den Phasen *Werkstoffherstellung*, *Produktion*, *Nutzung* und *Recycling/Entsorgung* zusammen. Das Modell der GPPE ordnet, wie Abbildung 2.15 zeigt, der Nutzungsphase eine zentrale Rolle zu. Das Produkt erfüllt während der Nutzungsphase als Operator den eigentlichen Zweck, für den es entwickelt wurde, vgl. Abschnitt 2.2.2. Während anderer Prozesse im Produktlebenslauf fungiert das Produkt hingegen als passiver Operand, d. h. es erfährt selbst im Zuge eines Transformationsprozesses Zustandsänderungen. Im Anschluss der Ausarbeitung des Produkts als letzten Schritt der Produktentwicklung erfolgt die Realisierung in der Produktion, sodass hierüber die Kopplung der beiden Prozessketten erfolgt.²¹²

Die entscheidenden Elemente der GPPE stellen das *Antizipieren* von Lebenslaufphasen und das *Beeinflussen* von Produkteigenschaften dar. Diese Elemente beschreiben das Ziel, Prozesse des Produktlebenslaufs wie beispielsweise relevante Prozesse der Nutzungsphase vorzudenken und daraus ableitbare Informationen im Zuge der Konkretisierung des Produkts in der Prozesskette der Produktentwicklung einfließen zu lassen. Von großer Bedeutung ist also das Antizipieren sämtlicher Prozesse über den gesamten Lebenslauf des Produkts, mit dem Ziel eine simultane Betrachtung von Produkten und Prozessen während der Produktentwicklung zu erreichen.²¹³

²⁰⁸ Vgl. Lemburg (2009), S. 85; VDI 2223 (2004), S. 37.

²⁰⁹ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 11.

²¹⁰ Vgl. Birkhofer et al. (2012).

²¹¹ Vgl. Grüner (2001), S. 45-50.

²¹² Vgl. Birkhofer, Schott (1996), S. 386-396; Schott (1998), S. 59-68; Birkhofer et al. (2007), S. 206-207; Birkhofer (2011), S. 348-349.

²¹³ Vgl. Roos (2018), S. 77ff.; Birkhofer et al. (2012), S. 566 und 576; Grüner (2001), S. 49-50.

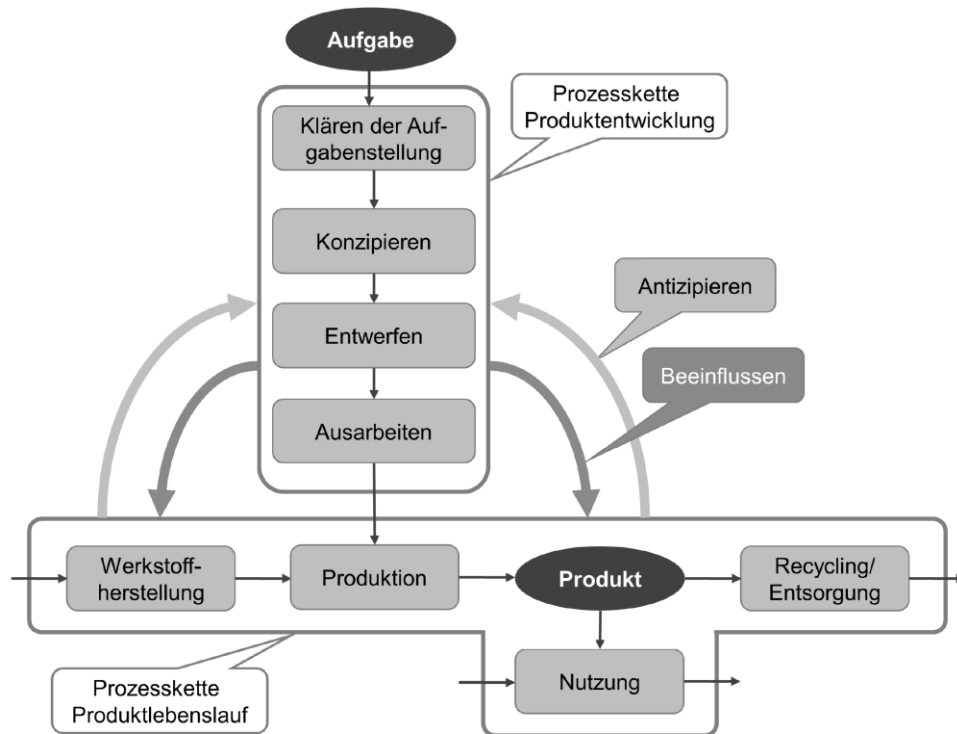


Abbildung 2.15: Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung²¹⁴

Integriertes Produktentstehungs-Modell (iPeM)

Dem *integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM)* ist der Kerngedanke eines ganzheitlichen entwicklungsorientierten Verständnisses und Handelns hinterlegt.²¹⁵ Das iPeM stellt Modelle „zur Beschreibung und Orientierung im Produktentstehungsprozess sowie zur effizienten und zielgerichteten Strukturierung der Aktivitäten“²¹⁶ zur Verfügung. Es basiert auf zwei wesentlichen Modellen, SPALTEN und ZHO.

SPALTEN beschreibt eine Vorgehensweise, die ein effizientes Lösen komplexer Probleme zum Ziel hat. Die einzelnen Aktivitäten des Produktentstehungsprozesses sollen dabei teamorientiert sowie unter projekt- und unternehmensspezifischen Randbedingungen gelöst werden.²¹⁷ Das Akronym SPALTEN setzt sich aus folgenden Modulen zusammen:

- Situationsanalyse
- Problemeingrenzung
- Alternative Lösungssuche
- Lösungsauswahl
- Tragweitenanalyse

²¹⁴ In Anlehnung an Grüner (2001), S. 46; Birkhofer et al. (2012), S. 566.

²¹⁵ Vgl. Meboldt (2008), S. 149, Albers et al. (2016a), S. 101.

²¹⁶ Meboldt (2008), S. 149.

²¹⁷ Vgl. Albers, Meboldt (2007), S. 49-50.

- Entscheiden und Umsetzen
- Nacharbeiten und Lernen²¹⁸

Einzelne Module können situationsgerecht, flexibel oder teilweise sequenziell bearbeitet werden.²¹⁹

Abbildung 2.16 zeigt das ZHO-Modell, welches sich aus drei Teilsystemen, bestehend aus Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem, zusammensetzt. Es stellt den Kern des Entwicklungsprozesses dar.

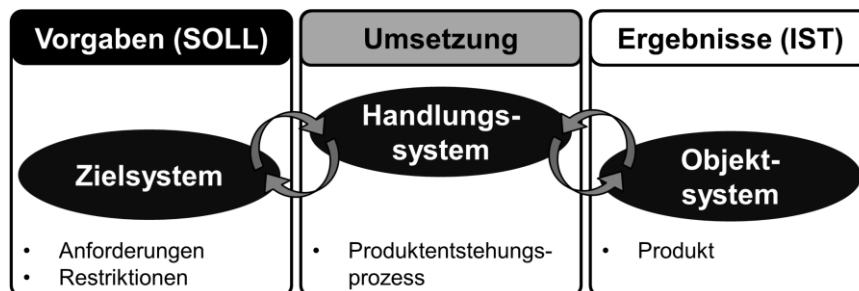


Abbildung 2.16: ZHO-System²²⁰

Über das Handlungssystem wird das Zielsystem in das Objektsystem überführt. Das Zielsystem beinhaltet gewissermaßen den Soll-Zustand, das Objektsystem den Ist-Zustand, vgl. Abbildung 2.16. Im Zuge des iPeM werden die drei genannten Systeme zur Entwicklung von Produkten genutzt. Das Zielsystem umfasst alle Ziele der Entwicklung, sowie Randbedingungen, Abhängigkeiten und Wechselwirkungen in Form von Informationen. Zu Beginn beinhaltet dieses vage Informationen, die jedoch im Zuge der Produktentstehung dynamisch erweitert und konkretisiert werden.²²¹ Nach EBEL kann das Zielsystem zur Komplexitätsbeherrschung in unterschiedliche Subsysteme gegliedert werden.²²² Das verbindende System zwischen Ziel- und Objektsystem stellt das Handlungssystem dar. Es beschreibt die eigentliche Produktentstehung, also alle Aktivitäten, die für die Transformation der Informationen des Zielsystems in Elemente des Objektsystems notwendig sind. Sobald die Entwicklung abgeschlossen ist, entspricht das Objektsystem dem entwickelten Produkt.²²³ Zuvor beinhaltet es alle Teillösungen sowie alle generierten Zwischenergebnisse, Dokumente, Prototypen usw.²²⁴

Das iPeM baut auf *Aktivitäten* als „kleinste, sinnvoll zu unterscheidende Einheiten“ auf, welche die kleinsten Elemente von Prozessen beschreiben.²²⁵ Aktivitäten werden in der

²¹⁸ Vgl. Meboldt (2008), S. 129.

²¹⁹ Vgl. Albers et al. (2005), S. 3-4.

²²⁰ In Anlehnung an Meboldt (2008), S. 155 und 157.

²²¹ Vgl. Meboldt (2008), S. 155-158.

²²² Vgl. Ebel (2015), S. 156.

²²³ Vgl. Meboldt (2008), S. 159.

²²⁴ Vgl. Albers et al. (2016b), S. 543.

²²⁵ Vgl. Meboldt (2008), S. 160.

SPALTEN-Aktivitätenmatrix, Abbildung 2.17, abgebildet. Dabei wird zwischen Mikro- und Makroaktivitäten unterschieden.

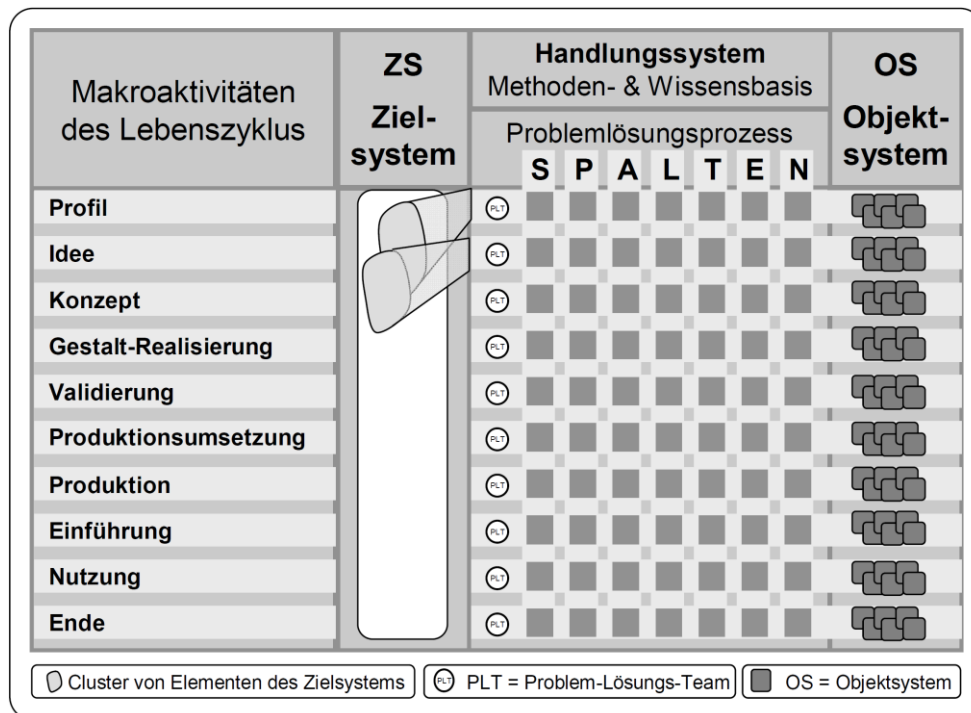


Abbildung 2.17. SPALTEN-Aktivitätenmatrix²²⁶

Makroaktivitäten leiten sich aus dem Produktlebenszyklus ab und werden zeilenweise eingetragen. Mikroaktivitäten stammen aus dem Problemlösungszyklus, beschreiben die Produktentstehung entsprechend dem Handlungssystem nach dem ZHO-System und werden in die Spalten der Matrix eingetragen.²²⁷ Zusätzlich zum Handlungssystem werden in der Aktivitätenmatrix zudem sowohl das Ziel- als auch das Objektsystem aufgeführt.²²⁸

Das iPeM beschreibt den Produktentstehungsprozess als komplexes System, welches im Gegensatz zu anderen Vorgehensmodellen explizit keine sequenzielle Abfolge beschreibt. Dadurch wird eine flexible Abfolge im Handlungssystem mit situationsgerechten Aktivitäten ermöglicht.

²²⁶ Quelle: Meboldt (2008), S. 174.

²²⁷ Vgl. Meboldt (2008), S. 169-170.

²²⁸ Vgl. Meboldt (2008), S. 173-174.

3 Forschungsbedarf und Zielsetzung der Arbeit

Im folgenden Abschnitt 3.1 wird auf Basis des vorangegangenen Abschnitts „Stand der Forschung“ die Ausgangssituation dargelegt und der Forschungsbedarf herausgearbeitet. Anschließend folgen in Abschnitt 3.2 die aus der Problemstellung abgeleitete Zielsetzung dieser Arbeit und Forschungsfragen, die mit dieser Arbeit beantwortet werden.

3.1 Ausgangssituation und Forschungsbedarf

Die Relevanz einer hygienegerechten Gestalt bei Produkten, bei denen es auf ein hohes Maß an Sauberkeit ankommt, wurde in Abschnitt 1.1 verdeutlicht. Bisherige Ansätze für die Unterstützung bei der Umsetzung einer hygienerechten Produktgestalt sind sehr heterogen ausgeprägt und setzen oftmals in sehr späten Phasen des Produktentwicklungsprozesses an, sodass bereits eine Vielzahl von Gestaltungsbereichen festgelegt ist. Ein Ignorieren der hygienerlevanten Anforderungen zu diesem Zeitpunkt kann zu zeitaufwendigen Änderungen der Gestalt im Entwicklungsprozess führen.

Die im Stand der Forschung beschriebenen Grundlagen führen zu einer vielseitigen Problemstellung mit unterschiedlichen Aspekten, welche im Folgenden näher erläutert werden:

- Bestehende Hilfsmittel zur hygienegerechten Gestaltung unterstützen nur bei der Gestaltung ausgewählter Produkte
- Existierende Hilfsmittel zur hygienegerechten Gestaltung zielen insbesondere auf späte Phasen des Produktentwicklungsprozesses
- Es fehlt die Modellbasis einer methodischen Unterstützung für die Entwicklung hygienegerechter Produkte

Bestehende Hilfsmittel unterstützen nur bei der Gestaltung bestimmter Produkte

Eine große Anzahl von Hilfsmittel zur hygienegerechten Gestaltung zeichnet sich durch die Darstellung von Gut-Schlecht-Beispielen oder einer rein textlichen Beschreibung von Gestaltungshinweisen aus. Diese Hilfsmittel basieren auf der Erfahrung der Mitglieder unterschiedlicher Interessenvertretungen. Dazu gehören beispielsweise die EHEDG, Dechema (Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.), VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) oder VDI (Verein Deutscher Ingenieure e.V.) aus dem europäischen Raum sowie beispielsweise 3-A, NSF International (National Sanitation Foundation) oder ASME (American Society of Mechanical Engineers) aus dem amerikanischen Raum. Daneben existieren noch zahlreiche internationale Zusammenschlüsse mit teilweise sehr spezifischen Ausrichtungen. Auf Grund dieser großen Anzahl unterschiedlicher, oft aus dem industriellen Umfeld stammender, Gruppierungen mit unterschiedlichen Schwerpunkten, erfolgt aus einer reinen Ansammlung dieser Hilfsmittel kein erkennbarer Mehrwert für die Entwicklung hygienegerechter, innovativer Produkte.

Je mehr Gut-Schlecht-Beispiele existieren, desto größer ist zwar die Wahrscheinlichkeit, dass das zu entwickelnde Produkt durch ein existierendes Beispiel erfasst wird. Da die Anzahl möglicher Produkte für eine Entwicklungsaufgabe jedoch unzählbar groß ist, ist das Entwickeln von dieser Menge an Beispielen sehr aufwendig. Dies kann dazu führen, dass bei Entwicklungsaufgaben lediglich diejenigen Lösungen angestrebt werden, für die von Gut-Schlecht-Beispielen beschriebene Lösungen bestehen. Der Spielraum für Innovationen ist dadurch eingeschränkt. Existiert kein Hinweis in Form eines Gut-Schlecht-Beispiels für eine bestimmte Entwicklungsaufgabe, kann derzeit entweder die Entwicklungsaufgabe nicht erfüllt werden oder die Entwicklung wird womöglich, je nach Erfahrung des Produktentwicklungsteams, mehr Zeit für die Lösungsfindung in Anspruch nehmen. Somit stellt das Erarbeiten von Gestaltungsrichtlinien mit Gut-Schlecht-Beispielen im Zuge der Entwicklung hygienegerechter innovativer Produkte einen nicht passenden Ansatz dar, da dieser sehr spezielle Baugruppen anspricht.

Forschungsbedarf besteht an dieser Stelle, da alle existierenden Hilfsmittel zur Gestaltung hygienegerechter Produkte lediglich beispielhafte Beschreibungen von Lösungsmöglichkeiten überschaubar komplexer Systeme darstellen. Da bei der Entwicklung neuer Produkte diese Hilfsmittel nicht angewendet werden können, gilt es hierfür eine Unterstützung zu schaffen, die im Sinne der methodischen Produktentwicklung auf ein breiteres Produktspektrum anwendbar ist.

Hilfsmittel zielen primär auf die Feingestaltung von Produkten

Neben Gut-Schlecht-Beispielen existieren weitere Hilfsmittel für die Gestaltung hygienegerechter Produkte. Dazu gehören Hinweise für zulässige Fertigungs- und Fügeverfahren, Listen von empfohlenen Werkstoffen, Details zu Eigenschaften der Materialoberflächen sowie weitere Anforderungen an bestimmte Konstruktionsdetails. Zu Letzterem gehören beispielsweise Forderungen nach abgerundeten Kanten mit einem Mindestradius von 3 mm an allen lebensmittelberührenden Kanten oder die Vorgabe der Anordnung von Schrauben und deren exakte Ausführung im Lebensmittelbereich.

Der Forschungsbedarf begründet sich dadurch, dass die Berücksichtigung dieser Hinweise erst nach dem Feststehen vieler Gestaltungsdetails erfolgt, da eine frühere Berücksichtigung von den Hinweisen nicht adressiert wird. Das Potenzial zur Nutzung des vorherigen Grobgestaltens wird bislang im Bereich der Entwicklung hygienegerechter Produkte nicht ausgeschöpft. Werden gewisse Maßnahmen zur Reduktion des Kontaminationsrisikos zu einem früheren Zeitpunkt des Gestaltungsprozesses getroffen, so besteht die Möglichkeit während späterer Phasen, besonders während der Feingestaltung, weniger Arbeit in das Ausbessern vorheriger Fehler stecken zu müssen.

Fehlende Modellbasis einer methodischen Unterstützung für die Entwicklung hygienegerechter Produkte

Die fehlende Unterstützung bei der Entwicklung hygienegerechter Produkte lässt sich auf das Fehlen geeigneter Modelle zur Beschreibung des Produkts hinsichtlich hygienerelevanter Aspekte zurückführen.

Der von ALBERS und MATTHIESEN entwickelte Contact & Channel Ansatz, vgl. Abschnitt 2.2.2, bietet durch die Verknüpfung von Funktions- und Gestaltelementen ein strukturiertes Hilfsmittel bei der Analyse und Synthese technischer Produkte. Jedoch beinhaltet dieser Ansatz definitionsgemäß lediglich die Möglichkeit beabsichtigte Funktionen sowie Fehlfunktionen der Produkte zu identifizieren.²²⁹ Die zentralen Aspekte bei der Entwicklung hygienegerechter Produkte sind sogenannte „Nicht-Funktionen“, d. h. beispielsweise das Fehlen einer geeigneter Dichtung bei Fluidsystemen, welches zur Leckage führt. Diese sind mit Hilfe existierender Produktmodelle wie dem Contact & Channel Ansatz nicht abbildbar.

Die Grundgedanken dieses Ansatzes werden in dieser Arbeit als Basis für die Entwicklung des sogenannten *Wirkraummodells* genutzt werden, welches in der Lage ist hygienerelevante Aspekte abzubilden.

3.2 Zielsetzung der Arbeit und Forschungsfragen

Der Stand der Forschung und der abgeleitete Forschungsbedarf zeigen, dass die Potenziale zur Entwicklung hygienegerechter Produkte bislang nicht vollends ausgenutzt wurden. Die Notwendigkeit und Wichtigkeit einer hygienegerechten Produktgestalt, insbesondere im Bereich der lebensmittelverarbeitenden Industrie, ist bekannt. Sie wird durch Gesetze vorgeschrieben und in nationalen sowie internationalen Normen durch diverse Anforderungen präzisiert. Verschiedene Interessenvertretungen liefern für die Produktentwicklung Hilfsmittel, die sie bei der Umsetzung der Anforderungen unterstützen. Sie nutzen jedoch nur bei bestimmten Produkten oder Problemen und sind nicht flächendeckend einsetzbar. Dies kann vornehmlich über die Inkompatibilität existierender Produktmodelle im Sinne der methodischen Produktentwicklung begründet werden.

Daher ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung eines Produktmodells zum Ableiten und Berücksichtigen hygienerelevanter Anforderungen bei der Entwicklung hygienegerechte Produkte. Folgende Forschungsfragen leiten sich aus der Zielsetzung ab:

- I. Welche Produktmodelle eignen sich für die Abbildung von Produkten im Prozesszusammenhang? Wie lassen sich Funktionen und insbesondere Nicht-Funktionen sowie Gestaltelemente in diesem Produktmodell abbilden?

²²⁹ Vgl. Abschnitt 2.2.2

- II. Wie müssen geeignete Modelle angepasst bzw. erweitert werden, sodass hygiene-relevante Zusammenhänge abgebildet werden können?
- III. Welche Beeinflussungsmöglichkeiten haben Produktentwickler bei der Entwicklung hygienegerechter Produkte? Wie lassen sich die Beeinflussungsmöglichkeiten im Modell analysieren und identifizieren?
- IV. Inwieweit unterstützt der entwickelte Ansatz bei der Synthese hygienegerechter Produkte?

Zur Beantwortung der ersten beiden Forschungsfragen wird in Kapitel 4 eine Modellbasis zur formalisierten Beschreibung technischer Produkte in unterschiedlichen Prozessen der Lebenslaufphasen geschaffen. Dazu werden bisherige Ansätze und Modelle zur Modellierung genutzt, um daraus ein neues Produktmodell, das sogenannte Wirkraummodell, zu entwickeln. Zur Beantwortung der dritten Forschungsfrage wird die Modellierung technischer Systeme mit Hilfe des Wirkraummodells zur Analyse hygiene-relevante Zusammenhänge in Kapitel 5 untersucht. Darauf aufbauend werden zur Unterstützung der Analyse unterschiedliche Methoden zur Identifizierung von hygiene-relevanten Schwachstellen erarbeitet. Die fünfte Forschungsfrage wird in Kapitel 6 beantwortet, indem Antworten auf die Frage der Beeinflussungsmöglichkeiten bei der Entwicklung hygienegerechter Produkte gegeben werden. Dabei sollen das Vorgehen, das als Analyse-Synthese-Prozess gesehen werden kann, sowie die Möglichkeiten zur Vermeidung oder Reduzierung hygiene-relevanter Schwachstellen aufgezeigt werden. Die gewonnen Erkenntnisse werden in Kapitel 7 durch Anwendung der Forschungsergebnisse am Beispiel eines Industrieprojekts evaluiert.

4 Zentrale Modelle der Arbeit

Das folgende Kapitel 4 thematisiert die Grundlagen zur Modellierung technischer Systeme im Rahmen der methodischen Produktentwicklung aufbauend auf dem Stand der Forschung aus Kapitel 2. Dabei wird zunächst als wichtiges Modell eine zweckmäßige Erweiterung der vorgestellten Prozessmodelle vorgestellt. Danach werden das Wirkraummodell, die wichtigen Modellelemente sowie der Zusammenhang von Wirkraummodell und Prozessmodell näher erläutert.

4.1 Zweck der Modellbildung

Modelle stellen die Realität bzw. real existierende Systeme auf einem bestimmten Abstraktionsniveau dar, mit dem Ziel das Wesentliche vom Unwesentlichen zu trennen und die Realität verständlicher darzustellen, vgl. Abschnitt 2.2.1.

Der Zweck des Prozessmodells in dieser Arbeit ist das Ermöglichen einer einheitlichen und durchgängigen Modellbildung technischer Produkte und Prozesse. Das Wirkraummodell dient dem Produktentwickler als entwicklungsbegleitendes Werkzeug, um in der Phase der Konzeptentwicklung und insbesondere in der Entwurfsphase während des Gestaltens die Analyse hygienerelevanter Schwachstellen zu ermöglichen und bei der Synthese hygienegerechter Produkte zu unterstützen. Dabei sollen insbesondere mit Hilfe des Prozessmodells und des Wirkraummodells Gestaltelemente des Produkts, die zum Erfüllen von Prozessen relevant sind, identifiziert und von Gestaltelementen, die zu hygienerelevanten Schwachstellen führen können, abgegrenzt werden.

Auftretende hygienerelevante Wechselwirkungen innerhalb des Produkts sowie zwischen Produkt und Prozessen sollen so mit Hilfe gebildeter Wirkraummodelle untersucht werden können. Zweck der Modellbildung ist das Ermöglichen einer systematischen Analyse technischer Systeme mit dem darauf aufbauenden Ziel, die Identifizierung von Schwachstellen der Produktgestalt hinsichtlich Hygieneaspekten zu ermöglichen. Das Wirkraummodell soll weiterhin das Ermitteln von Ansatzpunkten zur Reduktion möglicher Schwachstellen einer hygienegerechten Konstruktion erleichtern.

Aus dem Stand der Forschung und des Forschungsbedarfs geht hervor, dass Modelle zum Abbilden technischer Systeme existieren, diese jedoch das Abbilden hygienerelevanter Informationen nicht ermöglichen.

4.2 Prozessmodell

Zur Abbildung von Prozessen im Bereich hygienegerechter Produkte wird ein Modell benötigt, das technische Systeme im Zusammenwirken von Produkt und ausgeführtem Prozess darstellt. Das Modell soll folgenden Anforderungen gerecht werden:

- Darstellung und Beschreibung beabsichtigter und unbeabsichtigter Prozesse des technischen Systems im Produktlebenslauf.
- Abbildung unbeabsichtigter Wirkungen auf sämtliche Prozesselemente sowie deren Auswirkungen.
- Unterscheidung zwischen Elementen des technischen Produkts, die eine direkte, beabsichtigte Wirkung hervorrufen, und Elementen des technischen Produkts, die unbeabsichtigte Wirkungen auf Prozesselemente haben.
- Abbildung unbeabsichtigter Wirkungen auf Elemente des technischen Produkts sowie deren Auswirkungen.
- Differenzierte Abbildung von unbeabsichtigten Wirkungen zwischen Prozesselementen und Produktelementen.
- Darstellung unterschiedlicher zeitlicher Zustände eines Gesamtprozesses.

Die im Stand der Forschung beschriebenen Modelle erfüllen diese Anforderungen nur ungenügend oder lediglich teilweise, vgl. Abschnitt 2.2.2. Zwar erweitert FREUND bestehende Prozessmodelle um den Aspekt der ungewollten Zustandsänderungen, jedoch werden die davon ausgelösten *Auswirkungen* nicht eindeutig bestimmten Systemelementen zugewiesen.²³⁰ Neben dieser derzeit im Zuge der Analyse nicht abzubildenden Zuordnung von Elementen, die von unbeabsichtigten Zustandsänderungen betroffen sind, fehlt ebenso die Möglichkeit diejenigen Elemente des Systems zu bestimmen, die während der Synthese gezielt beeinflusst werden können. Entsprechend wird im Folgenden eine Erweiterung des Prozessmodells vorgestellt, die das eindeutige Herausstellen von Elementen, welche von unbeabsichtigten Zustandsänderungen betroffen sind, ermöglicht.

4.2.1 Prozesse und Verfahren im Prozessmodell

Technische Prozesse beschreiben in abstrakter Form die Transformation eines oder mehrerer Objekte innerhalb eines Zeitintervalls von einem Anfangs- in einen Endzustand. Dabei nehmen die zu transformierenden Objekte die passive Rolle des sogenannten *Operanden* ein, vgl. Abbildung 4.1.²³¹ Der Zustand von Objekten wird mit Hilfe seiner Eigenschaften zu einem bestimmten Zeitpunkt charakterisiert, wobei sich die Eigenschaften der Objekte zwischen Anfangs- und Endzustand des Prozesses in mindestens einer Ausprägung unterscheiden.²³² In dieser Arbeit wird zudem die Definition von GRAMLICH

²³⁰ Vgl. Freund (2018), S. 56-63.

²³¹ Vgl. Hubka (1984), S. 17-18.

²³² Vgl. Gramlich (2013), S. 63-64.

aufgegriffen, wonach Operanden ausschließlich stoffliche Systeme darstellen, wonach Energien und Signale per Definition nicht die Rolle des Operanden einnehmen können.²³³

Zur Transformation von Operanden in technischen Prozesse bedarf es geeigneter Wirkgrößen²³⁴, welche als Auslöser von Prozessen dienen und auf den Operanden (ein-)wirken. Beispiele für Wirkgrößen stellen während eines Milchaufschäumprozesses einerseits kinetische Energie zum Einbringen von Luftblasen und andererseits Wärmeenergie zur Stabilisierung des Schaums dar, die als Wirkgrößen während des Prozesses zum Aufschäumen benötigt werden. Ebenso können Größen vom Operanden während des Prozesses abgegeben werden, beispielsweise im Zuge von Kühlprozessen.²³⁵

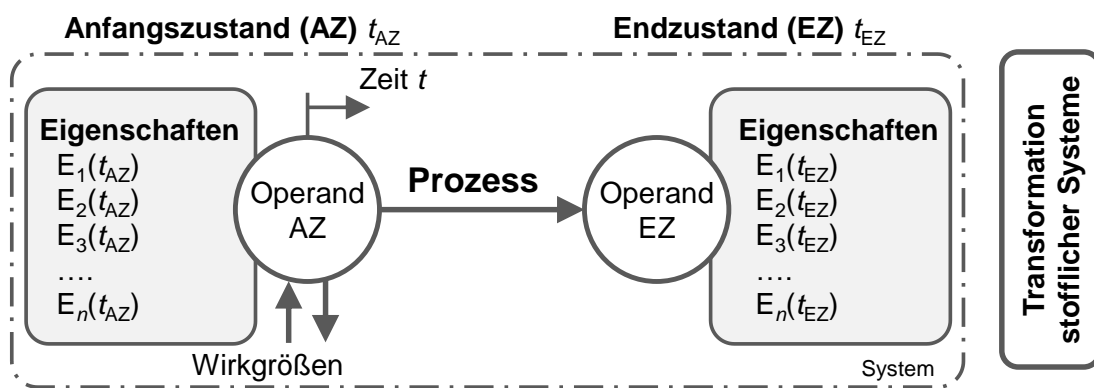


Abbildung 4.1: Prozess als Transformation stofflicher Objekte

Die Prozessdefinition dieser Arbeit greift die Definition von FREUND auf, wonach Prozesse neben beabsichtigten und zweckdienlichen Zusammenhängen auch unbeabsichtigte Zustandsänderungen verursachen.²³⁶ Beispielsweise treten während des Aufschäumprozesses neben der beabsichtigten Entstehung von Milchschaum auch unbeabsichtigte Prozesse in Form von Alterungs- oder Verschleißprozessen der Bauteile des Milchaufschäumers auf. Verallgemeinert führen unbeabsichtigte Prozesse zu mindestens einer unbeabsichtigten Eigenschaft des Operanden im Endzustand.

Neben Wirkgrößen, die innerhalb der Systemgrenze auf den Operanden wirken und die Transformation ermöglichen, können sogenannte Störgrößen von außen über die Systemgrenze auf den Operanden wirken. Wie Abbildung 4.2 zeigt, können Störgrößen durch stoffliches oder energetisches Einwirkung auf den Operanden zu Abweichungen des erwarteten Endzustands (Vergleich: „ohne Störgröße“ und „mit Störgröße“) des Prozesses führen.²³⁷

²³³ Angelehnt an die Definition der Thermodynamik stellen sie Prozessgrößen dar, vgl. Stephan et al. (2013), S. 7.

²³⁴ Vgl. Gramlich (2013), S. 62-63.

²³⁵ Vgl. Gramlich (2013), S. 66-67.

²³⁶ FREUND nennt diese Prozesse „ungewollt“, vgl. Freund (2018), S. 56-58.

²³⁷ Vgl. Mathias (2016), S. 46, Phadke (1986), S. 53 sowie Heidemann (2001), S. 102.

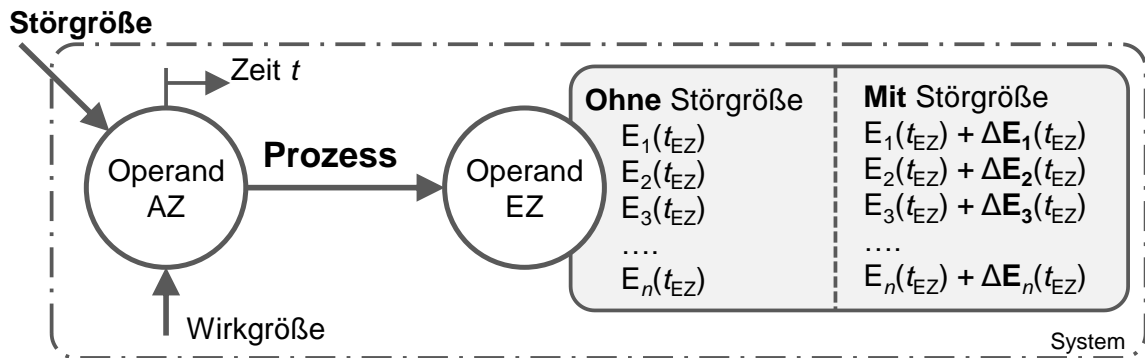


Abbildung 4.2: Auswirkungen von Störgrößen auf den Operanden

Die Konkretisierung der abstrakten Prozesse erfolgt durch *Verfahren*.²³⁸ Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Verfahren als definierte Aneinanderfolge von Operationen bezeichnet, die zur Realisierung der Transformation von stofflichen Systemen von einem Anfangs- in einen bestimmten Endzustand beitragen.²³⁹ Einem *Verfahrensprinzip* zugehörig sind alle Wirkelemente und -größen, die für die Realisierung der Transformation notwendig sind, wozu vornehmlich verfahrensprinziprelevante Wirkgrößen, Wirkflächen, Wirkkörper und Wirkräume gehören.

Verfahrensprinziprelevante Wirkelemente, deren Zustandsänderung in beabsichtigter Weise erfolgt, werden dem Operanden zugeordnet. Im Aufschäumprozess zählt zu den beabsichtigten Zustandsänderungen beispielsweise Änderung des Zustands der Milch. Dabei wird die in einem Wirkraum befindliche Milch durch Einwirken der Wirkgrößen des Milchaufschäumers in einen aufgeschäumten Zustand transformiert.

Demgegenüber existieren Wirkelemente, deren Zustandsänderung in unbeabsichtigter Weise erfolgt und daher dem sogenannten *Arbeitsmittel* bzw. dem *Operator* zugeordnet werden.²⁴⁰ Im Beispiel des Aufschäumprozesses sollen neben der Entstehung des Milchschaums idealerweise keine weiteren Wirkelemente verändert werden, wodurch alle Elemente des Milchaufschäumers dem Operator zugeordnet werden, da beispielsweise die Alterung des Milchaufschäumers unbeabsichtigt erfolgt.

Die eindeutige Differenzierung gemäß Abbildung 4.3 zwischen Wirkelementen, die eine beabsichtigte Transformation erfahren und daher definitionsgemäß dem Operanden zugeordnet werden, und Wirkelementen, deren Veränderungen unbeabsichtigt und nicht erwünscht sind und entsprechend dem Operator zugeordnet werden, stellt eine wesentliche Grundlage für diese Forschungsarbeit dar. Diese Definition ermöglicht im Folgenden im Zuge der Analyse die genaue Unterscheidung von Wirkelementen eines Systems hinsichtlich ihres Beitrags zu beabsichtigten und unbeabsichtigten Prozessen.

²³⁸ Vgl. Hubka (1984), S. 31; Sauer (2006), S. 74.

²³⁹ Vgl. Gramlich (2013), S. 86.

²⁴⁰ Vgl. Roos (2018), S. 56-58.

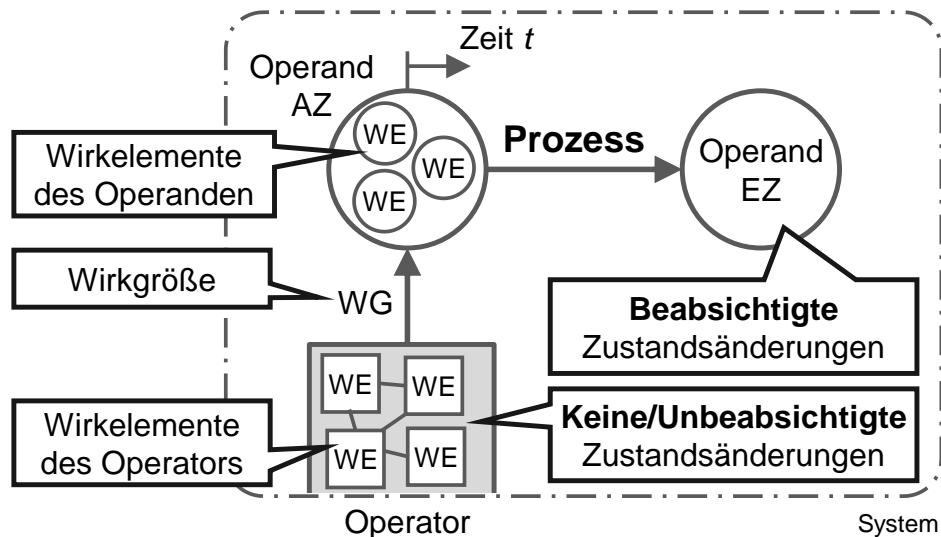


Abbildung 4.3: Elemente des Verfahrensprinzips

4.2.2 Funktionale Zusammenhänge im System

Die Existenz eines technischen Produkts begründet sich in dessen Zweck zur Erfüllung bzw. Bereitstellung eines Nutzens.²⁴¹ Die Bereitstellung der Funktion durch das technische Produkt ermöglicht die Erfüllung des Zwecks. Bei einem Milchaufschäumer wird beispielsweise erst durch die Transformation einer elektrischen Eingangsgröße in eine adäquate Ausgangsgröße in Form einer Bewegung des Quirls und der Bereitstellung einer Wärmeenergie, mit dessen Hilfe die Schaumentstehung verbessert wird, der eigentliche Zweck, d. h. die Herstellung von Milchschaum, erfüllt.

Der Begriff der *Produktfunktion* wird in der Literatur sehr unterschiedlich definiert. Angelehnt an die Beschreibungen aus Abschnitt 2.2.2 wird in dieser Arbeit eine Funktion als eine lösungsneutrale Beschreibung des kausalen Zusammenhangs zwischen Ein- und Ausgangsgrößen bezeichnet.²⁴² Wie in Abbildung 4.4 zu erkennen, transformiert das technische Produkt in Form des aktiven Operators²⁴³ Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen. Ein- und Ausgangsgrößen bei technischen Produkten werden im Rahmen dieser Arbeit als *Wirkgrößen* angesehen.²⁴⁴

²⁴¹ An dieser Stelle ist der Gebrauchsnutzen gemeint. Der Geltungsnutzen, der sich über den reinen Gebrauchsnutzen hinwegsetzt, dient zur Befriedigung des Geltungsbedürfnisses des Besitzers, vgl. Heidemann (2001), S. 21.

²⁴² Vgl. Pahl et al. (2007b), S. 121; VDI 2221 (1993), S. 40.

²⁴³ Vgl. Hubka (1984), S. 18 sowie Abschnitt 4.2.1.

²⁴⁴ Vgl. Gramlich (2013), S. 68; Rath (2015), S. 67-71; Heidemann (2001), S. 86.

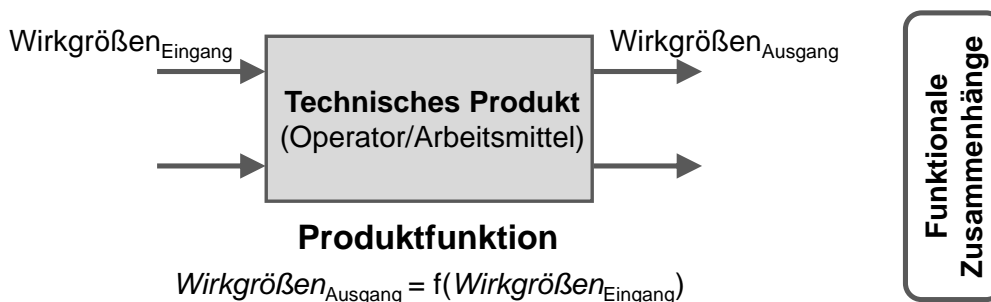


Abbildung 4.4: Produktfunktion als kausaler Zusammenhang von Eingangs- und Ausgangsgrößen in technischen Produkten

In dieser Arbeit wird zwischen (beabsichtigten) *Funktionen*, *Fehlfunktionen* und *Nicht-Funktionen* des Produkts unterschieden. Eine Fehlfunktion differenziert sich von der Funktion durch den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen, der sich auf Grund von Beobachtungen oder Messungen am *realen* Produkt beschreiben lässt und deren Abweichungen von der beabsichtigten Funktion unbeabsichtigt sind.²⁴⁵ Hierunter zählt beispielsweise die unbeabsichtigte Abgabe von Wärmeenergie des Milchaufschäumers an die Umgebung. Unter einer *Nicht-Funktion* wird eine nicht vorhandene Funktion verstanden, d. h. eine bestimmte, notwendige Funktion wird nicht erfüllt. Hierzu zählt beispielsweise die fehlende Funktion zur Verhinderung des Austretens von Lebensmittel.

Die beabsichtigte Gesamtfunktion eines Produkts gliedert sich oftmals in unterschiedlich viele Teilfunktionen²⁴⁶, deren Realisierung durch *physikalische Effekte* erfolgt.²⁴⁷ Diese elementaren physikalischen Erscheinungen sind qualitativ und quantitativ über Gleichungen oder Relationen der beteiligten Größen als Gesetzmäßigkeiten formulierbar.²⁴⁸ Die Konkretisierung von (Teil-)Funktionen über physikalische Effekte unter Festlegung geometrischer und stofflicher Eigenschaften führt zum *Wirkprinzip* des Produkts.²⁴⁹ Wie in Abbildung 4.5 zu erkennen, beinhaltet das Wirkprinzip wie das Verfahrensprinzip Wirkelemente, in Form von Wirkflächen, Wirkkörpern, Wirkräumen und -bewegungen²⁵⁰, die für die Erfüllung des kausalen Zusammenhangs von Eingangs- und Ausgangsgrößen des technischen Produkts vonnöten sind und über ihre Eigenschaften charakterisiert werden.²⁵¹

Durch die Gestalt wird die Produktfunktion über zugrundeliegende physikalische Effekte und Wirkprinzipien schließlich vollends konkretisiert. Die Gestalt bildet die unterste und

²⁴⁵ Vgl. Birkhofer, Kloberdanz (2017), S. 65.

²⁴⁶ Vgl. Pahl et al. (2007b), S. 121.

²⁴⁷ Effekte können auch chemischer oder biologischer Natur sein, vgl. Pahl et al. (2007b), S. 142f.

²⁴⁸ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 445; Ponn, Lindemann (2008), S. 82.

²⁴⁹ Vgl. Koller (1998), S. 191.

²⁵⁰ Vgl. Ponn, Lindemann (2008), S. 79.

²⁵¹ Vgl. Gramlich (2013), S. 79.

konkreteste Ebene der Produktmodellierung, in der Wirkelemente mittels Gestaltelementen geometrisch und werkstofflich umgesetzt werden.²⁵²

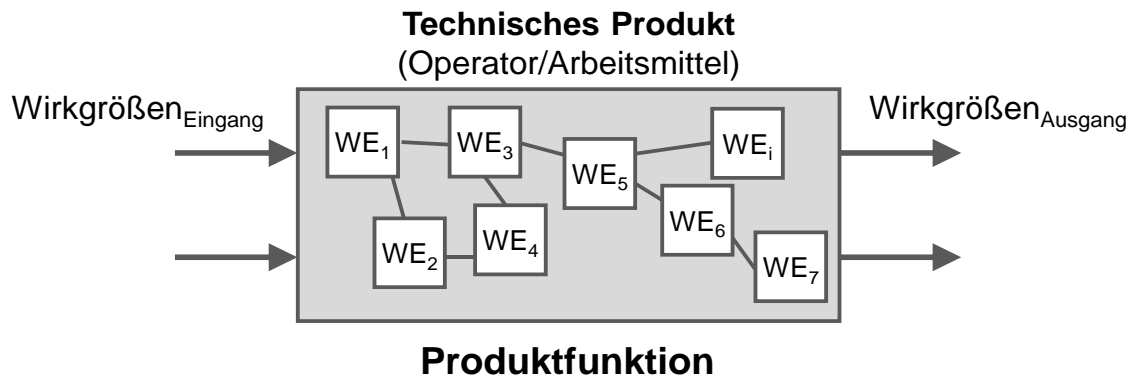


Abbildung 4.5: Wirkelemente technischer Produkte²⁵³

4.2.3 Modellierung technischer Systeme

Die Partialmodelle aus Abschnitt 4.2.1 und Abschnitt 4.2.2 lassen sich durch übereinstimmende Modellelemente in Form von Wirkelementen über die Wirkgröße als geeignete Schnittstelle zusammenführen, sodass der Zusammenhang zwischen Operand und Operator hergestellt wird.²⁵⁴ Der Zweck des Operators ist demnach die Bereitstellung einer Wirkgröße, wobei hierfür Eingangswirkgrößen in geeignete Ausgangswirkgrößen transformiert werden, die zu einer beabsichtigten Transformation des Operanden innerhalb des Prozesses führen.

Anschaulich lässt sich der Zusammenhang zwischen Operator und Operanden mit Hilfe des vorherigen Aufschäumprozesses beschreiben. Der gewünschte Milchschaum kann nur entstehen, wenn der Operator mit geeigneten, also probaten, Wirkelementen für den speziellen Anwendungszweck, existiert und eingesetzt wird. Die Milch stellt gemäß Abbildung 4.6 den passiven Operanden dar, der im Anfangszustand zunächst unaufgeschäumt vorliegt und im Endzustand schließlich den beabsichtigten Aufschäumgrad aufweist. Als Operator dient in diesem Beispiel ein automatischer Milchaufschäumer mit Quirl. Zur Erzeugung des Milchschaums transformiert der Milchaufschäumer eine elektrische Eingangswirkgröße in eine Rotationsbewegung des Quirls und einer Wärmeenergie, die durch den Behälter in die Milch geleitet wird. Nach Anschalten des Milchaufschäumers wird mit Hilfe der beschriebenen Wirkgrößen der Aufschäumprozess initiiert und beendet, wenn der Prozess beispielsweise durch die Steuerung unterbunden wird.

²⁵² Vgl. Wäldele (2012), S. 33; Ponn, Lindemann (2008), S. 124.

²⁵³ In Anlehnung an Gramlich (2013), S. 86.

²⁵⁴ Vgl. Heidemann (2001), S. 76-78; Gramlich (2013), S. 71-72.

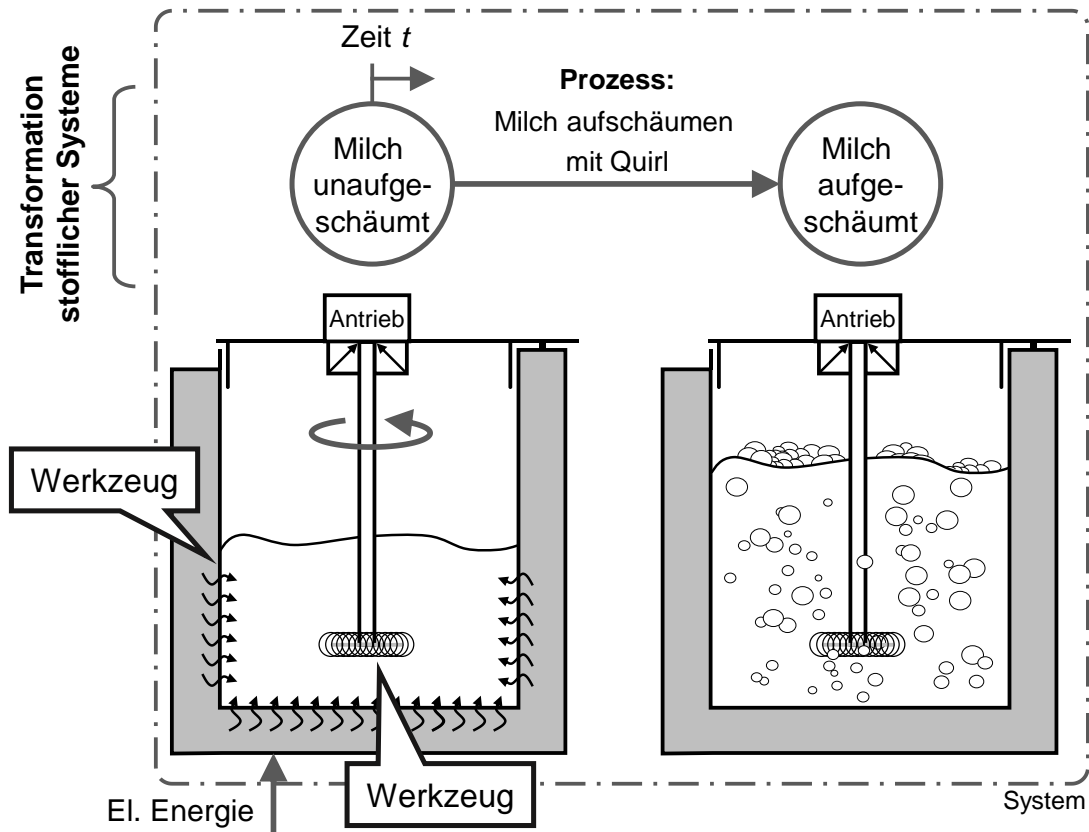


Abbildung 4.6: Beispielhafter Aufschäumprozess im Prozessmodell

Wie bereits in Abschnitt 4.2.1 erläutert, stellen Wirkelemente, die dem Verfahrensprinzip zugehörig sind und keine beabsichtigte Transformation erfahren, verfahrensprinziprelevante Wirkelemente des Operators dar. Diese Wirkelemente werden im Zuge dieser Arbeit auch *Werkzeug* genannt. Im Beispiel des Aufschäumprozesses stellen Quirl und Behälter Werkzeuge dar. Wirkelemente, die dem Verfahrensprinzip nicht zugehörig sind, aber für die Transformation der Eingangswirkgröße im Operator in eine für das Verfahrensprinzip relevante Wirkgröße vonnöten sind, stellen die Restwirkstruktur des Operators dar.

Neben beabsichtigten Änderungen des Operanden finden sich in realen Systemen, wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, auch *unbeabsichtigte Prozesse*, beispielsweise in Form von Alterungs-, Verschleiß-, Leckage- oder Anhaftungsprozessen, deren Ursache Fehl- oder Nicht-Funktionen darstellen.

Unbeabsichtigte Prozesse sind insbesondere an den Wirkelementen des Operanden unerwünscht. Im Falle des Milchaufschäumers betrifft dies insbesondere das Anhaften sowie das unerwünschte Austreten von Milch aus dem System. Die Behälterwand steht im direkten Kontakt mit der Milch und wird durch sie benetzt. Durch den Wärmeeintrag in die Milch über die Behälterwand gerinnen die in der Milch enthaltenen Proteine, wodurch sich eine Art „Haut“ bildet, welche an der Behälterwand haften bleiben kann. Hierdurch wird

der Milchaufschäumer unbeabsichtigt verschmutzt, welches die Basis einer Kontamination darstellt. Weiterhin besteht das Risiko einer unbeabsichtigten Leckage der aufgeschäumten Milch, da zwischen dem Wirkraum des Behälters und der Umgebung keine Bauteile vorgesehen sind, die ein Austreten verhindern können. In beiden Fällen, dem Anhaften und der Leckage, sind fehlende Funktionen, wie beispielsweise eine Dichtfunktion oder eine „Anti-Haft“-Funktion die Ursache der unbeabsichtigten Prozesse. Die Funktionserfüllung, d. h. die Bereitstellung von kinetischer sowie thermischer Energie, ist unter Umständen weiter möglich, jedoch resultieren aus unbeabsichtigten Prozessen ungenügende Endzustände wie beispielsweise eine Kontamination des Operanden.

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass, bedingt durch Fehl- oder Nicht-Funktionen, unbeabsichtigte Prozesse innerhalb des Operanden zu einer Abweichung der beabsichtigten Funktion führen können, sodass das technische Produkt für den beabsichtigten Prozess nicht mehr zweckdienlich ist. Eine Differenzierung der Ursachen unbeabsichtigter Prozesse soll als Basis für die Analyse dienen und führt im Weiteren dazu, dass Maßnahmen zur Beherrschung der unbeabsichtigten Prozesse erkannt und zielgerichtet umgesetzt werden können.

Abbildung 4.7 zeigt die für diese Forschungsarbeit relevante Einteilung der Ursachen unbeabsichtigter Prozesse. Demnach lassen sich Störgrößen unterscheiden in Störgrößen, die auf den Operanden wirken, (Störgrößen I, Abbildung 4.7) und Störgrößen, die auf den Operator wirken (Störgrößen II, Abbildung 4.7).²⁵⁵ Als Nebengrößen werden diejenigen Größen bezeichnet, die zum einen durch den beabsichtigten Prozess vom Operanden auf die Systemumgebung wirken (Nebengrößen I, Abbildung 4.7), zum anderen durch die Transformation von Ein- und Ausgangsgrößen entstehen und auf die Umgebung wirken (Nebengrößen II, Abbildung 4.7).²⁵⁶ Jedoch gilt hierbei zu beachten, dass die in Abbildung 4.7 dargestellten Ursachen unbeabsichtigter Prozesse erst durch die Existenz von Fehl- oder Nicht-Funktionen Auswirkungen auf die Systemelemente haben.

Während des beispielhaften Aufschäumprozesses entsteht Milchschaum, welcher durch fehlende Dichtungen aus dem System ausdringen kann, mit der Umgebung interagiert und daher definitionsgemäß als Nebengröße bezeichnet wird. Auch von dem Milchaufschäumer selbst gehen Nebengrößen in Form von Schallemissionen sowie Abwärme des Elektromotors aus und wirken auf die Systemumgebung ein.

²⁵⁵ Vgl. Heidemann (2001), S. 102-105.

²⁵⁶ Vgl. Heidemann (2001), S. 106-110.

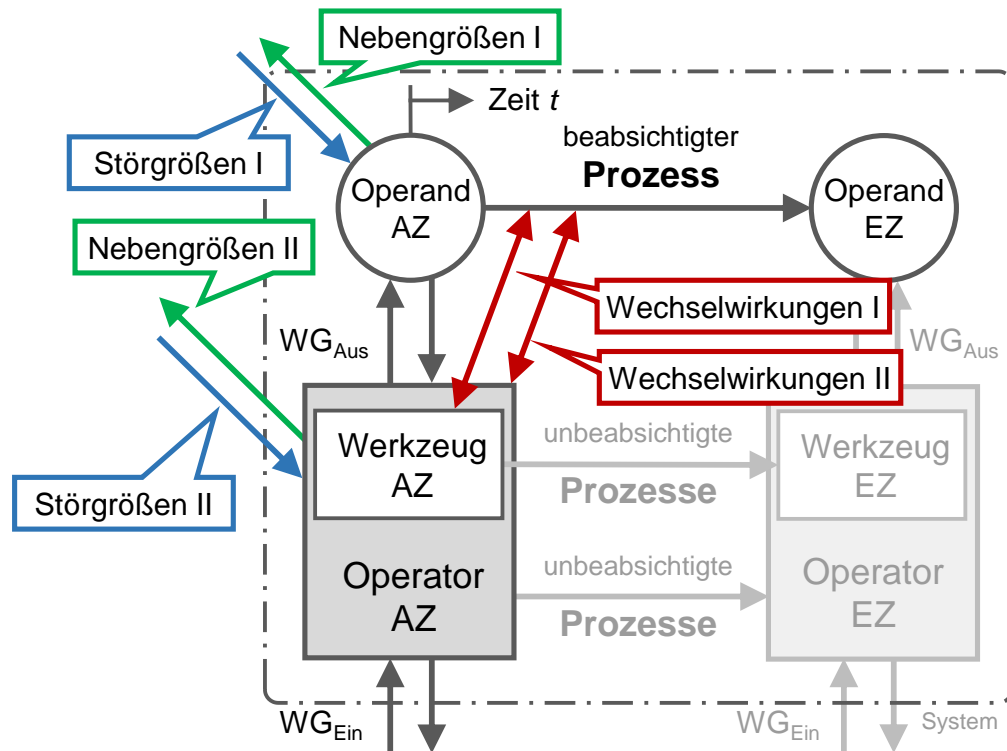


Abbildung 4.7: Störgrößen, Nebengrößen und Wechselwirkungen als Ursachen für unbeabsichtigte Prozesse

Neben den unerwünschten Zusammenhängen zwischen systeminternen Elementen und der Systemumgebung, können während des Prozesses zwischen Operanden und dem Operator unerwünschte Wechselwirkungen²⁵⁷ auftreten.²⁵⁸ Dabei werden in dieser Arbeit zwischen Wechselwirkungen von Werkzeug und Operand (Wechselwirkungen I, Abbildung 4.7) sowie Wechselwirkungen der Operator-Restwerkstruktur und des Operanden (Wechselwirkungen II, Abbildung 4.7) differenziert. Die Unterscheidung stellt die Basis für die Beurteilbarkeit der auftretenden Wechselwirkungen hinsichtlich ihrer Vermeidbarkeit dar.

Am Beispiel des Milchaufschäumers lässt sich der wesentliche Kern von Wechselwirkungen verdeutlichen. Während des Aufschäumprozesses befindet sich der Quirl innerhalb der Milch, wodurch ein Anhaften des Lebensmittels an der Werkzeugoberfläche möglich, aber nicht beabsichtigt ist. Auf Grund des Verfahrensprinzips ist ein Verlagern des Quirls in Bereiche außerhalb der Milch nicht möglich – der Aufschäumprozess würde nicht in der Transformation der Milch resultieren. Daher gilt es entgegenwirkende Maßnahmen zur Vermeidung des dauerhaften Anhaftens zu finden, beispielsweise durch nachfolgende Reinigungsprozesse oder durch Beschichtungen der Quirl-Oberfläche.

²⁵⁷ Die Bedeutung des Begriffs „Wechselwirkung“ in dieser Arbeit ist an das *Actio-Reactio-Prinzip* von Matthiesen (2002) angelehnt. Wechselwirkungen umfassen jedoch stets *unbeabsichtigte* Wirkungen zwischen Operator und Operand.

²⁵⁸ Vgl. Rath (2015), S. 72-73.

Auf Basis der entwickelten Erweiterung des Prozessmodells ist eine detailliertere Differenzierung zwischen beabsichtigten und unbeabsichtigten Prozessen sowie der Auswirkungen von unbeabsichtigten Prozessen, welche sich durch Abweichungen der Elementeneigenschaften widerspiegeln, möglich. Als Ursache für unbeabsichtigte Prozesse werden Stör- und Nebengrößen sowie Wechselwirkung klar voneinander abgegrenzt, wodurch qualitative und quantitative Aussagen im Zuge von Analysevorgängen erreicht werden sollen. Weiterhin wird herausgestellt, dass die Systemelemente *Operand* und *Operator* mit Hilfe von *Wirkelementen* beschreibbar sind. Hierbei wird zwischen Interaktionen von Wirkelementen des Werkzeugs und der Restwirkstruktur innerhalb des Operators als Beitrag zur Funktionserfüllung und Interaktionen zwischen Werkzeug und Operand im Zuge des beabsichtigten Transformationsprozesses unterschieden. Die Auswirkungen unbeabsichtigter Prozesse, die durch Stör- und Nebengrößen sowie Wechselwirkungen ausgelöst werden, lassen sich mit Hilfe der Erweiterungen des Prozessmodells als Abweichungen der beabsichtigten Eigenschaften²⁵⁹ der Wirkelemente manifestieren, vgl. Abbildung 4.8.²⁶⁰

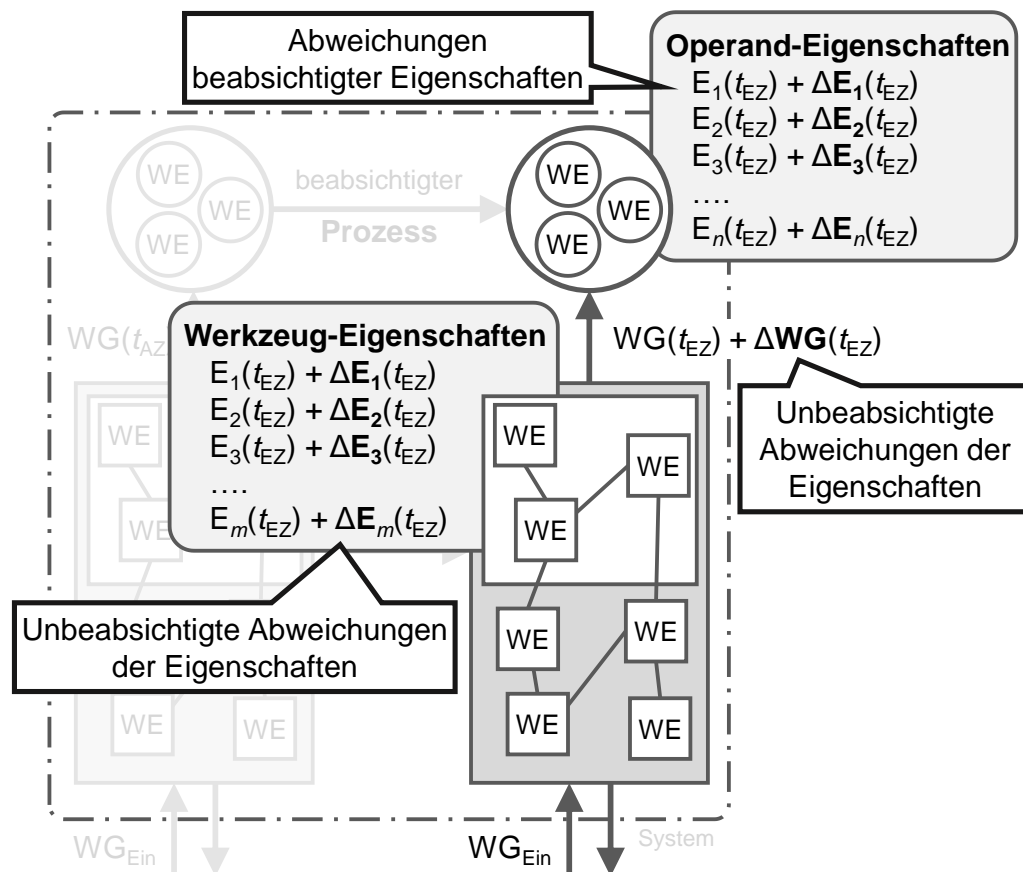


Abbildung 4.8: Auswirkungen von Stör- und Nebengrößen sowie Wechselwirkungen auf die Eigenschaften der Wirkelemente im Endzustand des Prozesses

²⁵⁹ Detaillierte Erläuterungen zu beabsichtigten Eigenschaften finden sich in Suh (1998), S. 204; Meboldt (2008), S. 155-157; Gramlich (2013), S. 119-120.

²⁶⁰ Vgl. Beetz, Kloberdanz (2016), S. 215-216; Beetz et al. (2017), S. 86.

4.3 Wirkraummodell

Neben dem *Prozessmodell* zur Abbildung und Analyse von Elementen des Produkts und des Prozesses werden für die Entwicklung von Produkten *Produktmodelle* benötigt. Der folgende Abschnitt thematisiert das sogenannte Wirkraummodell, welches ein zweckmäßiges Produktmodell für die Entwicklung *stoffverarbeitender Systeme*²⁶¹ darstellt. Es ergänzt das Contact & Channel Modell, welches *funktionale und gestalterische Elemente* einer Konstruktion verbindet, und dient zur Unterstützung bei der Analyse sowie der Gestaltsynthese hygienegerechter Produkte.²⁶² Mit Hilfe des Wirkraummodells ist es nunmehr möglich, *Nicht-Funktionen*, vgl. Abschnitt 4.2.2, bei Produkten zu erkennen, da diese hinsichtlich einer hygienegerechten Gestalt der maßgebliche Grund für das Wirken von Stör- und Nebengrößen sowie Wechselwirkungen darstellen und für Kontamination verantwortlich sind.

4.3.1 Elemente des Wirkraummodells und Definitionen

Oftmals werden in der Produktentwicklungsforschung²⁶³ gleichen Begriffen unterschiedliche Definitionen zugeordnet. Dies führt zu einem heterogenen Begriffsverständnis, so dass an dieser Stelle zunächst das Verständnis elementarer Begriffe des Wirkraummodells herausgestellt werden soll.²⁶⁴

Die Realisierung von Funktionen in technischen Produkten erfolgt über *Wirkungen* bzw. über *Wirkgrößen*²⁶⁵ wobei die Vorsilbe „Wirk-“ betont, dass die Elemente mit der Erfüllung einer *Wirkung*, d. h. der Realisierung eines physikalischen Effekts, im Zusammenhang stehen.²⁶⁶ Wirkungen finden stets im Zusammenhang von „Partnern“ statt, zwischen denen auf physikalischen Effekten basierende Wirkungen stattfinden, vgl. Abschnitt 4.2.2. Jede Wirkung („*actio*“) geht daher mit einer Rückwirkung („*reactio*“) einher.²⁶⁷

Wirkflächen sind gemäß der Definitionen von MATTHIESEN stets Oberflächen fester Körper oder Oberflächen bzw. Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern.²⁶⁸ Jeder

²⁶¹ Technische Systeme können gemäß der *Art des Operanden* unterschiedenen werden. Dabei stehen bei vielen Produktmodellen Kraftleitungssysteme (bzw. energieverarbeitende Systeme) im Fokus, vgl. Hubka (1984), S. 95.

²⁶² Vgl. Beetz et al. (2018), S. 989-991.

²⁶³ Darunter fallen besonders Werke der Konstruktionswissenschaft und der Konstruktionsmethodik.

²⁶⁴ Das bedeutet nicht, dass die Definitionen anderer Autoren falsch sind. Vielmehr sind die Begriffe historisch gewachsen, übersetzungsbedingt verschieden oder wurden zweckmäßig für den jeweiligen Schwerpunkt angepasst.

²⁶⁵ Vgl. Ersoy (1975), S. 10; Matthiesen (2002), S. 53.

²⁶⁶ Vgl. Pahl et al. (2007a), S. XV.

²⁶⁷ Vgl. Matthiesen (2002), S. 52-53.

²⁶⁸ Vgl. Matthiesen (2002), S. 49.

Energie-, Stoff oder Signalfloss eines Systems erfolgt über *Wirkflächen*. Für die Realisierung einer Wirkung muss ein Kontakt zwischen zwei Wirkflächen, ein *Wirkflächenpaar* (WFP), gebildet werden, welches jedoch nur existiert, solange die beteiligten Wirkflächen in Kontakt stehen. Oberflächen fester Körper, Oberflächen bzw. Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die nie an einer Wirkung beteiligt sind, werden als Begrenzungsflächen bezeichnet.²⁶⁹

Wirkräume stellen abgegrenzte Volumen dar, die über ihre Eigenschaften charakterisiert werden und im Gegensatz zu Wirkflächenpaaren zeitbeständig sind, d. h. nicht nur während eines Energie-, Stoff- oder Signalflosses existieren. Der Inhalt von Wirkräumen kann mit verschiedenen Materialien gefüllt sein. Für den Fall, dass Wirkräume festkörpergefüllt sind, wird der Inhalt auch *Wirkkörper* genannt.²⁷⁰ Zum Finden bzw. Definieren von Wirkräumen in Systemen gilt es, abgegrenzte Volumina zu identifizieren, deren Inhalte sich hinsichtlich bestimmter Eigenschaften ähnlich verhalten. Die jeweiligen zugrundeliegenden Eigenschaften hängen von dem Zweck der Modellbildung ab. Oftmals besitzt der Inhalt eines Wirkraums gleiche bzw. vergleichbare Zustandseigenschaften (bspw. Temperatur, Druck), Materialeigenschaften (bspw. Dichte) oder sind geometrisch beispielsweise einem Bauteil zugehörig.

Funktionen technischer Systeme werden grundsätzlich durch mindestens zwei Wirkflächenpaare sowie einer verbindenden *Leitstützstruktur* (LSS), welche die eine Leistung von Stoff, Energie oder Signalen ermöglicht, realisiert, vgl. Abschnitt 2.2.2.²⁷¹

Abbildung 4.9 zeigt den Ausschnitt eines Einrohrdämpfers aus dem Automobilbereich, welcher zur Erläuterung seiner Funktionsweise in verschiedene Wirkräume aufgeteilt ist. In den Öl-Wirkräumen befindet sich ein inkompressibles Fluid²⁷², wohingegen der Gasraum mit einem kompressiblen Fluid gefüllt ist. Zur Verhinderung der Gasblasenbildung in den Öl-Wirkräumen ist das System auf einen Druck von ca. 20-30 bar vorgespannt.²⁷³ Bei dem dargestellten Einfahrprozess der Kolbenstange wird sowohl der Arbeitskolben, als auch der bewegliche Trennkolben bewegt, wodurch der Druck in beiden Räumen zunimmt.

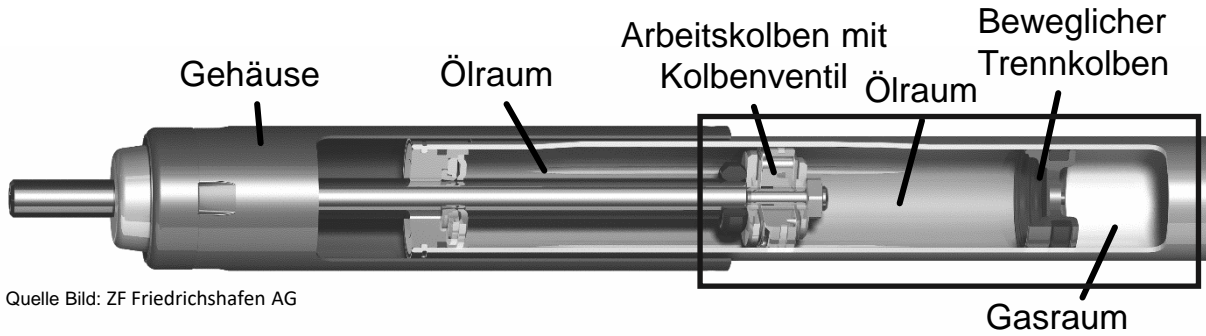
²⁶⁹ Vgl. Matthiesen (2002), S. 49-50.

²⁷⁰ Vgl. Rodenacker, Claussen (1973), S. 52-54.

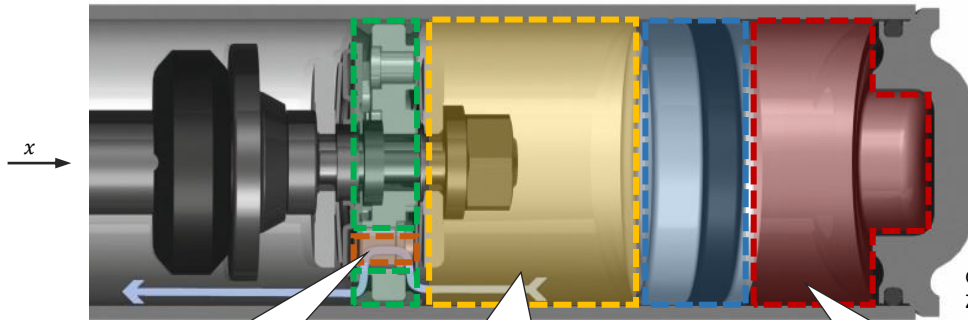
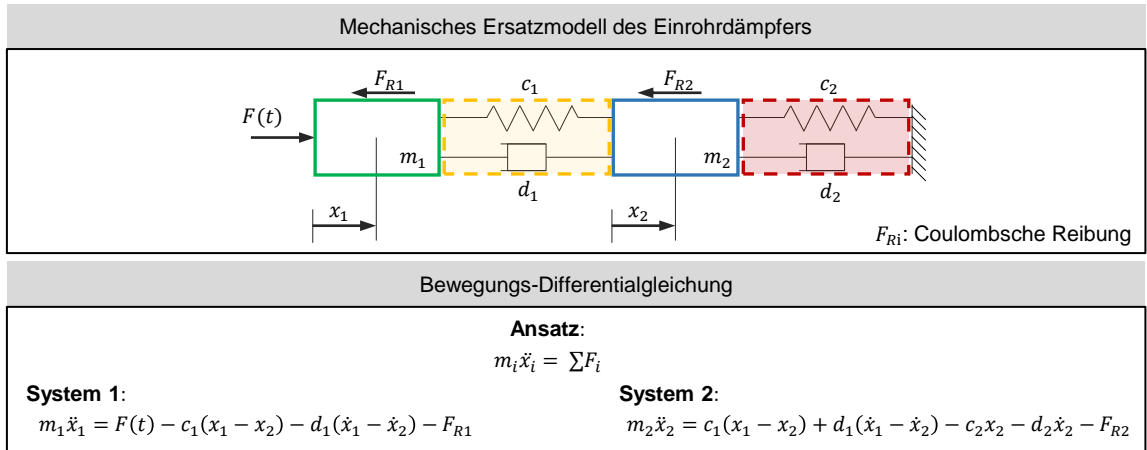
²⁷¹ Im erweiterten Ansatz, dem C&C²-Ansatz, existieren neben den LSS und WF auch sogenannte Connectoren (C), welche wirkungsrelevante Eigenschaften außerhalb des betrachteten Systemausschnitts integrieren und bilden mit Hilfe einer repräsentativen Wirkfläche die Anbindung zur funktionsrelevanten Systemumgebung, vgl. Matthiesen (2019).

²⁷² Vgl. Will, Gebhardt (2011), S. 20-21.

²⁷³ Vgl. Groß et al. (2017), S. 493-494.



Quelle Bild: ZF Friedrichshafen AG



Quelle Bild: ZF Friedrichshafen AG

<p>Wirkraum: Bohrung inkompressibles, newtonsches Fluid, isotherm, Flüssigkeitsdämpfer → $c_1 = 0$</p> <p>Massenerhaltung: $\frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla \cdot v) \rightarrow 0 = \frac{\partial v_x}{\partial x}$</p> <p>Impulserhaltung: $\frac{\partial}{\partial t} \rho v = -[\nabla \cdot \rho v v] - \nabla p - [\nabla \cdot \tau] + \rho g$</p>	<p>Wirkraum: Ölraum Inkompressibles Fluid, isotherm → Flüssigkeitsdämpfer, Kompensation durch Gas</p> <p>Massenerhaltung: $\frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla \cdot v) \rightarrow 0 = \frac{\partial v_x}{\partial x}$</p> <p>Impulserhaltung: $\frac{\partial}{\partial t} \rho v = -[\nabla \cdot \rho v v] - \nabla p - [\nabla \cdot \tau] + \rho g$</p>	<p>Wirkraum: Gasraum Kompressibles Fluid, isotherm → Gasfeder → $d_2 = 0$</p> <p>Allgemeine Gasgleichung: $p \cdot V = n \cdot R_m \cdot T \rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1}$</p> <p>Geometrische Zusammenhänge: $V_2 = V_1 - \Delta V$; $A_2 = A_1 = const.$</p> <p>Mechanische Zusammenhänge: $dF_n = -p dA$</p>
<p>Viskose Reibung → Dämpfungsanteil</p>		<p>Elastisches Verhalten</p>

Abbildung 4.9: Wirkräume und Bewegungsgleichung eines Einrohrdämpfer (Ausschnitt)

Während des Einfahrprozesses gleicht der Gas-Wirkraum zum einen das Volumen der durch die Kolbenstange verdrängte Ölmenge mittels Kompression aus, zum anderen wird durch den Gas-Wirkraum auch die durch Wärmeentwicklung hervorgerufene Ausdehnung des Öls ausgeglichen. Während der Einfahrbewegung des Arbeitskolbens wird die

Dämpfung des Systems durch Verdrängen von Öl aus dem Öl-Wirkraum durch die Bohrung des Arbeitskolbens erreicht.²⁷⁴ Alle genannten Wirkraum-Inhalte stehen über Wirkflächenpaare in Kontakt, wodurch einerseits die auftretenden Kräfte geleitet und andererseits die notwendigen Fluid- bzw. Temperaturströme ermöglicht werden.

Funktionsbestimmend und verantwortlich für die Charakteristik des Systems sind die *Eigenschaften der beteiligten Wirkelemente*, welche in Abbildung 4.9 mit Hilfe von Zustandsgleichungen beschrieben werden. Die Gleichungen verdeutlichen, dass die federnde Eigenschaft des Systems auf die Kompressibilität des Gas-Wirkraums zurückzuführen ist. Weiterhin spielt der Anteil COULOMBScher Reibung bei derartigen Dämpfern eine wesentliche Rolle, welche insbesondere an den Dichtflächen beteiligter Körper mit Relativbewegungen auftritt und durch Festlegungen von Materialeigenschaften (Werkstoff, Oberflächenbeschaffenheit) und Geometrieeigenschaften (Form, Durchmesser, Länge) beeinflusst wird. Die dämpfende Eigenschaft des Einrohrdämpfers wird hingegen durch viskose Reibung im Bohrungs-Wirkraum erreicht und hängt von den in Abbildung 4.9 beschriebenen Einflussfaktoren ab.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass das Wirkraummodell auf den in Abbildung 4.10 dargestellten Modellelementen basiert. Während der Funktionserfüllung sind die Inhalte der Wirkräume über Wirkflächenpaare miteinander gekoppelt und Wirkungen zwischen den Wirkräumen werden über die beteiligten Wirkflächen realisiert. Zur quantitativen Beschreibung können, wie in Abbildung 4.9 gezeigt, beispielsweise Bilanz- und Zustandsgleichungen bei der Analyse von Systemen unterstützen.

- **Wirkräume:** Stellen abgegrenzte Volumina dar, die über ihre Eigenschaften charakterisiert werden und im Gegensatz zu Wirkflächenpaaren zeitbeständig sind. Inhalte der Wirkräume stellen beispielsweise Wirkkörper dar, welche mindestens zu einem Zeitpunkt durch Beteiligung an Wirkungen zur Funktionserfüllung beitragen. Bestimmte Wirkraumflächen (WRF) fallen im Zuge einer Funktionserfüllung mit den Wirkflächen der beteiligten Wirkelemente zusammen.
- **Wirkkörper:** Sind Wirkräume festkörpergefüllt wird der Inhalt *Wirkkörper* genannt.
- **Wirkflächen:** Sind stets Oberflächen fester Körper oder Oberflächen bzw. Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern. Energie-, Stoff oder Signalflüsse eines Systems erfolgen über Wirkflächen.
- **Alle Modellelemente** sind durch ihre *Eigenschaften* charakterisiert und lassen sich darüber hinaus mittels geeigneter Gleichungen beschreiben. Die Eigenschaften der Elemente sind für die Erfüllung der Funktion, Fehlfunktionen und Nicht-Funktionen des Systems maßgebend.

²⁷⁴ Vgl. Kirchner, Birkhofer (2017), S. 299-300.

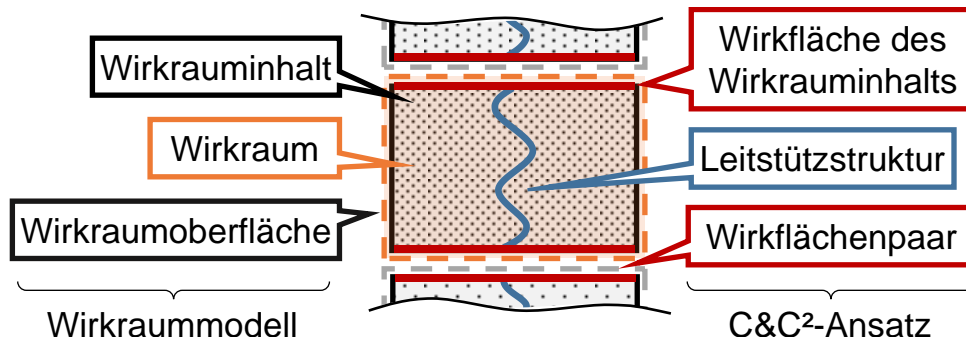


Abbildung 4.10: Elemente des Wirkraummodells und des C&C²-Ansatzes während einer beispielhaften Funktionserfüllung

Für die Aufteilung eines Systems in Wirkräume gilt zu beachten, dass ein Wirkraum geschlossen sein muss, d. h. dass die Vereinigung aller einzelnen Wirkraumflächen eines Wirkraums der gesamten Wirkraumoberfläche entsprechen muss. Weiterhin dürfen zur eindeutigen Zuweisung von Interaktionen zwischen Inhalten der Wirkräume keine Überschneidungen der Wirkflächen existieren, sodass für beide Annahmen bei einer Gesamtanzahl von n Wirkraumflächen eines Wirkraums gelten muss:

$$\bigcup_{i=1}^n A_{\text{WRF},i} = A_{\text{WRF,ges}} \quad \text{und} \quad \bigcap_{i=1}^n A_{\text{WRF},i} = \emptyset.$$

Das Wirkraummodell ermöglicht die Abbildung von Wirkelementen des Prozessmodells aus Abschnitt 4.2 und erlaubt eine detaillierte Aussage über den Wirkzusammenhang der Elemente des technischen Systems²⁷⁵. Es stellt insbesondere die Grundlage für die Entwicklung von Systemen dar, bei denen nicht nur die gewollte Funktionserfüllung von beispielsweise einer Kraftleitung im Fokus steht, sondern darüber hinaus die Analyse von Nicht-Funktionen bei Stoffstromsystemen im Zuge der Entwicklung hygienegerechter Produkte sicherstellen soll.

4.3.2 Eigenschaften des Wirkraummodells und der Modellelemente

Mit Hilfe des Wirkraummodells wird genau ein Zustand, also ein Zeitpunkt, eines Prozesses und der beteiligten Elemente dargestellt. Zeitliche Abfolgen, d. h. zeitlich aufeinanderfolgende Zustände, werden in unterschiedlichen Modellen dargestellt. Die Wirkraummodellierung eines Systems geschieht stets zweckorientiert und nie zum Selbstzweck. Daher ist die notwendige *Granularität* sowie die Wahl der *Systemgrenze* dem Anwender der Modellbildung überlassen und hängt stark von dessen Erfahrung, der Komplexität des Systems und der Aufgabe sowie insbesondere von dem Ziel der Modellbildung ab.

Das in Abbildung 4.11 dargestellte Beispiel zeigt einen Ausschnitt einer Welle inklusive geschmierter Wälzlagerung, das zur Umgebungsluft mit Hilfe eines Radialwellendicht-

²⁷⁵ Siehe Abschnitt 4.2.3, Abbildung 4.8.

rings gedichtet wird. Die Aufteilung des Systems in Wirkräume ist abhängig von der Zielsetzung der Modellbildung.²⁷⁶ Besteht der Fokus auf der Untersuchung, ob ein Austreten des Schmiermediums aus dem Gehäuse in die Umgebung verhindert wird, ist die Modellierung in Abbildung 4.11a in ausreichendem Maße dargestellt. Gilt es jedoch die genaue Funktion und ein potentiell mögliches Austreten aus der Dichtung zu untersuchen, ist eine detaillierte Granulierung, wie beispielsweise in Abbildung 4.11c vorteilhafter.²⁷⁷

Die Modellierungen in Abbildung 4.11b und Abbildung 4.11c beziehen die Gestalt der Dichtung mit ein. Es zeigt sich, dass der Wirkraum 'Dichtkrafteerhöhung' zu einer erhöhten Dichtkraft in Radialrichtung beiträgt, sofern im Inneren des Systems ein höherer Druck vorherrscht als in der Umgebung. Weiterhin zeigt die Analyse der detaillierten Gestalt des Radialwellendichtrings, dass der Wirkraum 'Förderung' die Schleppestromung des Schmiermittels nach Innen durch Zusammenwirken mit angrenzenden Wirkräumen ermöglicht. Der Inhalt des Wirkraums 'Kapillare' verhindert das Austreten von Schmierstoff durch eine Art entgegengesetzter Pumpwirkung auf Basis des Kapillareffekts in Zusammenwirken mit den Inhalten angrenzender Wirkräume.²⁷⁸

Neben der beabsichtigten Funktion des Dichtens ermöglicht das Wirkraummodell jedoch auch Nicht-Funktionen, d. h. das Fehlen einer Funktion zu analysieren. Ist das Wirkflächenpaar zwischen der Dichtlippe des Radialwellendichtring und der Welle über den Umfang gemäß Detail A der Abbildung 4.11c nicht komplett geschlossen, z. B. durch ein Fremdpartikel zwischen Dichtlippe und Welle, vgl. Abschnitt 1.1, besteht das Potential einer Leckage, da genau an der Stelle die Funktionserfüllung des Dichtens *nicht* gewährleistet wird. Erkennbar wird das Potential der Leckage durch den direkten Kontakt der Wirkraumflächen von Schmierstoff und Umgebung.

Elemente des Wirkraummodells, vgl. Abschnitt 4.3.1, lassen sich durch ihre *Elementeigenschaften* sowie *Eigenschaften des Verhältnisses* von Wirkraumelementen, d. h. über ihre Topologie²⁷⁹ sowie der Anordnung²⁸⁰ zueinander, beschreiben.

²⁷⁶ Dynamische Dichtungen sind ein äußerst komplexes Thema, welche durch eine Vielzahl überlagerter Effekte funktionieren. Details finden sich dazu u. a. in Kirchner, Birkhofer (2017), S. 439-451. An dieser Stelle liegt der Fokus auf dem Verdeutlichen unterschiedlicher Granularitäten bei der Modellierung mit Hilfe des Wirkraummodells.

²⁷⁷ Vgl. *hierarchisches Systemkonzept*, Abschnitt 2.2.2.

²⁷⁸ In diesem speziellen Beispiel handelt es sich bei den angrenzenden Wirkrauminhalten um die Wirkkörper der Dichtlippe und der Welle.

²⁷⁹ Die Topologie umfasst die Zusammenhänge (Kopplungen) von Elementen, die eine Übertragung von Energien, Informationen und Stoffen ermöglichen, vgl. Birkhofer (1980), S. 12-13.

²⁸⁰ Eigenschaften der Anordnung beschreiben die Relativlage der Elemente, z. B. durch Angabe der Relativhöhen, vgl. Birkhofer (1980), S. 12-13.

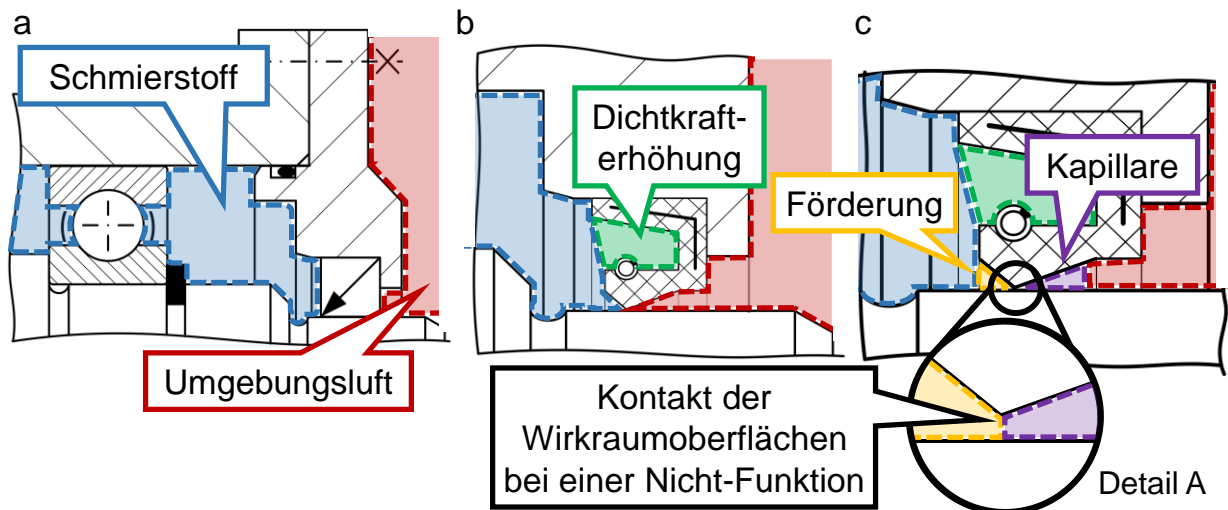


Abbildung 4.11: Beispiel für unterschiedliche Granularitäten bei der Modellbildung

Die Eigenschaften von Wirkrauminhalten umfassen bei Wirkkörpern, d. h. bei feststoffgefüllten Wirkräumen, die Werkstoffeigenschaften und Geometrieigenschaften. Zu Werkstoffeigenschaften zählen beispielsweise die Dichte, die Wärmeleitfähigkeit oder die Zugfestigkeit. Geometrieigenschaften beschreiben u. a. Oberflächenrauigkeit oder Abmessungen der Wirkrauminhalte. Da die Inhalte von Wirkräumen definitionsgemäß nicht nur Festkörper darstellen, lassen sie sich über weitere Eigenschaften des Zustands, wie beispielsweise Druck, Temperatur, Volumen, Stoffart oder Stoffmenge, sowie zur quantitativen Bewertung des Systems insbesondere mittels Zustandsgleichungen, wie beispielsweise der idealen Gasgleichung, beschreiben.

Eigenschaften der Topologie beschreiben beispielsweise gebildete Wirkflächenpaare, vgl. Abbildung 4.12, d. h. die logische Anordnung der Wirkelemente zueinander. Ausgehend von der Annahme, dass Wirkungen stets auf physikalischen Effekten basieren, vgl. Abschnitt 4.3.1, lassen sich Wirkungen ebenfalls über Eigenschaften beschreiben²⁸¹ sowie mit Hilfe von Bilanzgleichungen zwischen zwei Wirkräumen quantifizieren. In Abbildung 4.12 bilden die Inhalte von Wirkraum 3 und 4 die in Rot gekennzeichneten Wirkflächenpaare, die zur beabsichtigten Funktionserfüllung notwendig sind. Alle weiteren Wirkraumkontakte (WRK) bzw. Kontakte zwischen verbleibenden Wirkrauminhalten, bspw. zwischen Wirkrauminhalt 1 und 3 oder Wirkrauminhalt 2 und 4, tragen nicht zur Funktionserfüllung bei und sind daher keine Wirkflächenpaare. Kontakte von Wirkrauminhalten, die nicht funktionsrelevant sind, stellen die Basis von Nicht-Funktionen dar.

²⁸¹ Vgl. Wäldele (2012), S. 93-96; VDI 2222-1 (1997), S. 23-27.

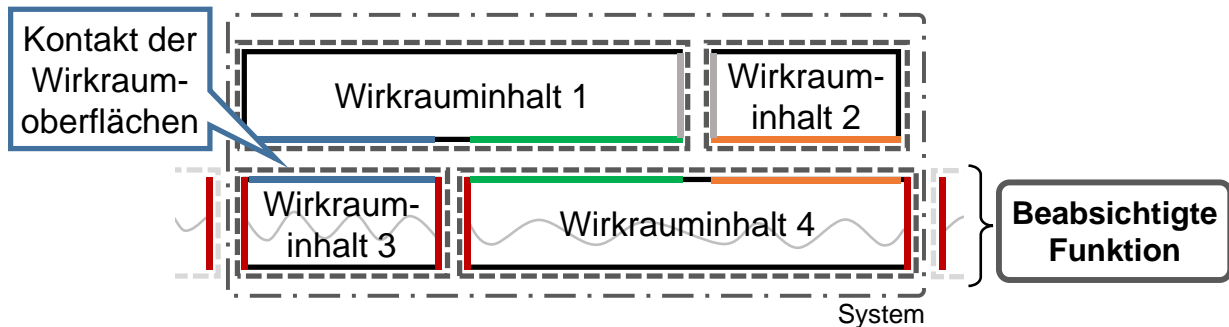


Abbildung 4.12: Unterscheidung von Wirkflächenpaaren und Wirkraumkontakten in schematischer Darstellung

4.3.3 Modellierung technischer Systeme mittels Wirkraummodell

Der Modellierung technischer Systeme mit Hilfe des Wirkraummodells liegt der Gedanke zugrunde, dass ein technisches Produkt stets zur Erfüllung eines Nutzens, d. h. zur Erfüllung eines beabsichtigten Prozesses, entwickelt wird, vgl. Abschnitt 2.2.2. Aufbauend auf dem Prozessmodell des Abschnitts 4.2, mit Hilfe dessen die Unterscheidung zwischen Wirkelementen des Operanden und Wirkelementen des Operators ermöglicht wird, können die Elemente des Wirkraummodells in den Operand-Operator-Zusammenhang gebracht werden. Die Wirkelemente beider Modelle bilden eine gemeinsame und kompatible Schnittstelle zur qualitativen und quantitativen Analyse von Systemen im Prozesszusammenhang. Zur Modellierung von Systemen im Prozesszusammenhang mit Hilfe des Wirkraummodells ist die Trennung von Wirkelementen, die Teil des beabsichtigten Transformationsprozesses sind, und Elementen, die keine oder nur unbeabsichtigte Transformationen erfahren, bedeutend. Diese Unterscheidung der Elemente wird dazu genutzt, Nicht-Funktionen als Ursachen für unbeabsichtigte Prozesse zu definieren und mit Hilfe geeigneter Maßnahmen derart zu beeinflussen, dass sie nicht weiter zu unbeabsichtigten Transformationen beitragen. Insbesondere die Berücksichtigung von Stör- und Nebengrößen sowie unbeabsichtigter Wechselwirkungen ist bei der Modellierung mittels des Wirkraummodells während der Analyse des Systems notwendig, mit dem Ziel Beeinflussungsmöglichkeiten für die Synthese herauszustellen.

Dem Wirkraummodell liegt die Annahme zugrunde, dass Wirkungen beabsichtigter Prozesse (Transformation des Operanden) als auch unbeabsichtigter Prozesse (Verschleiß, Verschmutzung, Leckage, Alterung usw.) erst durch Kontakt von Wirkraumgehalten entstehen. Wirkelemente, die für den Prozess bzw. das Verfahren notwendig sind, werden als verfahrensprinziprelevante Wirkelemente bezeichnet und durch ihre Eigenschaften beschrieben. Ihre Eigenschaften werden den Elementen des Wirkraummodells zugeordnet, vgl. Abschnitt 4.2.1 und Abschnitt 4.3.1.

Zur Verdeutlichung des Abbildens von Zuständen mit Hilfe des Wirkraummodells soll an dieser Stelle nochmals das Beispiel des Aufschäumprozesses aus Abschnitt 4.2.3 auf-

gegriffen werden. Dieses Beispiel dient dem Zweck den Aufschäumprozess unter Berücksichtigung des *Kraft- und Stoffflusses* zu analysieren und zwischen beabsichtigten Funktionen und Nicht-Funktionen zu differenzieren.

Das Ziel des beabsichtigten *Aufschäumens* ist die Änderung des stofflichen Inhalts von Wirkraum 1 von „*unaufgeschäumt*“ zu „*aufgeschäumt*“. Der Quirl als Aufschäumwerkzeug steht zwischen Zeitpunkt t_{AZ} und Endzustand t_{EZ} in direktem Kontakt mit der Milch, wodurch ein Wirkflächenpaar gebildet wird, welches Wirkungen zwischen dem Inhalt von Wirkraum 1 und Wirkraum 2 in Form von Einbringen kinetischer Energie ermöglicht. Das Bereitstellen der kinetischen Energie stellt die Produktfunktion des Milchaufschäumers mit Quirl dar und sorgt dafür, dass sich dadurch die Eigenschaften der Milch beabsichtigt ändern. Mit Hilfe der Drehbewegung des Quirls wird umgebende Luft in die Milch befördert, wodurch die Milch aufgeschäumt. Während des Aufschäumprozesses verläuft der Fluss der vom Motor gewandelten Kraft durch die Welle und schließlich durch den Quirl in die Milch.

Keine beabsichtigten Änderungen sollen die Inhalte von Wirkraum 2, Wirkraum 3 sowie Wirkraum 4 erfahren. Wirkraum 2 beinhaltet den Quirl, welcher das Werkzeug des Prozesses darstellt. Die Oberfläche des Inhalts von Wirkraum 3 stellt die Behälterinnenwand dar und sorgt dafür, dass die Milch nicht ausläuft. Wirkraum 4 umfasst die Luft, die im Zuge des Aufschäumprozesses in die Milch geleitet werden soll und liegt oberhalb der Milch. Mit Hilfe des Kontakts zwischen Werkzeug und Milch wird beabsichtigt kinetische Energie auf die Milch und die umgebende Luft übertragen. Die zur Übertragung der kinetischen Energie genutzte Welle befindet sich zu Beginn des Prozesses jedoch innerhalb der Milch, sodass die Oberflächen von Milch und Welle unbeabsichtigt in Berührung kommen. Gleichmaßen wird die Oberfläche von WR3 durch die Milch während des Prozesses unbeabsichtigt benetzt, d. h. durch die fehlende Funktion zur Verhinderung des Anhaftens wird das unbeabsichtigte Benetzen hervorgerufen. Besonders kritisch ist weiterhin die Existenz der Nicht-Funktion des Dichtens zwischen Deckel und Behälter, wodurch die Umgebungsluft in direkten Kontakt mit dem Inhalt von WR5 des Milchaufschäumers gelangt. Hierdurch ist beispielsweise das Eintreten von Fremdpartikeln oder das unbeabsichtigte Austreten von Milch, in Abhängigkeit der Geometrieigenschaften des Spalts, möglich.

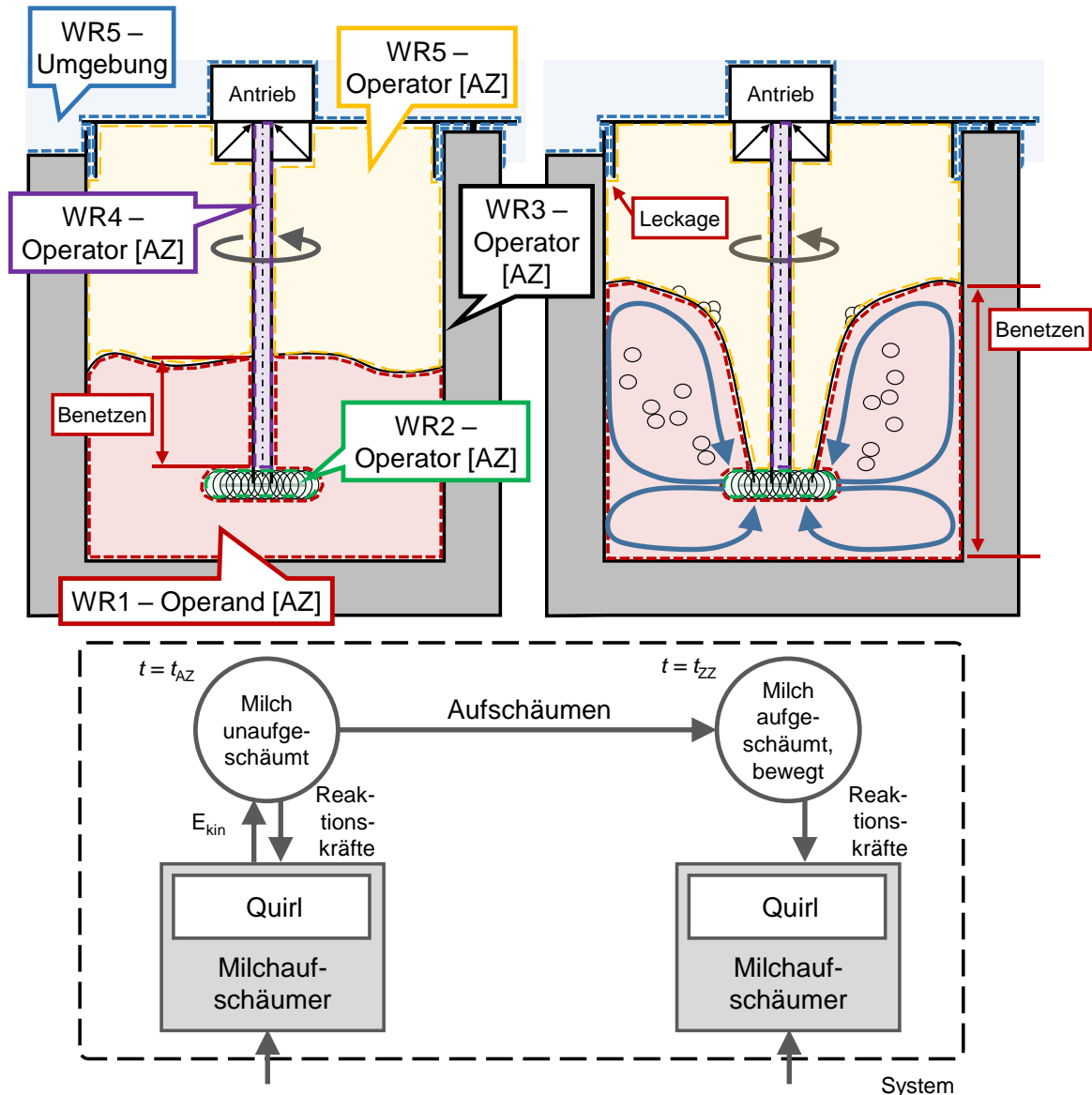


Abbildung 4.13: Wirkräume während eines Aufschäumprozesses

4.4 Zusammenfassung der zentralen Modelle der Arbeit

Das *Prozessmodell*, Abschnitt 4.2, ermöglicht die Differenzierung zwischen beabsichtigten Prozessen und Produktfunktionen, die den kausalen Zusammenhang zwischen Wirkgrößen beschreiben. Darauf aufbauend ist es möglich unerwünschte Größen in Form von Stör- und Nebengrößen sowie Wechselwirkungen innerhalb des Systems abzugrenzen, Abschnitt 4.2.3. Die Auswirkungen der unerwünschten Größen zeigen sich in unbeabsichtigten Prozessen des Operators und führen zu Abweichungen der Soll-Eigenschaften des Operators sowie zu Abweichungen von Soll-Eigenschaften des Operanden im Endzustand des Prozesses. Das Prozessmodell zeichnet sich hauptsächlich durch seinen checklistenähnlichen Charakter aus und ermöglicht die Identifizierung relevanter Elemente für die Realisierung eines technischen Systems sowie deren Relationen.

Das in dieser Forschungsarbeit entwickelte *Wirkraummodell*, Abschnitt 4.3, greift die Zusammenhänge des Prozessmodells auf und stellt ein Produktmodell dar, das funktionale und gestalterische Elemente technischer Systeme beinhaltet und unter Zuhilfenahme von Wirkelementen während verschiedener Prozesszustände in einem Wirkzusammenhang verknüpft, siehe Abschnitt 4.3.3. Bisherige Produktmodelle zielen primär auf die Analyse von Funktionen sowie Fehlfunktionen, indem beispielsweise Wirkflächenpaare und die dazugehörigen Leitstützstrukturen als Basis einer Funktionserfüllung gesucht werden.

Bei der Entwicklung von hygienegerechten Produkten ist neben der Funktionserfüllung das Erkennen von sogenannten Nicht-Funktionen von zentraler Bedeutung, welche dadurch gekennzeichnet sind, dass eine bestimmte Funktion nicht realisiert ist. Mit Hilfe des Wirkraummodells werden zeitbeständige Wirkräume eines Systems abgebildet und können bei der Suche nach Nicht-Funktionen herangezogen werden, sodass beispielsweise Leckageursachen erkannt und im Zuge der Gestaltsynthese gezielt verhindert werden können.

Beim Abbilden technischer Produkte mit Hilfe des Wirkraummodells wird überdies hinaus die Unterscheidung von beabsichtigten und unbeabsichtigten Prozessen des Prozessmodells genutzt, indem die Zustandsänderungen entweder den Wirkelementen des Operanden oder den Wirkelementen des Operators zugeordnet werden. Diese Unterscheidung wird bei Stoffstromsystemen mit Hygienerelevanz in dieser Arbeit genutzt, da unbeabsichtigte Wirkungen innerhalb des technischen Produkts zu Abweichungen von Elementeigenschaften führen, welche sich durch eine Erhöhung des Kontaminationsrisikos auszeichnen.

5 Wirkraumbasierte Analyse für eine hygienegerechte Gestalt

Während des Produktentwicklungsprozesses wechseln sich Analyse- und Synthesevorgänge stetig ab. Bisher fand keine Zuordnung von Grundlagen der methodischen Produktentwicklung zu den Grundlagen der Entwicklung hygienegerechter Produkte statt, wodurch eine systematische Analyse derzeit nicht durchführbar ist²⁸², weshalb diese Lücke im folgenden Kapitel mit Hilfe der in Kapitel 4 erarbeiteten Modelle geschlossen werden soll. Der Fokus dieser Forschungsarbeit liegt insbesondere auf Systemen, bei denen die Nutzungsprozesse auf die Verarbeitung von Lebensmitteln zielen.

Hygienegerechte Produkte zeichnen sich durch ein reduziertes Kontaminationsrisiko aus, vgl. Abschnitt 2.1. In vielen Fällen gehen durch die Reduzierung des Kontaminationsrisikos auch eine Verringerung des Reinigungsaufwandes, Senkungen von Produktionsverlusten (geringere Leckage) und eine Erhöhung des Verbraucher- und Mitarbeiterschutzes einher.²⁸³ Hierbei gilt es überdies hinaus zwischen Primärzielen und Begleiteffekten zu differenzieren. Werden beispielsweise durch eine hygienegerechte Gestalt kürzere Reinigungszeiten realisiert (Primärziel), erhöht sich dementsprechend die Produktionsleistung der Lebensmittelproduktionsanlage (Begleiteffekt). Zur Verbesserung der Hygiene gilt es die Anzahl hygienerelevanter Schwachstellen zu reduzieren, d. h. Nicht-Funktionen zu verhindern, wofür beispielsweise existierende Konstruktionshilfsmittel zur hygienegerechten Gestaltung auf das zu verbessernde Produkt angewendet werden können, vgl. Abschnitt 2.1.1. Die Anwendung wird jedoch erschwert, da diese Hilfsmittel auf sehr spezielle Produkte zielen.²⁸⁴ Das Ziel der Arbeit ist daher das Aufzeigen von Möglichkeiten auf die Hygiene eines breiteren Produktspektrums Einfluss zu nehmen, indem die Schwachstellenanalyse mit Hilfe des Wirkraummodells unterstützt wird.

Zu Beginn der Produktentwicklung stehen im Zuge der Produktgenerationsentwicklung oft Vorgängerprodukte oder Vergleichsprodukte in unterschiedlichen Detaillierungsgraden zur Verfügung²⁸⁵, welche oftmals durch Ergebnisse und Erfahrungen vorheriger Entwicklungsaufgaben ergänzt werden.²⁸⁶ Sind die genauen Zusammenhänge zwischen hygienerelevanten Schwachstellen einer Konstruktion und den konstruktiven Möglichkeiten zur Verhinderung dieser nicht bekannt, ist zu Beginn der Entwicklung eine detaillierte Analyse des Systems notwendig. Das gesteigerte Systemverständnis als Ergebnis einer Analyse kann daraufhin für das Auffinden von Lösungen der Probleme genutzt werden.²⁸⁷

²⁸² Vgl. Beetz et al. (2018), S. 985.

²⁸³ Vgl. Hauser (2008b), S. 1-7; EHEDG (2004), S. 5; Hofmann (2007), S. 10.

²⁸⁴ Vgl. Beetz et al. (2017), S. 84.

²⁸⁵ Hier kann zwischen unterschiedlichen Risikoclustern, je nach Wissen über den Gestalt-Funktionszusammenhang und den Grad der Dokumentation, unterschieden werden, vgl. Matthiesen et al. (2018), S. 2-3.

²⁸⁶ Vgl. Matthiesen et al. (2018), S. 2.

²⁸⁷ Vgl. Matthiesen (2017), S. 3.

5.1 Zentrale Phasen und Prozesse im Produktlebenslauf hygienegerechter Produkte

Für hygienegerechte Produkte sind insbesondere diejenigen Lebenslaufphasen von zentraler Bedeutung, bei denen in den ablaufenden Prozessen hygienerelevante Wirkungen entstehen. Bei der Entwicklung von Maschinen für die Lebensmittelindustrie stellen dies insbesondere die Prozesse der Nutzungsphase dar²⁸⁸, vgl. Abbildung 5.1, da in dieser Phase Lebensmittel produziert werden und hierbei einerseits das Lebensmittel dem Risiko einer Kontamination ausgesetzt ist, andererseits die Maschine während der Vor- und Nachbereitung gereinigt werden muss und dies Einfluss auf die Hygiene des Systems hat. Bei der Entwicklung von Systemen für beispielsweise die Automobilindustrie ist hingegen die Produktionsphase, bestehend aus Fertigung und Montage, von großer Relevanz, da in den ablaufenden Prozessen insbesondere auf technische Sauberkeit geachtet werden muss, vgl. Abschnitt 2.1.3. Gelangen beispielsweise während der Produktion Späne in Hydraulikleitungen des, in Abschnitt 1.1 beschriebenen, Hydraulikaktors, führt dies während der Produktnutzung durch Dichtungszerstörung zu Leckage und somit zu Systemausfällen.

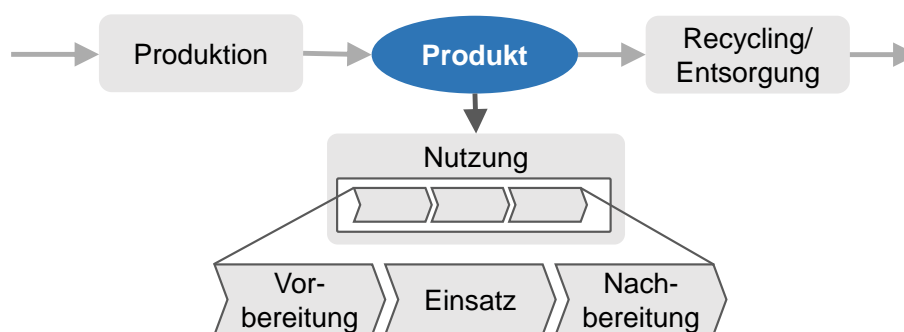


Abbildung 5.1: Zentrale Phasen im Produktlebenslauf hygienegerechter Produkte²⁸⁹

Bei der Produktentwicklung liegt der Fokus auf der Erfüllung von Funktionen zur Realisierung des Einsatzprozesses, währenddessen das Produkt als Operator fungiert und seinen beabsichtigten Zweck erfüllt.²⁹⁰ Dazu stellt das Produkt eine geeignete Wirkgröße für den Prozess zur Verfügung und die verfahrensprinziprelevanten Wirkelemente interagieren über die gebildeten Wirkflächenpaare. Die Produktgestalt spielt im Einsatzprozess eine zentrale Rolle, was sich insbesondere bei Lebensmittelmaschinen zeigt, da je nach Art des Lebensmittels, aus den Gestalteeigenschaften der Maschine und den Prozesseigenschaften des Einsatzverfahrens (Nutzungsdauer, Temperatur usw.) ein erhebliches Kontaminationsrisiko resultiert, welches einerseits den Nutzer der Maschine, andererseits den Konsumenten des Lebensmittels betrifft.

²⁸⁸ Vgl. Beetz et al. (2017), S. 85-87.

²⁸⁹ In Anlehnung an Oberender (2006), S. 34.

²⁹⁰ Vgl. Heidemann (2001), S. 21

Oftmals sind vorbereitende Prozesse vor dem eigentlichen Einsatzprozess notwendig, die zum Präparieren eines Produkts für den Einsatzprozess notwendig sind. Hierunter zählen beispielsweise das Zuführen von Hilfs- und Betriebsstoffen oder die Vorbereitung der Prozessumgebung.²⁹¹ In ähnlicher Weise wie bei Einsatzprozessen spielt bei Prozessen der Einsatzvorbereitung eine hygienegerechte Gestalt ebenfalls eine wesentliche Rolle. Gelangen beispielsweise unerwünschte Stoffe bereits beim Einfüllen von Hilfs- und Betriebsstoffe in die Maschine, führt dies zu einem erhöhten Kontaminationsrisiko während der Einsatzprozesse. Müssen für den Einsatz Werkzeuge der Maschine getauscht und montiert werden, gilt es im Zuge der Entwicklung hygienegerechter Produkte ebenfalls darauf zu achten, dass nicht bereits vor dem Einsatz Partikel durch die Montage in die Maschine gelangen und dort verbleiben.

Den Zyklus der Nutzungsphase schließen die Prozesse der Nachbereitung, welche regelmäßig nach Abschluss der Einsatzprozesse erfolgen und der Wiederherstellung des Ausgangszustands vor Beginn der Nutzung dienen.²⁹² Hierbei sind insbesondere das Entfernen von Hilfs- und Betriebsstoffen sowie weitere Reinigungsprozesse von Relevanz, die sich durch Umsetzung einer entsprechenden Produktgestalt durch beispielsweise einen geringen Reinigungsmittelbedarf, eine kurze Reinigungszeit, eindeutige Reinigungsabläufe, sichere Reinigungsergebnisse bzw. eine geringe Gefahr für die an der Reinigung beteiligten Personen auszeichnen.

Reinigungsverfahren lassen sich nach dem Umgang des Demontageaufwands unterscheiden. Beim sogenannten „*Cleaning in Place*“ (CiP) wird die Maschine im montierten, nicht wesentlich zerlegten Zustand und oftmals automatisch gereinigt. Hierzu werden entweder von der Maschine selbst geeignete Wirkgrößen für den Reinigungsprozess zur Verfügung gestellt oder durch externe Systeme notwendige Wirkgrößen aufgebracht. Für CiP-fähige Maschinen bedarf es einer spaltfreien und tottraumfreien Gestalt und Flüssigkeiten müssen selbstständig abfließen können.²⁹³ Hierzu zählen beispielsweise industrielle Getränkeabfüllmaschinen, bei denen eine automatische Reinigungsfunktion integriert ist, sodass ein manuelles Reinigen sämtlicher Leitungen nicht notwendig ist.

Beim sogenannten „*Cleaning off Place*“²⁹⁴ (CoP) muss die Maschine demontiert und die Baugruppen oder Einzelteile entweder manuell oder maschinell mit entsprechenden Hilfsstoffen und Reinigungswerkzeugen gereinigt werden. Essentiell für die Maschinen,

²⁹¹ Vgl. Oberender (2006), S. 45-47.

²⁹² Vgl. Oberender (2006), S. 48-50.

²⁹³ Vgl. Hofmann (2007), S. 16-17.

²⁹⁴ In der Literatur wird diese Art der Reinigung manchmal auch „*Cleaning out of Place*“ genannt, vgl. Hauser (2008a), S. 716.

die mittels CoP gereinigt werden sollen, ist vornehmlich eine Gestalt, bei der verschmutzten Bauteile für die manuelle Entnahme erreichbar sind.²⁹⁵ Als Beispiel für eine CoP-Anwendung lassen sich Maschinen zur Teigverarbeitung in industriellen Bäckereianlagen benennen, welche auf Grund der hohen Viskosität des Teigs im montierten Zustand nicht automatisch reinigbar sind.

5.2 Kategorisierung unbeabsichtigter Wirkungen

Technische Systeme stehen stets unter Einflüssen der Systemumgebung. In Abschnitt 4.2.3 wurde bereits gezeigt, dass diese Einflüsse zu Abweichungen der erwarteten Eigenschaften des Operators und des Operanden führen können. Das bedeutet für das Gebiet von hygienegerechten Produkten, dass diese Einflüsse zu Änderungen der Eigenschaften der Maschine selbst, dem Operator, oder des Lebensmittels als Operand während des Einsatzprozesses führen können. Diese Änderungen sind der Auslöser für das Entstehen von Kontamination und müssen daher in diesem Bereich neben der Erfüllung der Funktion im Fokus der Produktentwicklung stehen.

Die Anzahl von unterschiedlichen Verfahren zur Lebensmittelverarbeitung ist extrem groß. Bei der Entwicklung von Maschinen nach hygienischen Gesichtspunkten gilt es, unerwünschte Wirkungen in Form von Stör- und Nebengrößen sowie unerwünschten Wechselwirkungen zwischen Operand und Operator, die unabhängig vom Verarbeitungsverfahren des Lebensmittels gültig sind, zu beherrschen. Im Folgenden werden daher unerwünschte Wirkungen auf Produkte, bei denen Hygiene von Relevanz ist, mit Hilfe übergeordneter Kategorien gegliedert und durch physikalische Zusammenhänge beschrieben.

Bei der Analyse technischer Systeme müssen hygienerelevanten Schwachstellen, d. h. die Nicht-Funktionen, herausgearbeitet werden, die die Basis einer Kontaminationsbildung bilden. Im Zuge der Synthese gilt es, geeignete Maßnahmen zur Verhinderung oder Minimierung der unerwünschten Wirkungen zu identifizieren und zu implementieren.

Störgrößen wirken von außerhalb über die Systemgrenze auf das System, vgl. Abschnitt 4.2.3, und sind unabhängig vom beabsichtigten Prozess, können jedoch mit dem Operanden und/oder dem Operator interagieren. Als Konsequenz lösen sie bei fehlenden Maßnahmen zur ihrer Verhinderung bzw. Abschirmung unbeabsichtigte Prozesse aus, die zu Abweichungen der beabsichtigten Eigenschaften des Operanden im Endzustand führen.²⁹⁶

Nebengrößen entstammen dem technischen System und können auf die Umgebung wirken. Ebenso wie Störgrößen können Nebengrößen zu Abweichungen der beabsichtigten

²⁹⁵ Vgl. Hofmann (2007), S. 16.

²⁹⁶ Vgl. Mathias (2016), S. 46.

Eigenschaften der Systemelemente führen. Bei hygienegerechten Produkten der Lebensmittelindustrie betrifft dies beispielsweise die Leckage von Lebensmittel in die Systemumgebung, welche an der jeweiligen Stelle eine Kontaminationsquelle darstellt. In anderen Bereichen des Maschinenbaus resultieren aus Leckage nicht automatisch negative Auswirkungen. In Kupplungen, wie beispielsweise aus Abschnitt 1.1, sind die funktionsrelevanten Flüssigkeiten flüchtig, d. h. sie verdampfen nach dem Austritt bereits bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen, sodass eine Leckage keine weiteren Auswirkungen auf das System hat.

Neben unerwünschten Größen, die über die Systemgrenze treten, existieren innerhalb des Systems sogenannte *Wechselwirkungen*, die als Neben- und Störgrößen innerhalb des Systems zwischen Operand und Operator interpretiert werden können. Im Unterschied zur Interaktion des Operators mit dem Operanden über Wirkgrößen, die für die beabsichtigten Prozesse notwendig sind, stellen Wechselwirkungen unbeabsichtigte Größen dar und können zu unbeabsichtigten Prozessen führen. In vielen Fällen sind unerwünschte Wechselwirkungen auf Grund des gewählten Einsatzverfahrens unvermeidbar.²⁹⁷

Das Beispiel des hydrostatischen Kupplungsaktors aus Abschnitt 1.1 zeigt, dass durch Restschmutz unter einer der Dichtlippen die Dichtfunktion nicht erfüllt werden kann, wodurch Hydraulikflüssigkeit austritt und komprimierbare Gasblasen eintreten. Durch fehlende Maßnahmen zur Reduzierung des Einflusses der Gasblasen führen Gasblasen zu einem unvorhersehbaren Systemverhalten. Aus diesem Grund gilt es insbesondere bei der Montage darauf zu achten, dass keine Partikel in den Hydraulikbereich derartiger Systeme gelangen.

Im Bereich der Lebensmittelproduktion äußern sich unerwünschte Produkt-Prozess-Wechselwirkungen u. a. durch Anhaften von Lebensmittel etwaiger Bauteile. Abbildung 5.2a zeigt einen Lebensmittelrührer während des Einsatzprozesses, bei dem das Rührwerkzeug von dem Wirkraum des Lebensmittels umschlossen wird. Einerseits ist die Anordnung zur Umsetzung des Einsatzverfahrens notwendig, da hierdurch erst die Wirkgröße des Rührwerkzeugs in das Lebensmittel gelangt, andererseits ist ein Anhaften des Lebensmittels nicht beabsichtigt, da hierdurch nach Rühr- und Ausgießprozessen Lebensmittelreste unbeabsichtigt am Rührer und am Behälter haften, vgl. Abbildung 5.2b, wodurch zusätzliche Reinigungsprozesse notwendig sind.²⁹⁸

²⁹⁷ Vgl. Beetz et al. (2017), S. 86-87.

²⁹⁸ Vgl. Beetz et al. (2017), S. 86.

Anforderung 1): Unbeabsichtigtes Anhaften des Operanden oder von Hilfs- und Betriebsstoffen³⁰¹ an Flächen des Operators vermeiden:

Unbeabsichtigtes Anhaften spielt bei hygienegerechten Produkten, die für die Verarbeitung von Lebensmitteln oder anderen Produkten genutzt werden, während des Einsatzes und während der Reinigung eine wesentliche Rolle. Bei Produkten anderer Branchen müssen hingegen sämtliche Phasen des Produktlebenszyklus gemäß Abschnitt 5.1 berücksichtigt werden.

Adhäsion (lateinisch "adhaerere" – "Anhaften") beschreibt den Endzustand eines Prozesses, der durch Wirkungen zwischen einem festen Körper und einer festen, flüssigen oder gasförmigen Phase in einem Aneinanderhaften der Phasen resultiert.³⁰² Die Wirkungen basieren auf zwischenmolekularen Anziehungskräften³⁰³, wie beispielsweise elektrostatischen Kräften, VAN-DER-WAALS-Kräften oder chemischen Bindungen, und sind die Ursache der Benetzung von Maschinenoberflächen durch Lebensmittel oder Fremdstoffe sowie der Einlagerung von Stoffen in Spalte. In dieser Forschungsarbeit wird bewusst zwischen beabsichtigtem Anhaften, welches einen gewollten Zusammenhalt zweier Elemente wie beispielsweise bei einer Klebeverbindung darstellt, und dem unbeabsichtigten Anhaften, welches es zu vermeiden gilt, unterschieden.

Unbeabsichtigtes Anhaften von Stoffen wird u. a. durch Eigenschaften des Stoffs selbst, der Werkstoffe (inkl. Oberflächenrauigkeit), Prozesseigenschaften (wie z. B. Prozesszeit oder Temperatur), sowie die Art von Bauteilverbindungen beeinflusst.³⁰⁴ Ein Maß für den Umfang des Anhaftens und der Schwierigkeit einer Reinigung stellt die Adhäsionskraft dar, welche in diesem Zusammenhang als die Normalkraft verstanden wird, die zum mechanischen Trennen der beiden anhaftenden Phasen notwendig ist.³⁰⁵

Unbeabsichtigtes Anhaften kann in Abhängigkeit des Einsatzzwecks des Produkts zu unterschiedlichen, unbeabsichtigten Prozessen führen. Gelangen Oberflächen von Werkzeugen oder andere Bereiche des Operators während des Einsatzprozesses mit der Oberfläche von Lebensmitteln in Kontakt, besteht die Möglichkeit des bleibenden Anhaftens. Im Bereich der Lebensmittelindustrie führt unbeabsichtigtes Anhaften des Lebensmittels an Bauteilen der Maschine oftmals zu einem Verderb sowie zu einem erhöhten Reinigungsaufwand. Das anhaftende Lebensmittel verändert die Eigenschaften des An-

³⁰¹ Hierunter zählen auch Stoffe, die für Reinigungsprozesse notwendig sind.

³⁰² Vgl. Weissmantel (1982).

³⁰³ Adhäsion lässt sich derzeit auf Grund der Komplexität der beteiligten Einflussfaktoren nicht mit einer einheitlichen Theorie erklären. Daher existieren verschiedene *Adhäsionstheorien*, vgl. Achereiner (2009), S. 4-9.

³⁰⁴ Vgl. Hauser (2008b), S. 146-147.

³⁰⁵ Vgl. Dutschk (2000), S. 20.

haftpartners dahingehend, dass beispielsweise die beabsichtigte Wirkgröße für den Prozess negativ beeinflusst wird. Weiterhin wird die Wahrscheinlichkeit einer Kontamination durch Anhaften des Lebensmittels vergrößert, selbst wenn in nachfolgenden Reinigungsprozessen die Verschmutzung reduziert wird.³⁰⁶ Ziel der anschließenden Reinigungsprozesse ist eine Wiederherstellung des sauberen Anfangszustands der Maschine mit Hilfe eines geeigneten Reinigungsverfahrens.

In anderen Branchen mit stoffverarbeitenden Systemen wie beispielsweise in Hydrauliksystemen der Automobilindustrie gilt es insbesondere während der Produktion unbeabsichtigtes Anhaften von Spänen zu verhindern, da hierdurch die Funktionserfüllung im Einsatzprozess nicht sichergestellt werden kann, vgl. Abschnitt 1.1. Dabei stellt das Anhaften oftmals eine Herausforderung dar, denn durch spanende Fertigungsverfahren wird einerseits das Produkt gefertigt, wodurch das Entstehen von Spänen unumgänglich ist, andererseits gilt es das Entstehen von Spänen und Anhaften in funktionsrelevanten Bereichen zu verhindern.

Anforderung 2): Unbeabsichtigtes Ansammeln des Operanden oder von Hilfs- und Betriebsstoffen in Bereichen (Toträumen) des Operators verhindern

Gemäß DIN EN 1672-2 sind Toträume Bereiche, „[...] in den ein Produkt, Zutaten, Reinigungs- oder Desinfektionsmittel oder Verschmutzungen eingeschlossen, festgehalten oder aus dem sie nicht vollständig durch Reinigungsmaßnahmen entfernt werden können“.³⁰⁷ Toträume (manchmal auch Totwassergebiete genannt) sind durch ungünstige Strömungsverhältnisse charakterisiert, vgl. Abbildung 5.4. Die Ursachen für Toträume hierfür sind oftmals strömungsungünstige Ecken und Kanten in den gestalteten Bereichen, die z. B. Strömungsablösungen zur Folge haben. Sie sind auf Grund mangelnden Austauschs mit umgebendem Fluid einerseits Basis für Lebensmittel- oder Schmutzanhafung, andererseits Grund für ungenügende Reinigungsergebnisse.³⁰⁸ Toträume werden durch Eigenschaften des Stoffs selbst, Prozesseigenschaften³⁰⁹ (wie z. B. Strömungsgeschwindigkeit) sowie Topologieeigenschaften der Wirkräume beeinflusst.

Gelangt beispielsweise Lebensmittel in Toträume des Werkzeugs oder in andere Bereiche des Operators während des Einsatzprozesses, erhöht dies das Risiko des unbeabsichtigten Einlagerns. Das eingelagerte Lebensmittel führt nicht direkt zur Kontamination, führt jedoch bei ungenügender Reinigung in Abhängigkeit des Lebensmittels nach einem

³⁰⁶ „Dabei sollte allerdings mit dem Irrtum aufgeräumt werden, dass eine Anreicherung mit Mikroorganismen dann in Kauf genommen werden kann, wenn später ein Schritt zu ihrer Abtötung erfolgt oder sie am Wachstum gehindert werden.“ Hauser (2008b), S. 81.

³⁰⁷ DIN EN 1672-2 (2009), S. 6.

³⁰⁸ Vgl. Hauser (2008b), S. 332.

³⁰⁹ Die Zusammenhänge finden sich u. a. in Graßhoff (1996), S. 105-114.

bestimmten Zeitintervall durch chemische Reaktionen oder in Abhängigkeit des pH-Werts durch Wachstum unterschiedlicher Mikroorganismen³¹⁰ zur Kontamination und damit zu einer unbeabsichtigten Abweichung der Eigenschaften des Lebensmittels.³¹¹ Ziel des anschließenden Reinigungsprozesses ist eine Wiederherstellung des sauberen Anfangszustands der Maschine. Dabei gilt zu beachten, dass Toträume oftmals strömungsbedingt sind und daher bei der Reinigung ebenfalls bestehen oder entstehen können.

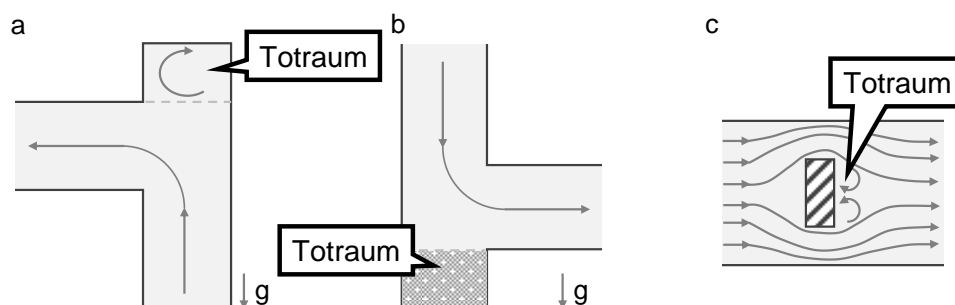


Abbildung 5.4: Beispielhafte Toträume³¹²

Anforderung 3): Unbeabsichtigtes Austreten (Leckage) des Operanden oder Hilfs- und Betriebsstoffen aus Bereichen des Operators vermeiden

Unter Leckage wird im Allgemeinen das ungewünschte Austreten von Flüssigkeiten, Gasen und Feststoffen aus den Bereichen des Produkts verstanden.³¹³ Bei hygienegerechten Produkte gilt es Leckage zu verhindern, wobei gemäß Abbildung 5.3 zwischen Austreten des Operanden in die Umgebung und Austreten des Operanden in Bereiche innerhalb des Operators unterschieden wird.³¹⁴

Im Bereich der Lebensmittelproduktion führt Lebensmittelaustritt in die Umgebung zwar zu keiner direkten Kontamination des Lebensmittels, dennoch werden je nach Umfang der Leckage bestimmte Eigenschaften des Lebensmittels im Endzustand, wie beispielsweise Temperatur oder Volumen(-strom), nicht erreicht. Ausgetretene Hilfs- und Betriebsstoffe in die Umgebung können beispielsweise in offenen Systemen über die Umgebung erneut in das Lebensmittel gelangen und auf diesem Wege zur Kontamination führen.

Interne Leckage von Fluiden führt dazu, dass das Fluid in Bereiche der Maschine gelangt, in denen kein Kontakt mit dem ausgetretenen Fluid vorgesehen ist und bildet somit die Basis für eine Kontamination, insbesondere in Kombination mit dem Auftreten von Toträumen.

³¹⁰ Vgl. Hauser (2008b), S. 124-146.

³¹¹ Vgl. Hofmann (2007), S. 31.

³¹² In Anlehnung an DIN EN 1672-2 (2009), S. 30 und Hauser (2008b), S. 333.

³¹³ Vgl. Kirchner, Birkhofer (2017), S. 422-423.

³¹⁴ Vgl. Beetz et al. (2017), S. 86; Beetz et al. (2018), S. 989.

Anforderung 4): Unbeabsichtigtes Ablösen von Werkstoffen oder Diffusion von Hilfs- und Betriebsstoffen des Operators in Bereiche des Operanden sowie der Umgebung verhindern

Unbeabsichtigtes Ablösen ist ein Prozess, der durch physisches Herauslösen von Werkstoffpartikeln zur Kontamination führen kann. Gemäß DIN EN 1672-2 müssen in der Lebensmittelindustrie Konstruktionswerkstoffe „widerstandsfähig gegen [...] Absplittern, Abblättern und Abrieb“ sein.³¹⁵ Die Ursachen, die zur Ablösung von Werkstoffpartikeln führen, lassen sich gemäß der Verschleißmechanismen der Tribologie in verschiedene Kategorien einteilen.

Das Einwirken von Elementen aus der Umgebung, wie beispielsweise der Kontakt von Werkstoffen mit Umgebungsluft, auftreffende Sonnenstrahlung oder äußere Temperatureinflüsse, welche die Werkstoffeigenschaften verändern, können zum Verschleiß der Werkstoffe des Operanden führen, wodurch unbeabsichtigtes Ablösen von Partikeln ausgelöst werden kann.³¹⁶

Systemelemente selbst können ein unbeabsichtigtes Ablösen bedingen, indem beispielsweise abrasiv wirkende Reinigungsmittel eingesetzt oder abrasiv wirkende Fluide verarbeitet werden und durch Abrasion ein Partikelabtrag entsteht.³¹⁷

Weiterhin kann das Wirkprinzip des Produkts das unbeabsichtigte Ablösen durch Verschleiß fördern, indem beispielsweise berührende Bauteile bei mangelnder Schmierung relativ zueinander bewegt werden (adhäsiver Verschleiß) oder elastische Bauteile durch mechanische Spannungen überbeansprucht werden (Oberflächenzerrüttung).³¹⁸

Anforderung 5): Eindringen von Fremdstoffen und weiteren Störgrößen aus der Systemumgebung in das System verhindern

Durch die Interaktion des Systems mit der Umgebung können Störgrößen Wirkungen auf die Elemente des Systems ausüben, welche zu einer negativen Beeinflussung des Systems führen. Das Verhindern deren Einwirkens sowie die Reduzierung der Auswirkungen im System stellen eine zentrale Anforderung an hygienegerechte Produkte dar.³¹⁹ Fremdstoffe sind eine spezielle Form von Störgrößen. Hierunter werden alle festen, flüssigen und gasförmigen Stoffe verstanden, die dem System nicht zugehörig sind und zu einer Kontamination führen. Hierzu zählen u. a. Staub oder staubähnliche Partikel, Mikroorganismen sowie Tiere. Fremdstoffe sind darüber charakterisiert, dass sie von außen in das System gelangen, vgl. Abbildung 5.3. Jedoch führen nicht nur physische Objekte zu einer

³¹⁵ Vgl. DIN EN 1672-2 (2009), S. 11.

³¹⁶ Vgl. Czichos, Habig (2015), S. 104.

³¹⁷ Vgl. Czichos, Habig (2015), S. 137-140.

³¹⁸ Vgl. Habig, Woydt (2014), S. E90; Beetz et al. (2017), S. 86-87.

³¹⁹ Vgl. DIN EN 1672-2 (2009), S. 13; EHEDG (2004), S. 5; Hauser (2008b), S. 420.

Kontamination des Systems, Umgebungseinflüsse wie Temperatur oder Luftfeuchtigkeit können ebenfalls zu einer unbeabsichtigten Veränderung der Eigenschaften des Operanden im Endzustand des Einsatzprozesses führen.

Die Art und das Ausmaß der Interaktion zwischen Umgebung und System hängen von den Eigenschaften der an der Interaktion beteiligten Bauteile ab. Relevant für die Entwicklung hygienegerechter Produkte ist die Beachtung derjenigen Störgrößen, die durch das Wirken auf das System zur Kontamination führen.

Im Gebiet der Lebensmittelproduktion stellen unbeabsichtigte Endzustände des Lebensmittels beispielsweise Fremdkörpereinschlüsse dar, d. h. sie äußern sich in Form von Abweichungen der Lebensmitteleigenschaften. Temperatureintrag oder andere Umgebungseinflüsse können durch eine Änderung der Operandeneigenschaften ebenfalls zu einer Kontamination führen.

Der Zusammenhang zwischen Störgrößen und den Auswirkungen auf den Operanden ist nicht auf das Gebiet der Lebensmittelproduktion beschränkt, sondern gilt ebenfalls für weitere Systeme, beispielsweise in der Medizintechnik oder dem allgemeinen Maschinenbau. Gelangen Störgrößen in Form von Fremdpartikel während der Fertigung von Bauteilen in Bereiche, in denen höchste Sauberkeitsanforderungen gelten, kann die spätere Funktionserfüllung während der Nutzungsphase nicht mehr gewährleistet werden. Aus diesem Grund werden zur Abschirmung von Störgrößen oftmals in der Produktion sowie in der Nutzungsphase Reinräume genutzt, da hierdurch die Fremdpartikelkonzentration auf ein genormtes Minimum reduziert wird, vgl. Abschnitt 2.1.3.

5.4 Analyseschritte zur Entwicklung hygienegerechter Produkte

Der Schwerpunkt bei der Entwicklung hygienegerechter Produkte liegt auf der Reduzierung von Kontaminationsrisiken. Das Wirkraummodell ermöglicht die Analyse hinsichtlich unbeabsichtigter Prozesse, die sich durch die Existenz von Nicht-Funktionen begründen lassen. Dabei stehen bei Stoffstromsystemen die zu verarbeitenden Stoffe in Form des passiven Operanden im Mittelpunkt der Untersuchung. Dies kann in Abhängigkeit des Systems beispielsweise ein zu produzierendes Bauteil darstellen, vgl. Abschnitt 1.1, oder im Bereich der Lebensmittelproduktion ein zu verarbeitendes Lebensmittel sein. Die unterschiedlichen Möglichkeiten des Wirkraummodells für die Analyse werden beispielhaft anhand eines Absperrventils verdeutlicht, dessen Hauptfunktion während der Nutzungsphase darin besteht, den Stofffluss durch eine Rohrleitung bei Bedarf zu sperren oder freizugeben, vgl. Abbildung 5.5.

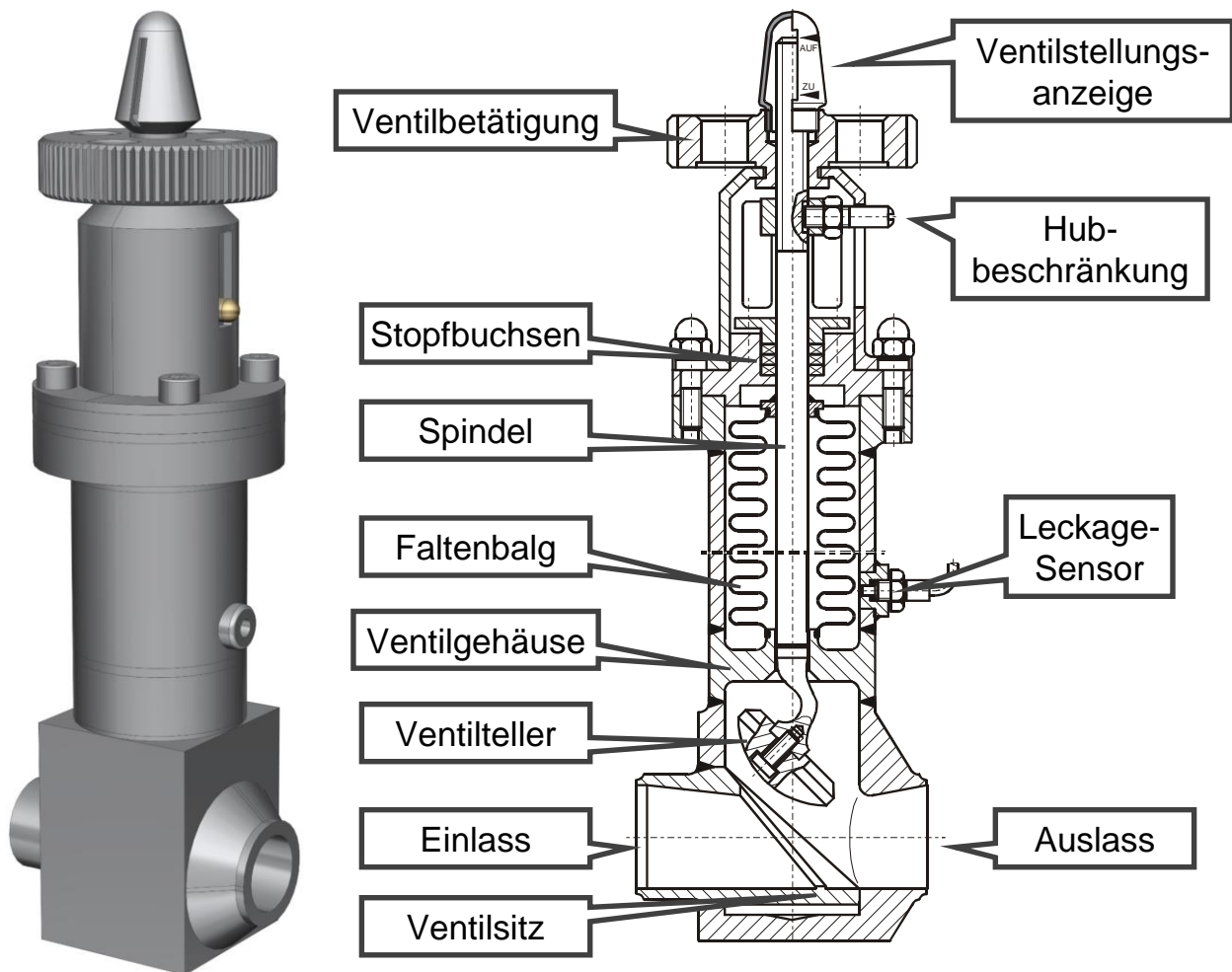


Abbildung 5.5: Absperrventil als Beispiel für die Analyse³²⁰

5.4.1 Nutzung des Wirkraummodell zur Analyse beabsichtigter Prozesse und Funktionen

Da in dieser Arbeit die Entwicklung hygienegerechter Produkte im Vordergrund steht, ist gemäß Abschnitt 5.2 insbesondere zwischen beabsichtigten und unbeabsichtigten Prozessen zu differenzieren. An dieser Stelle soll zunächst unter Zuhilfenahme des Wirkraummodells die Analyse der beabsichtigten Prozesse eines technischen Systems am Beispiel des Absperrventils genutzt werden, um das Erkennen von Wirkräumen zu verdeutlichen. Dabei werden zunächst Wirkräume erörtert, deren Inhalte für die beabsichtigte Funktionserfüllung und damit für den beabsichtigten Prozess relevant sind und von Wirkräumen abgegrenzt, deren Inhalte für beabsichtigte Prozesse von geringerer Relevanz sind.

Abbildung 5.6 zeigt einen prinzipiellen Ablauf zur Erörterung von Wirkräumen der beabsichtigten Prozesse. Für die Analyse der beabsichtigten Prozesse ist die Kenntnis des

³²⁰ In Anlehnung an VDI 2223 (2004), S. 36.

Zusammenhang von Funktion und Gestalt einer Konstruktion fundamental, dessen Ermittlung jedoch nicht Fokus dieser Arbeit ist.³²¹ Das Wissen über den Zusammenhang kann im Zuge der Produktgenerationsentwicklung durch Nutzung von Vorgänger-, Referenzprodukten und dazugehöriger Skizzen, vgl. hierzu beispielsweise Abbildung 5.5, CAD-Modellen oder Ähnlichem unterstützt werden. Zu Beginn der Analyse liegt ein Produkt unbekanntes oder unzureichend bekanntes Wirkzusammenhangs³²² vor. Ziel ist es zunächst, basierend auf einem dem Verständnis des Zusammenhangs von Funktion und Gestalt, Wirkräume zu identifizieren, in denen die beabsichtigten Funktionen zur Realisierung der jeweiligen beabsichtigten Prozesse realisiert werden. Aufbauend darauf ist es möglich Nicht-Funktionen für unbeabsichtigte Prozesse im nachfolgenden Schritt zu erkennen.

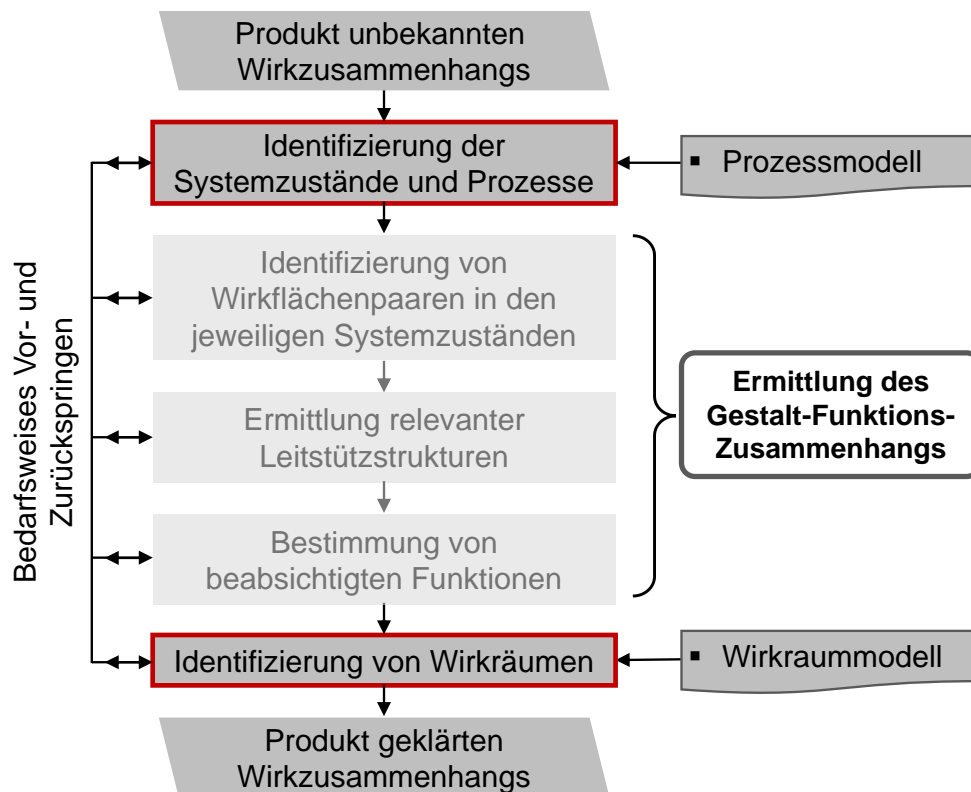


Abbildung 5.6: Relevante Schritte zur Identifizierung von Wirkräumen basierend auf der Analyse der beabsichtigten Funktionen eines Systems³²³

Systeme nehmen zumeist durch ablaufende Prozesse unterschiedliche Zustände ein, jedoch wird mit Hilfe des Wirkraummodells lediglich ein Zeitpunkt bzw. ein Zustand abgebildet, vgl. Abschnitt 4.3.2. Daher ist es für die Modellbildung notwendig alle Zustände,

³²¹ Heuristiken zur Analyse technischer Systeme mit dem C&C²-Ansatz werden beispielsweise in Thau (2013) verdeutlicht.

³²² Vgl. Abschnitt 4.2.1.

³²³ In Anlehnung an Matthiesen et al. (2018), S. 9.

die durch Prozesse verknüpft werden, zu identifizieren und abzubilden. Zwei Systemzustände unterscheiden sich hierbei in mindestens einer Eigenschaft der beteiligten Systemelemente. Ein neuer Systemzustand kann beispielsweise durch das Schließen eines neuen Wirkflächenpaares eingeleitet werden. Unterstützt wird dieser Schritt durch möglicherweise vorhandene Produktdokumentationen sowie Darstellungen der Zustände und Prozesse durch Prozess(-struktur)modelle. Entscheidungen hinsichtlich des Festlegens der Systemgrenze³²⁴ und der abzubildenden Zustände werden ebenfalls an dieser Stelle getroffen.

Am Beispiel des Absperrventils sind diejenigen Zustände relevant, in denen das Ventil geschlossen bzw. geöffnet ist, vgl. Abbildung 5.7. Sie werden durch die Prozesse „Öffnen“ bzw. „Schließen“ mittels geeigneter Wirkgrößen ineinander überführt und unterscheiden sich durch die Eigenschaft des effektiven Öffnungsquerschnitts A_{eff} . Die zentrale Funktion des Absperrventils stellt das Stoppen des Fluids dar, welches durch Bilden des umlaufenden WFP 1 in Abbildung 5.7 erreicht wird. Hierzu wird der Ventilteller mit Hilfe einer translatorischen Bewegung der Spindel in die Position des Ventilsitzes gedrückt.

Um in darauffolgenden Analyseschritt Nicht-Funktionen erkennen zu können, bietet sich das Eintragen von Wirkräumen in die vorliegende Abbildung des jeweiligen Systemzustands an, wodurch die Zustände des Transformationsprozesses durch die zusätzliche Angabe von Wirkraumeigenschaften eindeutig beschrieben werden. Das Eintragen der Wirkräume muss je nach Komplexität des Systems iterativ erfolgen, da beispielsweise die Granularität der Wirkräume in bestimmten Bereich angepasst werden muss, um potentielle Nicht-Funktionen als solche identifizieren zu können.

Am Beispiel des Absperrventils ist die Beschreibung des geöffneten bzw. geschlossenen Zustands über die Angabe des Öffnungsquerschnitts A_{eff} möglich, die Verknüpfung der Zustände mittels Prozessen wird darauf aufbauend über die Änderung des Öffnungsquerschnitts \dot{A}_{eff} beschrieben, vgl. Abbildung 5.7. Zur Differenzierung von Operator und Operand sowie der Beschreibung der beabsichtigten Prozesse (Transformation des Operanden), gemäß Abschnitt 4.2.3, ist das Heranziehen des Prozessmodells ratsam. Jeder Wirkrauminhalt ist entweder dem Operanden oder dem Operator zugehörig. Dabei stellen passive Elemente, welche während des Prozesses eine beabsichtigte Zustandsänderung erfahren, stets den Operand dar. Dies gilt insbesondere für das Fluid innerhalb des Ventils, welches im Zuge des Schließprozesses des Ventils beabsichtigt gestoppt werden soll.

³²⁴ Vgl. Würtenberger (2018), S. 82-84.

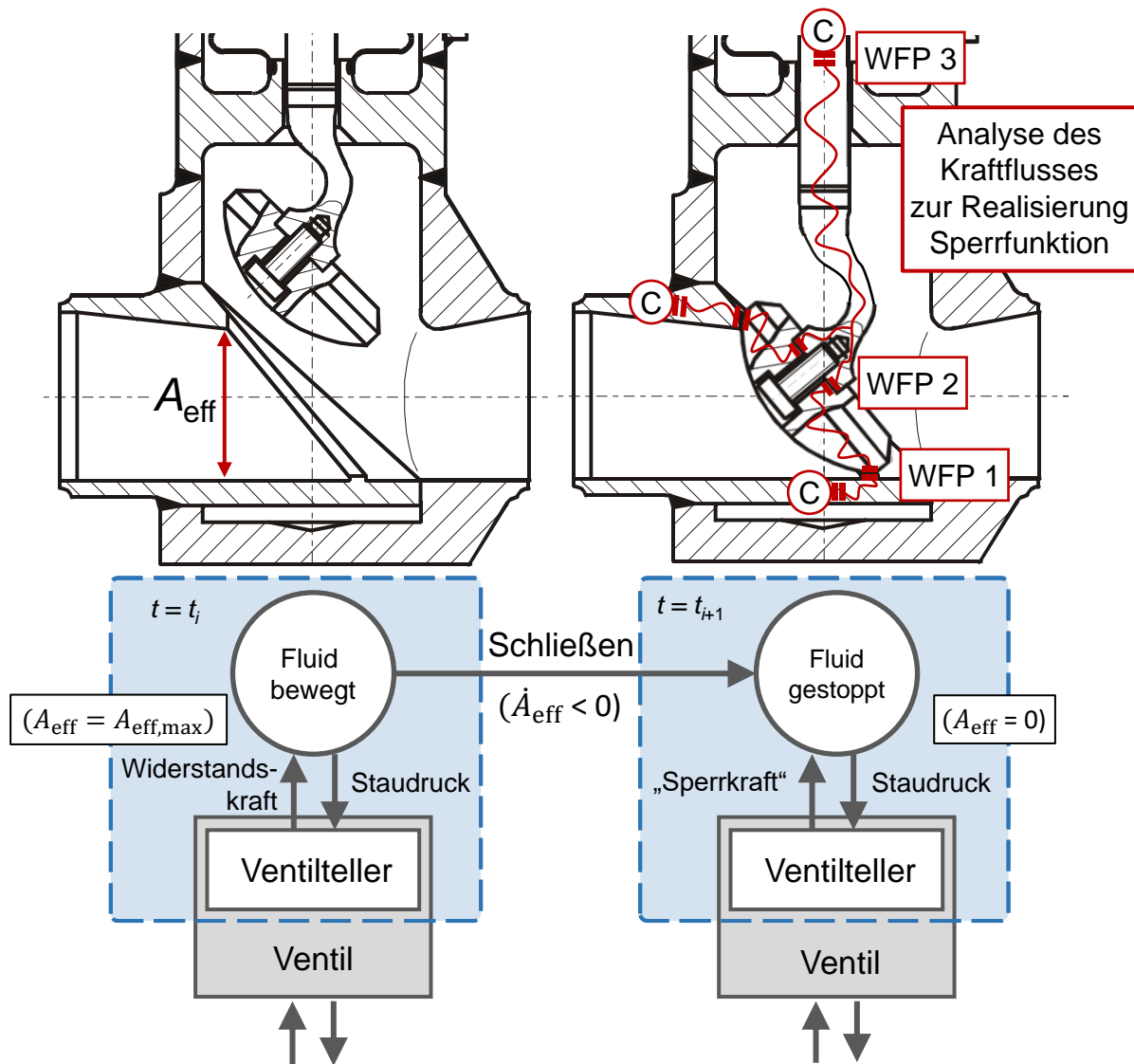


Abbildung 5.7: Relevante Zustände des Absperrventils

Analyse von Einsatzprozessen

Abbildung 5.8 zeigt das Absperrventil während der zwei ausgeprägten Zustände „Ventil geöffnet/geschlossen“. ³²⁵ Darin sind jeweils die relevanten Wirkräume für den Wirkzusammenhang verdeutlicht dargestellt. Im geöffneten Zustand fließt das Fluid auf Grund eines Druckgradienten in eingezeichnete Richtung. ³²⁶ Der Wirkraum ‘Ventil’ existiert gemäß der Definition von Wirkräumen auch im geöffneten Zustand, jedoch ist er während dieses Zustands nicht festkörpergefüllt, sodass der beabsichtigte Fluiddurchfluss ermöglicht wird.

³²⁵ Auf das Einzeichnen von Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen wird an dieser Stelle bewusst verzichtet, da in diesem Abschnitt der Fokus auf das Eintragen von Wirkräumen liegt.

³²⁶ Diese Annahme begründet sich infolge der festgelegten Systemgrenze.

Im Schließprozess wird durch eine äußere Kraft der feststoffgefüllte, blaue Ventilwirkraum des Operators translatorisch so lange nach unten bewegt, bis er den grünen Ventilwirkraum des Operanden vollständig einnimmt. Der Schließprozess endet mit dem Wirkraumkontakt zwischen 'Ventilteller' und 'Gehäuse' (WRK in Abbildung 5.8), wodurch der beabsichtigte Endzustand („Ventil geschlossen“) erreicht wird. Der Zustand wird durch eine entsprechende Anpresskraft aufrechterhalten und sichergestellt.³²⁷

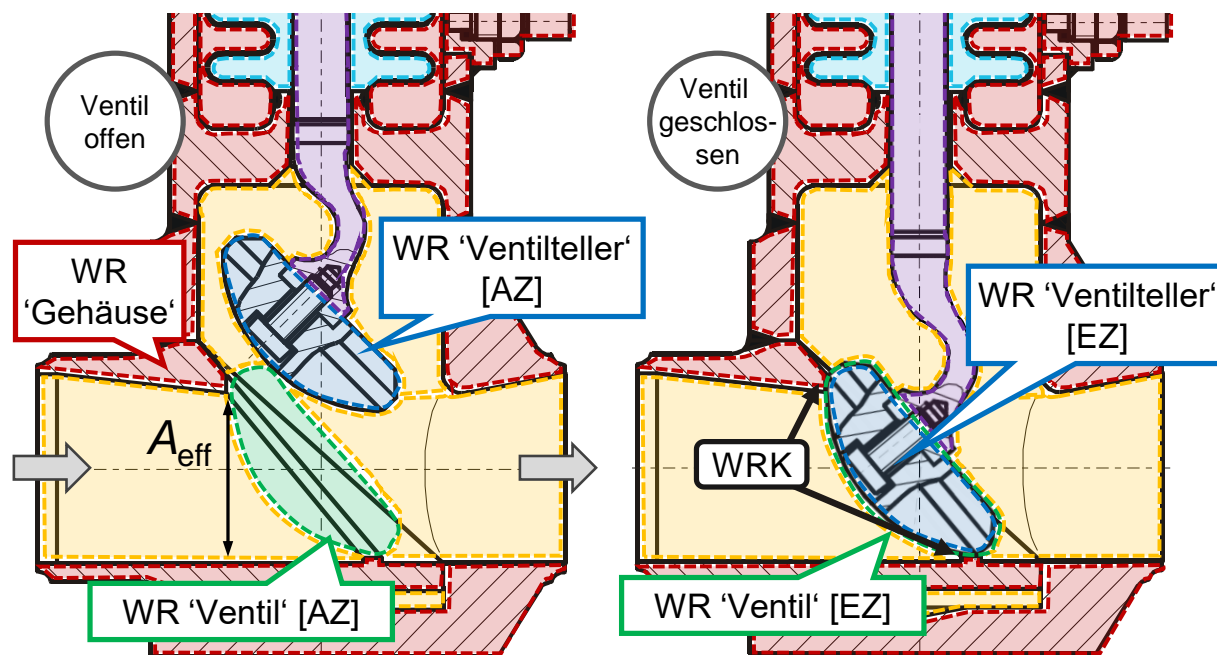


Abbildung 5.8: Wirkräume von Operand und Operator im offenen und geschlossenen Zustand (Ausschnitt)

Anhand dieser Erkenntnisse in Verbindung mit Abbildung 5.8 lässt sich der Zweck des Absperrventils alleine durch das Öffnen und Schließen des Wirkraums 'Ventil' festmachen, d. h. durch das Füllen eines zunächst nicht-feststoffgefüllten Wirkraums mit Hilfe eines Festkörpers. Bei der Gestaltung des Produkts wurde die Entscheidung getroffen, diese Funktion durch einen translatorisch bewegten, festkörpergefüllten Wirkraum ('Ventil', Operator) zu realisieren.

Analyse von Reinigungsprozessen

Neben den Einsatzprozessen sind bei hygienegerechten Produkten die Reinigungsprozesse von hoher Wichtigkeit. Sie transformieren das verschmutzte Produkt bzw. die verschmutzten Bauteile mit Hilfe geeigneter Wirkgrößen und Reinigungsfluide in einen gesäuberten Zustand, vgl. Abbildung 5.9. Bei Cleaning-in-Place Verfahren wird das Produkt ohne Demontage gereinigt, vgl. Abschnitt 5.1, während bei Cleaning-off-Place Verfahren ein zusätzlicher manueller Aufwand und (De-)Montage notwendig ist.

³²⁷ Auf die Analyse des Kraftflusses über die Spindel wird an dieser Stelle verzichtet, da sie nicht Schwerpunkt der Arbeit sind.

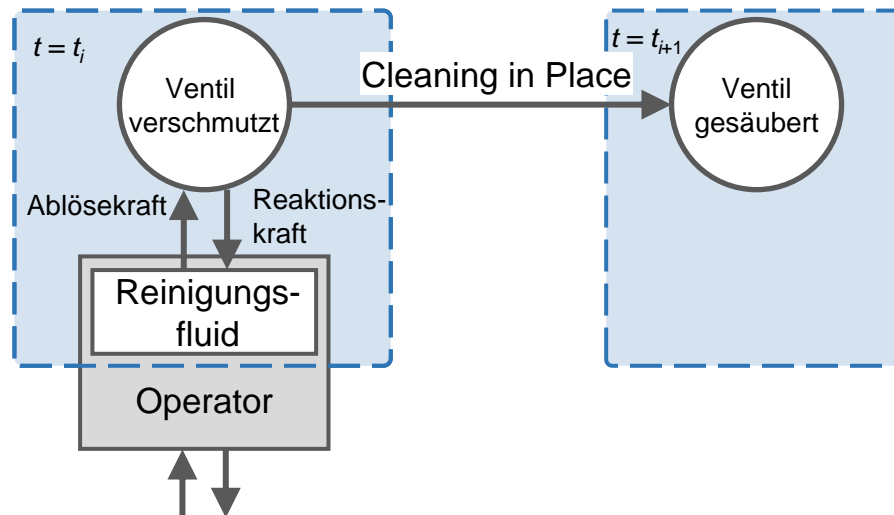


Abbildung 5.9: Systemzusammenhänge bei der CiP-Reinigung des Absperrventils

Abbildung 5.10 zeigt beispielhaft Zustände des Absperrventils, die für die Reinigungsprozesse von Relevanz sind. Im verschmutzten Zustand haftet Fluid, welches im Einsatzprozess durch das Ventil geleitet wird, auf Grund von Adhäsionskräften an verschiedenen Bauteilen.

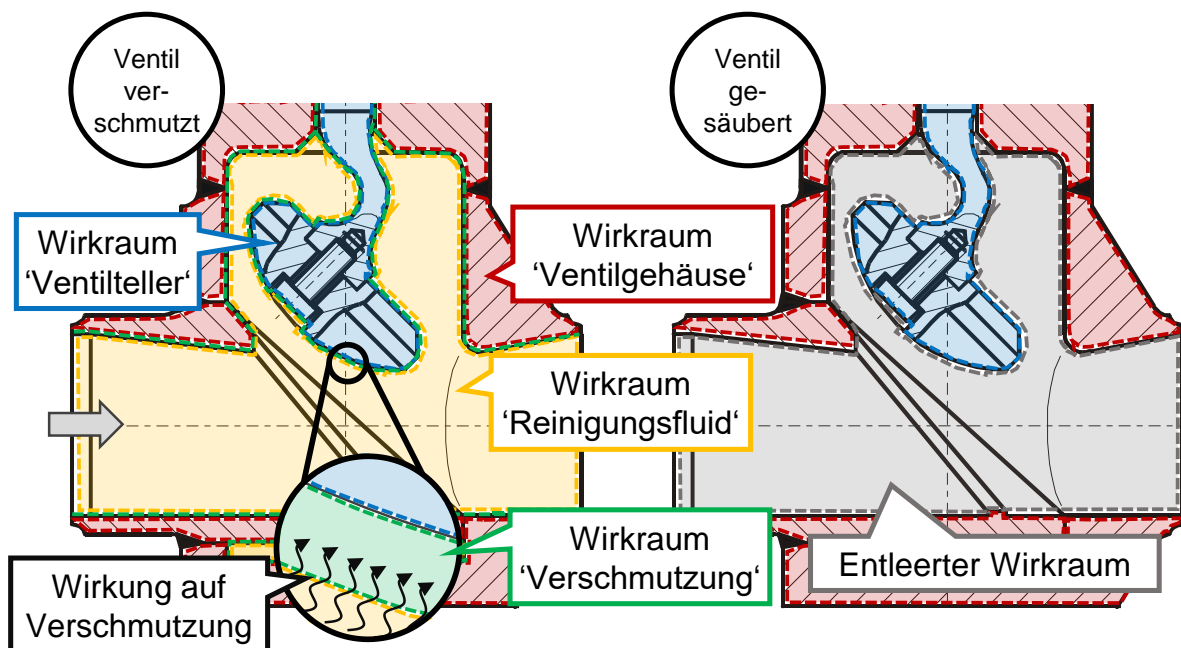


Abbildung 5.10: Wirkräume des Systems während der Reinigung (Ausschnitt)

Anhaftendes Fluid bildet den Inhalt eines Wirkraums und haftet an den in Kontakt stehenden Bauteilen. Die Aufgabe des Reinigungsprozesses ist es, die gebildeten Kontakte zwischen Verschmutzung und Bauteilen mit Hilfe geeigneter Wirkgrößen („Ablösekraft“) zu lösen, ohne die Eigenschaften umliegender Bauteile zu beeinflussen, und anschließend die Verschmutzung abzutransportieren. Im beabsichtigten Endzustand des Reinigungsprozesses sind alle Kontakte zwischen Ventilbauteilen und Verschmutzung gelöst, alle

Partikel, die zur Verschmutzung beitragen, sowie das Reinigungsfluid selbst durch geeigneten Wirkgrößen, beispielsweise durch Gravitation oder Luftdruck, abtransportiert.

5.4.2 Nutzung des Wirkraummodells zur Analyse unbeabsichtigter Prozesse und Ermittlung von Nicht-Funktionen

Für hygienegerechte Produkte stellt das Verhindern unbeabsichtigter Prozesse gemäß Abschnitt 5.2 eine wichtige Voraussetzung für die Vermeidung einer Kontamination dar. Beabsichtigte Prozesse basieren auf der Realisierung von beabsichtigten Funktionen, die im Gestalt-Funktionszusammenhang als Interaktion zweier benachbarter Elemente gekennzeichnet ist und aus mindestens zwei WFP, der verbindenden LSS, und zwei Connectoren besteht. Wirkflächenpaare existieren nur während der Funktionserfüllung und ermöglichen in dieser Zeit das Übertragen von Energien, Stoffen oder Signalen.

Mit Hilfe des C&C²-Ansatz ist jedoch das Identifizieren von Nicht-Funktionen jedoch bislang nicht möglich. In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, wie mit Hilfe des Wirkraummodells diese Lücke geschlossen werden kann indem, aufbauend auf dem geklärten Gestalt-Funktionszusammenhang beabsichtigter Funktionen aus Abschnitt 5.4.1, Nicht-Funktionen als Auslöser unbeabsichtigter Prozesse identifiziert werden.

Zur Identifizierung von Nicht-Funktionen soll die Wirkraumeinteilung aus Abschnitt 5.4.1 herangezogen werden. Abbildung 5.11 zeigt das Flussdiagramm für die Beurteilung der aus Abschnitt 5.4.1 bestimmten Wirkräume. Für jeden Wirkraum WR_k gilt es nacheinander alle Wirkraumflächen in Bezug auf das Ermöglichen von beabsichtigten Stoff-, Energie bzw. Signalflüssen als Basis zur Erfüllung beabsichtigter Funktionen zu beurteilen.

Werden über eine Wirkraumfläche WRF_i nur beabsichtigte Flüsse ermöglicht, so wird diese Wirkraumfläche als unkritisch hinsichtlich der Existenz einer Nicht-Funktion beurteilt. Kritisch hingegen sind Wirkraumflächen zu beurteilen, welche unbeabsichtigte Flüsse zulassen, d. h. dementsprechend zu einer Nicht-Funktion beitragen. Nicht-Funktionen sind dadurch geprägt, dass, im Gegensatz zur Erfüllung zu beabsichtigten Funktionen, keine Wirkflächenpaare zur Verhinderung einer unbeabsichtigten Wirkung existieren und dadurch die Basis zur Auslösung unbeabsichtigter Prozesse darstellen.

Daneben existieren ebenfalls WRF, über die weder beabsichtigte noch unbeabsichtigte Stoff-, Energie- oder Signalflüsse geleitet werden. Diese WRF sind hinsichtlich des Ermöglichens unbeabsichtigter Prozesse ebenfalls nicht von Relevanz, da für unbeabsichtigte Prozesse gemäß den Definitionen aus Abschnitt 4.2 stets Wirkgrößen, beispielsweise Energieflüsse, benötigt werden.

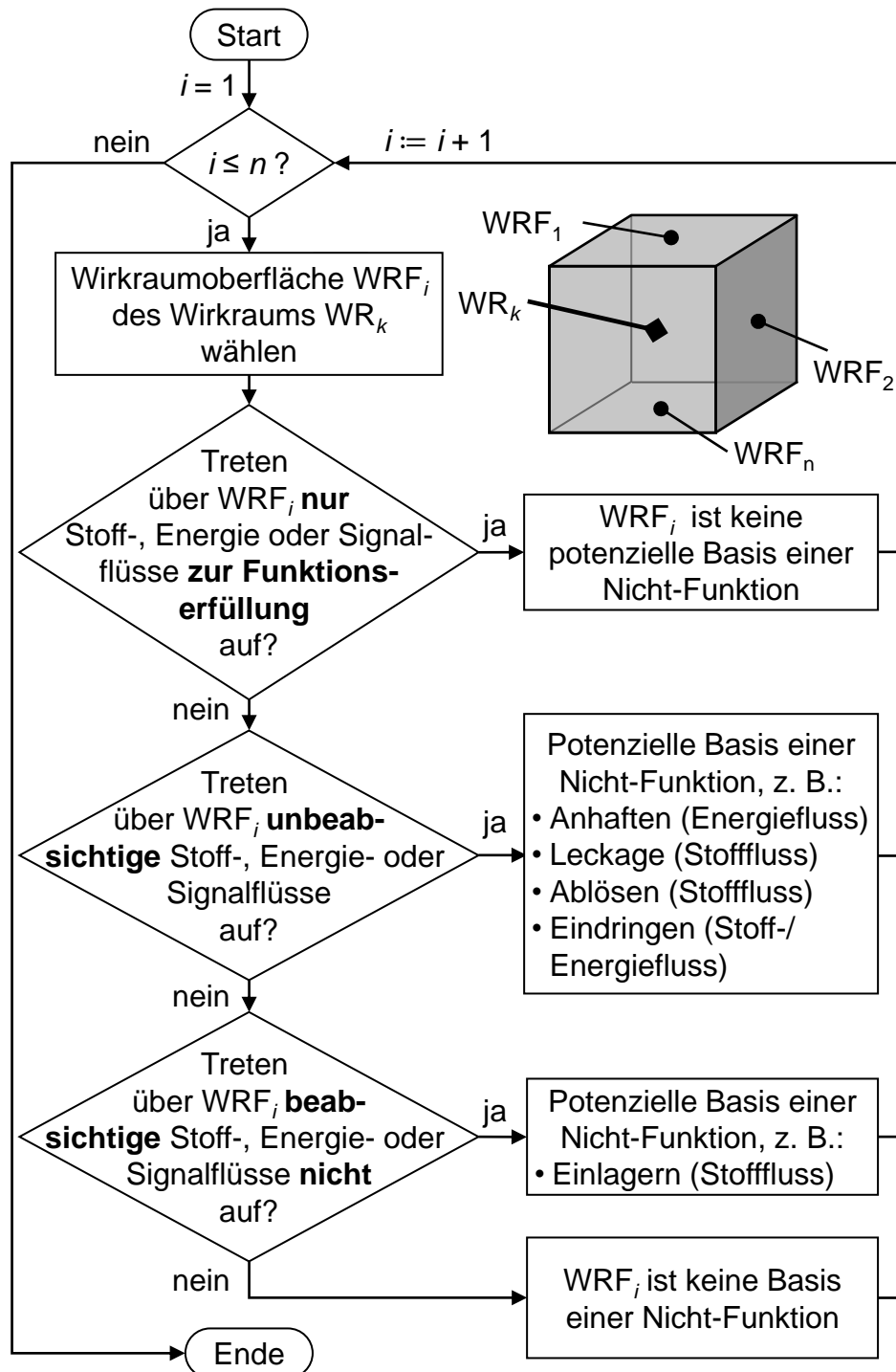


Abbildung 5.11: Flussdiagramm zur Einstufung von Wirkraumflächen hinsichtlich dem Ermöglichen von Nicht-Funktionen im Bereich hygienegerechter Produkte

Untersuchung unbeabsichtigten Anhaftens

Grundvoraussetzung für unbeabsichtigtes Anhaften stellen, wie Abbildung 5.12 zeigt, benachbarte Wirkräume dar, deren Inhalte über ihre Oberflächen in Kontakt stehen. Ohne Kontakt zweier Haftpartnern ist ein Anhaften beispielsweise eines Fluids an einer Bauteilfläche nicht möglich, vgl. Abschnitt 5.3. Gemäß dem Flussdiagramm aus Abbildung

5.11 treten durch unbeabsichtigtes Anhaften zwischen den Inhalten der Wirkräume unbeabsichtigte Energieflüsse auf, wodurch die fehlende Funktion zur Verhinderung des Anhaftens ermöglicht wird. Zur Identifizierung relevanter Wirkräume und Wirkraumflächen zwischen deren Inhalte ein Anhaften auftreten kann, wird zunächst auf die identifizierten Systemzustände und Prozesse sowie die gebildeten Wirkraummodelle zur Analyse der beabsichtigten Prozesse aus Abschnitt 5.4.1 zurückgegriffen. Die gebildeten Wirkraummodelle können für eine genauere Analyse der unbeabsichtigten Prozesse, wie das unbeabsichtigte Anhaften, angepasst oder detailliert werden, da beispielsweise weitere Gestaltdetails von Relevanz sein können.

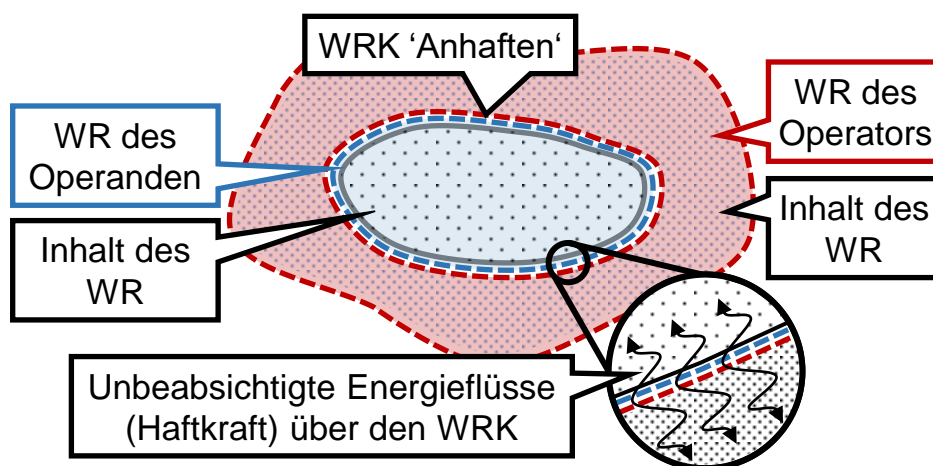


Abbildung 5.12: Kontakt zwischen Operand und Operator als notwendige Voraussetzung unbeabsichtigten Anhaftens

Es bietet sich an, in bestehenden Wirkraummodellen zunächst alle Wirkräume bzw. Wirkraumflächen zu identifizieren, durch die unbeabsichtigte Energieflüsse in Form einer Haftkraft ein potentielles Anhaften ermöglichen. Hierzu gilt es alle Wirkräume in Betracht zu ziehen, in denen mit einem Anhaften von zwei Haftpartnern zu rechnen ist. Dabei spielt es im Zuge dieses Arbeitsschrittes zunächst keine Rolle, ob in einem realen System auf Grund tatsächlich ein Anhaften entsteht. Vielmehr bieten die identifizierten Oberflächenkontakte die Grundlage für einen anschließenden Bewertungsprozess, in dem mittels Expertenwissen, Experimente, Simulationen o. ä. ermittelt werden muss, inwiefern diese Oberflächenkontakte ein Anhaften bedingen.

Das Beispiel des Absperrventils in Abbildung 5.13 zeigt verschiedene potentielle Oberflächenkontakte zwischen Fluid und Operator, die zu einem unbeabsichtigten Anhaften führen können.³²⁸ Sowohl im geöffneten, als auch im geschlossenen Ventilzustand besteht anhand des WRK 1 das Potential des unbeabsichtigten Anhaftens von Fluid, wobei

³²⁸ Aus Gründen der Übersicht sind in Abbildung 5.13 nur einige potentielle WRK dargestellt.

die Werkstoff³²⁹- und Geometrieigenschaften der Wirkrauminhalte und Prozess-Eigenschaften den Umfang des unbeabsichtigten Anhaftens bestimmen.

Während des geöffneten Zustands ist der Wirkraum des Ventiltellers vom Wirkraum des Fluids vollständig umgeben, sodass der Ventilteller vom Fluid benetzt wird (WRK 2AZ). Das Benetzen geschieht nicht beabsichtigt und trägt nicht zu einem beabsichtigten Prozess bei, wird jedoch nicht gänzlich verhindert, da der Ventilteller verfahrensprinzipbedingt vom Wirkraum des Fluids umgeben wird. Da das Benetzen nicht der Funktionserfüllung im geöffneten Zustand dient, wird es als *unbeabsichtigtes Anhaften* deklariert. Im geschlossenen Zustand stellt WRK 2EZ jedoch eine notwendige Voraussetzung für die Erfüllung der Dichtfunktion dar, vgl. Abschnitt 5.4.1. Anhand dieses Kontakts wird ersichtlich, dass für die Analyse von Systemen stets die Betrachtung aller Systemzustände notwendig ist, da bestimmte Wirkraumkontakte während einzelner Systemzustände zur Funktionserfüllung beitragen, während sie zu anderen Zuständen unbeabsichtigte Prozesse hervorrufen.

Existiert während des geöffneten Zustands an WRK 3EZ oder WRK 4EZ ein Energiefluss zwischen den beteiligten Wirkräumen, welches zum Anhaften des Fluids am Ventilsitz bzw. am Ventilteller führt, kann die Funktionserfüllung des Ventils im geschlossenen Zustand nicht sichergestellt werden. Das anhaftende Fluid verhindert oder schränkt die Bildung eines Wirkflächenpaars zwischen Ventilteller und Ventilsitz ein. Hierdurch wird die Wahrscheinlichkeit einer Leckage vergrößert, sodass das Produkt ab einer bestimmten zulässigen Leckagemenge die Anforderungen nicht mehr erfüllt. Dies verdeutlicht, dass hygienerelevante Schwachstellen neben der Kontaminationsentwicklung auch zur Verhinderung der beabsichtigten Produktfunktion beitragen.

Weitere Wirkraumkontakte, welche zu unbeabsichtigtem Anhaften führen können stellen WRK 5 und 6 dar. Wirkraumkontakt 5 zwischen Spindel und Fluid wird durch die im Fluid befindliche Spindel, welche jedoch zur Dichtfunktionserfüllung notwendig ist, hervorgerufen.

Unbeabsichtigtes Anhaften infolge von Haftkräften beschränkt sich zudem nicht nur auf Bereiche des Systems, in denen sich das Fluid beabsichtigt befindet. Ein Beispiel hierfür stellt WRK 6 dar, welcher erst durch das unbeabsichtigte Austreten des Fluids in den Faltenbalg ermöglicht wird. Der Faltenbalg verhindert beabsichtigt das Austreten von Fluid in die umgebende Bereiche in der Ventilbaugruppe, wodurch jedoch durch den Kontakt mit Fluid unbeabsichtigtes Anhaften resultieren kann.

³²⁹ An dieser Stelle sei auf die Nanotechnologie (mit dem sogenannten „Lotuseffekt“ als bekanntestes Beispiel) als Zukunftstechnologie verwiesen, vgl. Frede (2010), S. 992-993.

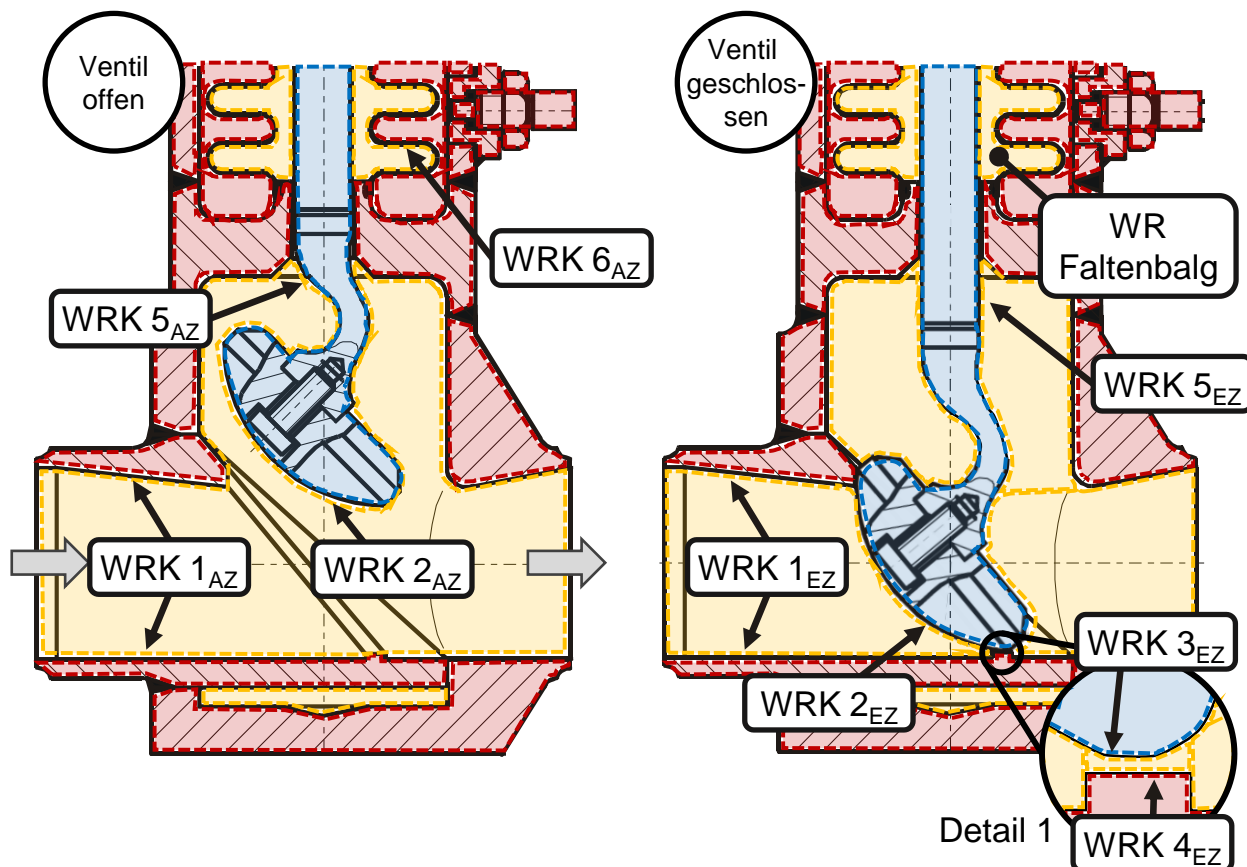


Abbildung 5.13: Auswahl potentieller zum Anhaften führender Bereiche

Ermittlung unbeabsichtigten Einlagerns in Toträume

Toträume sind Bereiche, die keine Wirkung zur Erfüllung beabsichtigter Prozesse beitragen und sind dadurch charakterisiert, dass sie einen beabsichtigten Stoffstrom im Bereich des Totraums *nicht* ermöglichen. Sie sind daher als Nicht-Funktion die Basis für unbeabsichtigte Prozesse, wie z. B. das unbeabsichtigte Einlagern von Lebensmittel oder anderer Fluide in Bereiche der Maschine, welche nicht oder nur mit erhöhtem Aufwand gereinigt werden können.

Bereiche stellen erst Toträume dar, sofern zwischen Operand und Operator an dieser Stelle Wirkraumkontakte gebildet werden und ein Stoffstrom unbeabsichtigt während eines definierten Zeitintervalls über eine entsprechende WRF in den Totraum einströmt und eingedrungener Stoff aus ihm nicht austreten kann, vgl. Abbildung 5.14. Zur Identifizierung von Wirkräumen, in die ein unbeabsichtigtes Eindringen und Einlagern auftreten kann, müssen sämtliche Systemzustände und Prozesse des Systems bei der Analyse berücksichtigt werden, da einige Toträume nicht permanent existieren und teilweise von den umliegenden Strömungsbedingungen abhängen, wie beispielsweise in Abbildung 5.14a, wohingegen der Totraum in Abbildung 5.14b permanent besteht.

Zur Ermittlung unbeabsichtigten Einlagerns empfiehlt sich das Eintragen aller potentiellen Toträume während sämtlicher Systemzustände, sodass diese in einem anschließenden

Bewertungsprozess hinsichtlich ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit, ihrer Reinigbarkeit oder anderer Kriterien eingestuft werden können.

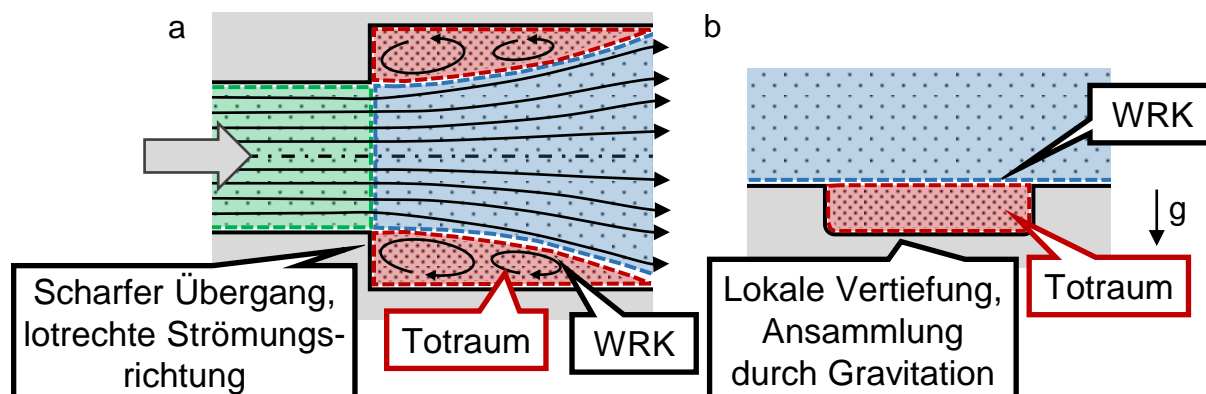


Abbildung 5.14: Toträume als notwendige Voraussetzung unbeabsichtigten Einlagerns

Am Beispiel des Absperrventils sind in Abbildung 5.15 verschiedene Toträume zu identifizieren. Ein unbeabsichtigter Stoffstrom tritt beispielsweise durch WRK 1 in Totraum 1 und über WRK 2 schließlich in Totraum 2, vgl. Abbildung 5.15, Detail 1. Beide Toträume resultieren aus der gewählten Gestalt der Rohrverbindungen, welche für die Funktionserfüllung des Ventils nicht von Bedeutung ist, und sind somit als potentielle Toträume zu deklarieren, da ein definiertes Herausfördern des eingedrungenen Stoffes nicht ermöglicht wird.

Im geöffneten Ventilzustand stellt der Rückzugsraum für den Ventilteller den potentiellen Totraum 3 dar, welcher über WRK 3 mit dem Fluidstrom in Verbindung steht. In Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit, des Rohrdurchmessers und den Abmaßen des Rückzugsraums bildet sich ein entsprechender Totraum aus, aus dem das Herausfördern von eingedrunenem Fluid während des geöffneten Zustands nicht ermöglicht wird.³³⁰ Im geschlossenen Zustand trägt Totraum 3 zu keiner Funktionserfüllung bei, d. h. Totraum 3 wird für diesen Zustand nicht benötigt.

Die reibkraftschlüssige Verbindung zwischen Ventilteller und Spindel wird durch eine Schraubverbindung realisiert. Da zwischen Schraubenkopf und Auflage ohne Verwendung von Dichtungen stets ein Spalt besteht, stellt die Sacklochbohrung in Detail 2 von Abbildung 5.15 den potentiellen Totraum 4 dar, welcher durch WRK 4 mit dem angestauten Fluid in Kontakt steht. Insbesondere im geschlossenen Zustand ist ein Eindringen von Fluid durch den vorherrschenden Druck, vgl. Abschnitt 5.4.1, in den Totraum möglich. Die unzugängliche Lage des Totraums erschwert die Reinigung dieses Bereichs. Dieser Totraum resultiert also aus der gewählten Verbindungsart zwischen Ventilteller und Spindel.

³³⁰ Vgl. Graßhoff (1996), S. 105-114.

Der Faltenbalg des Ventils dient zum hermetischen Dichten des Ventils gegenüber angrenzender Bereiche des Ventils bzw. der Umgebung. Die translatorische Spindelbewegung während des Öffnens und Schließens des Ventils und die Veränderung des Faltenbalgvolumens³³¹, d. h. des Volumens des Wirkraums, befördern unbeabsichtigt Fluid durch den Spalt zwischen Spindel und Gehäuse über WRK 5 in Totraum 5, wodurch das Fluid im Faltenbalg eingelagert wird. Das Abfließen des Fluids wird durch die Größe des Spalt-Wirkraums, die Eigenschaften des Fluids sowie die Werkstoffeigenschaften beeinflusst. Die horizontalen Flächen des Faltenbalgs erschweren zudem das Selbstabfließen des Fluids. Da das Abfließen des Fluids nicht eindeutig und definiert ermöglicht wird, stellt dieser Bereich ebenfalls einen potentiellen Totraum dar.

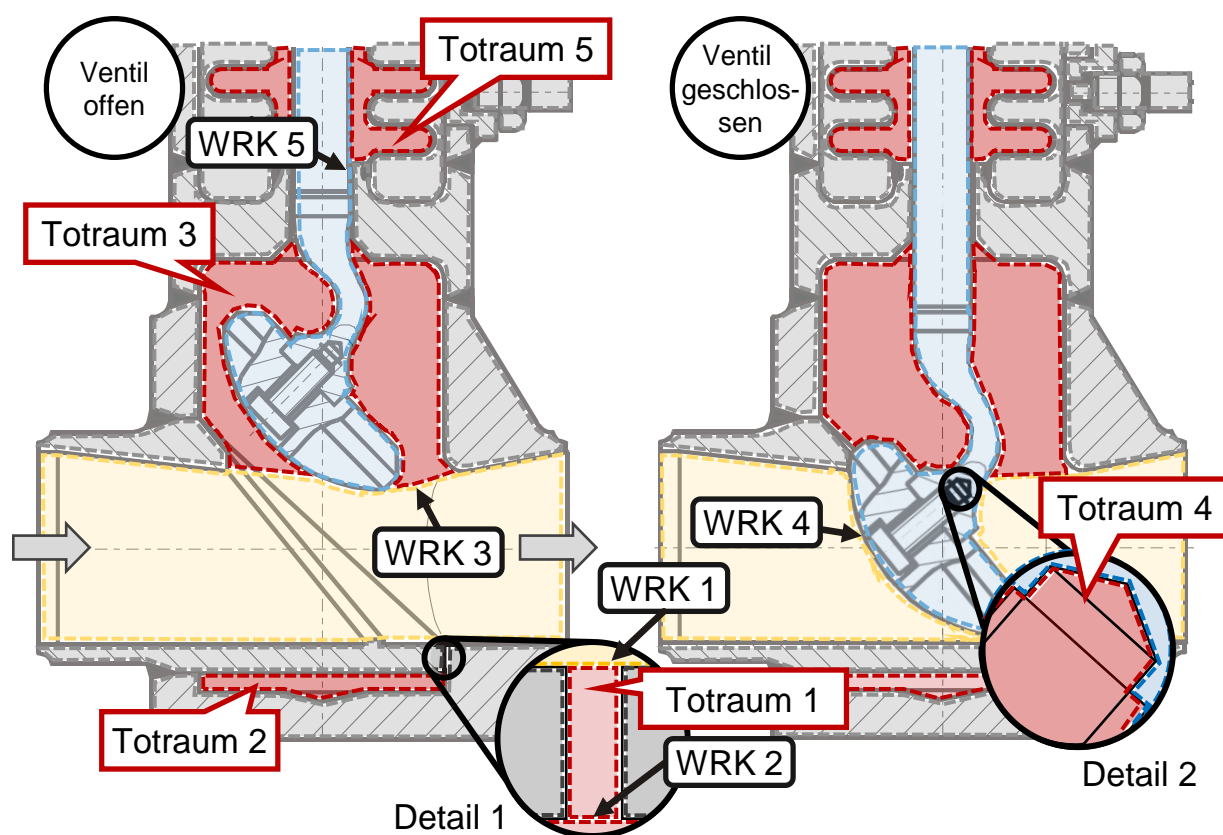


Abbildung 5.15: Auswahl potentieller Toträume im Absperrventil

Identifizieren von Leckage

Die notwendige Bedingung für Leckage, d. h. für unbeabsichtigten Stofftransport, stellen Leckagewirkräume dar, welche Wirkräume, deren Verbindung nicht beabsichtigt ist, verbinden, vgl. Abbildung 5.16, wobei die einzelnen Wirkräume über ihre Oberflächen in Verbindung stehen. Die durch Leckagewirkräume verursachte Nicht-Funktion betrifft das

³³¹ Das Volumen des Faltenbalgs vergrößert sich während des Öffnungsprozesses, wodurch eine Ansaugwirkung resultiert, vgl. Abbildung 5.5.

fehlende Zurückhalten von Stoffen, sodass Leckage als Konsequenz auftritt. Zur Eruiierung relevanter Wirkräume bzw. Wirkraumkontakte für die Leckage bietet sich das Zurückgreifen auf bereits erarbeitete Wirkraumeinteilungen des Systems an, vgl. Abschnitt 5.3. Leckagewirkräume für potentiellen, unbeabsichtigten Stofftransport sind darüber charakterisiert, dass sie Wirkräume, in denen sich beispielsweise Fluid beabsichtigt befindet, mit Wirkräumen verbindet, welche keine beabsichtigte Fluidfüllung aufweisen.

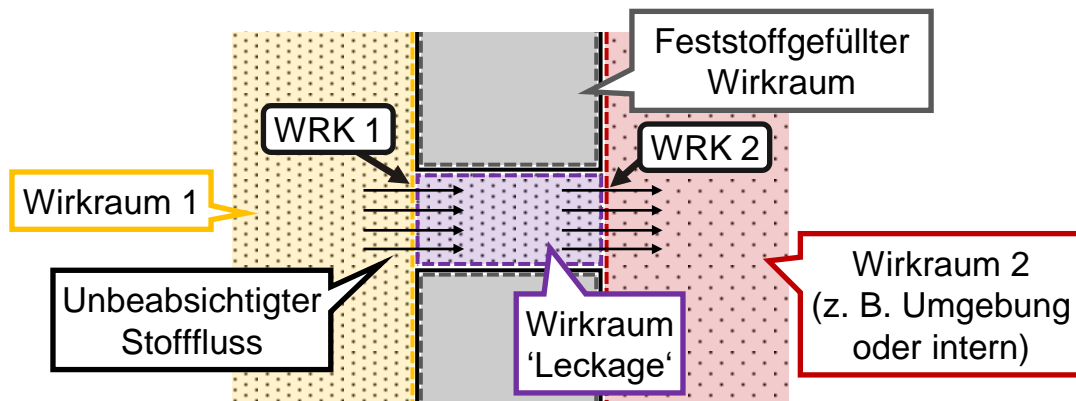


Abbildung 5.16: Leckagewirkraum als Basis für unbeabsichtigtes Austreten

Die alleinige Existenz von Leckagewirkräumen bewirkt zwar keine direkte Leckage bzw. keinen Austausch zwischen angrenzenden Wirkräumen, sie sind jedoch im Zuge der qualitativen Analyse zu identifizieren und stellen potentielle Ursachen für Leckage dar. Durch die Angabe von Zustandseigenschaften angrenzender Wirkräume und auftretender Kräfte wird die Grundlage für eine Beurteilung der Leckage, beispielsweise durch darauffolgende Simulationen, geschaffen. Entscheidend sind hierbei die Geometrieigenschaften (z. B. die Maße) des Leckagewirkraums, Eigenschaften der Bewegung angrenzender Körper sowie Systemeigenschaften wie Temperaturgradienten, Druckunterschiede bzw. äußere Kräfte³³², die es bei der Bewertung von potentiellen Leckagewirkräumen heranzuziehen gilt.

Am Beispiel des Absperrventils sollen drei unterschiedliche Leckagewirkräume näher erläutert werden. Detail 1 in Abbildung 5.17 zeigt einen wirkprinzipbedingten Wirkraum zwischen der Spindel und der Führung im Gehäuse. Um eine Relativbewegung an der Stelle zu realisieren wird ein Spalt benötigt, der die beiden Bauteile voneinander trennt. Dieser Wirkraum 'Leckage 1' stellt jedoch eine Verbindung zwischen Wirkraum 'Fluid' und 'Balg' dar und kann daher Basis für unbeabsichtigten Stofftransport sein. Bedingt durch die Wirkbewegung der Spindel und der Volumenänderung des Balgs im Öffnungsprozess erhöht sich die Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten Herausforderns von Fluid durch den Wirkraum 'Leckage 1' aus dem Fluid-Wirkraum.

³³² Vgl. Stephan et al. (2013), S. 535; Spurk, Aksel (2010), S. 117-120.

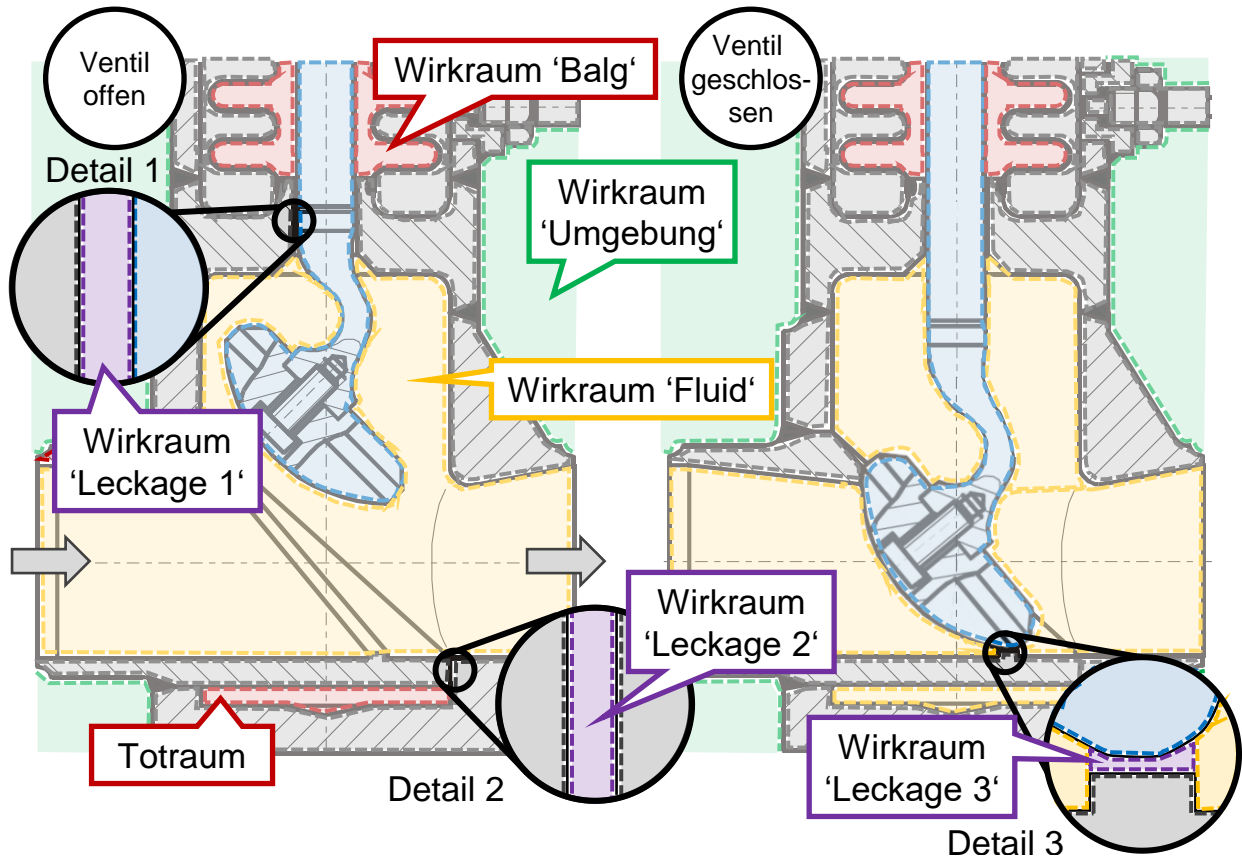


Abbildung 5.17: Unbeabsichtigtes Austreten am Absperrventil infolge existierender Leckagewirkräume

Detail 2 zeigt einen weiteren Leckagewirkraum, der durch die gewählte Verbindungart von Rohr und Ventilgehäuse existiert und den Wirkraum 'Fluid' mit dem unteren Totraum verbindet. In Abhängigkeit der Eigenschaften der Geometrie des Leckagewirkraums, der Eigenschaften des Fluids wie Viskosität und des Rohrinnendrucks sowie von außen wirkende Gravitationskraft, gelangt Fluid durch den Leckagewirkraum in den Totraum.

Detail 3 verdeutlicht das unbeabsichtigte Austreten im geschlossenen Zustand durch Wirkraum 'Leckage 3'. Bilden der Ventilteller und der Ventilsitz kein gleichmäßig ausgeprägtes Wirkflächenpaar über den gesamten Umfang zur Realisierung der Dichtfunktion, existiert ein Leckagewirkraum. In Abhängigkeit des Staudrucks auf der Druckseite des Ventils sowie Eigenschaften der Wirkraumgeometrie und Eigenschaften des Fluids entsteht Leckage, welche zu Abweichungen der Soll-Eigenschaften des Fluids im Endzustand des Prozesses führt.

Ursache für unbeabsichtigtes Austreten von Fluid aus der Maschine in die Umgebung stellen beispielsweise fehlerhafte Schweißverbindungen des Gehäuses dar. Existieren Unterbrechungen bzw. Fehlstellen bei den Schweißnähten, bedingt dies ein fehlendes Zurückhalten des Fluids und führt durch Leckagewirkräume dazu, dass Fluid unbeabsichtigt austreten kann. Ob derartige Leckagewirkräume in der Schweißnaht auftreten, gilt es im Zuge des anschließenden Bewertungsprozesses zu beurteilen.

Erkennen unbeabsichtigten Ablösens

Unbeabsichtigten Ablösens wird stets durch Nicht-Funktionen, d. h. durch fehlende Funktionen zur Verhinderung des Ablösens, ausgelöst. Abbildung 5.18 zeigt beispielhafte Situationen, welche zu einem unbeabsichtigten Ablösen von Partikeln beitragen. Die dargestellten Wirkbewegungen stehen stellvertretend für eine Reihe weiterer Wirkbewegungen, die ebenfalls potentielle Ursachen für unbeabsichtigtes Ablösen darstellen.³³³

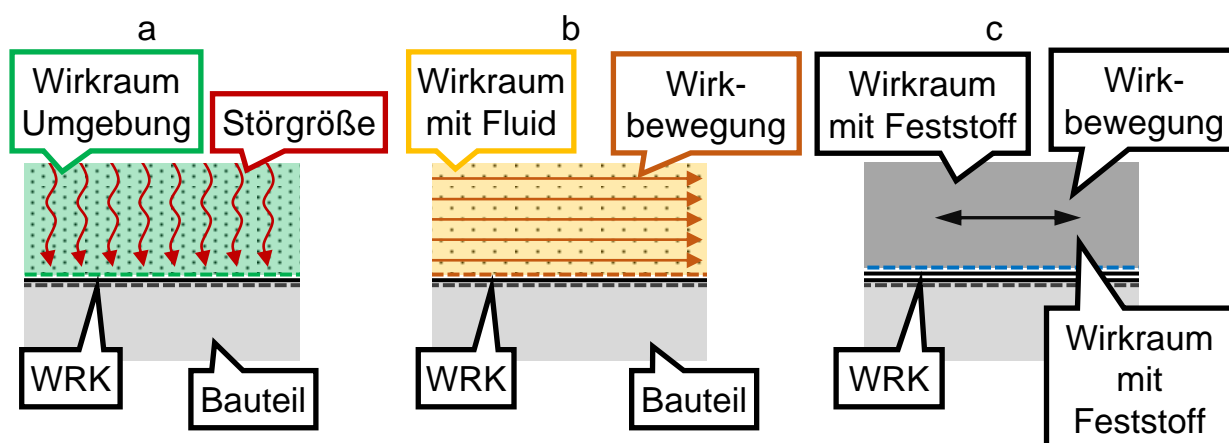


Abbildung 5.18: Beispielhafte Situationen unbeabsichtigten Ablösens

Damit infolge des unbeabsichtigten Ablösens die Wahrscheinlichkeit einer Kontamination steigt, müssen die abgelösten Partikel in hygienekritischen Bereich gelangen, beispielsweise in das zu verarbeitende Lebensmittel oder im Bereich des allgemeinen Maschinenbaus in Bereiche, welche funktionsbedingt keine Fremdpartikel aufweisen dürfen. Entstehen Partikel in Bereichen, die hinsichtlich des Partikelauftretens unproblematisch sind, ist das Ablösen von Partikeln weniger kritisch zu bewerten.

Das Absperrventil in Abbildung 5.19 ist in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen verschiedenen Störgrößen ausgesetzt, welche unabhängig von den Ventilzuständen sind. Unerwünschte Prozesse, die durch Störgrößen wie Sonneneinstrahlung oder widrige Umgebungseinflüsse bedingt sind, werden durch den Kontakt von Umgebung und dem Operanden ausgelöst, vgl. Abbildung 5.18a. Durch Wirkraumkontakt 1 in Abbildung 5.19 wird ein unbeabsichtigter Energiefluss der Umgebung auf den Bauteilwerkstoff ermöglicht, durch WRK 2 ein unbeabsichtigter Energiefluss auf die Schweißverbindung. Detaillierte Ursachen und Auswirkungen von Alterungs-, Verschleiß- und anderen unerwünschten Prozessen durch Störgrößen sind abhängig von den Eigenschaften der beteiligten Werkstoffe und Störgrößen³³⁴ und können durch Unsicherheitsanalysen, beispielsweise durch die UMEA³³⁵, untersucht werden.

³³³ Vgl. Habig, Woydt (2014), Tabelle S. E91.

³³⁴ Vgl. Klocke, König (2008), S. 75.

³³⁵ Vgl. Engelhardt (2012), S. 55ff.

Unbeabsichtigte Flüsse zwischen dem Fluid und dem Ventil basieren auf Wirkraumkontakten, wie beispielsweise WRK 4, WRK 5 und WRK 6, an welchen, in Abhängigkeit von Prozesseigenschaften, wie z. B. Temperatur, Fließgeschwindigkeiten, Art der Strömung sowie der Eigenschaften der beteiligten Wirkräume, wie z. B. Werkstoff des Operanden, Art des zu verarbeitenden Fluids, unbeabsichtigtes Ablösen von Partikeln auftritt, vgl. Abbildung 5.18b.

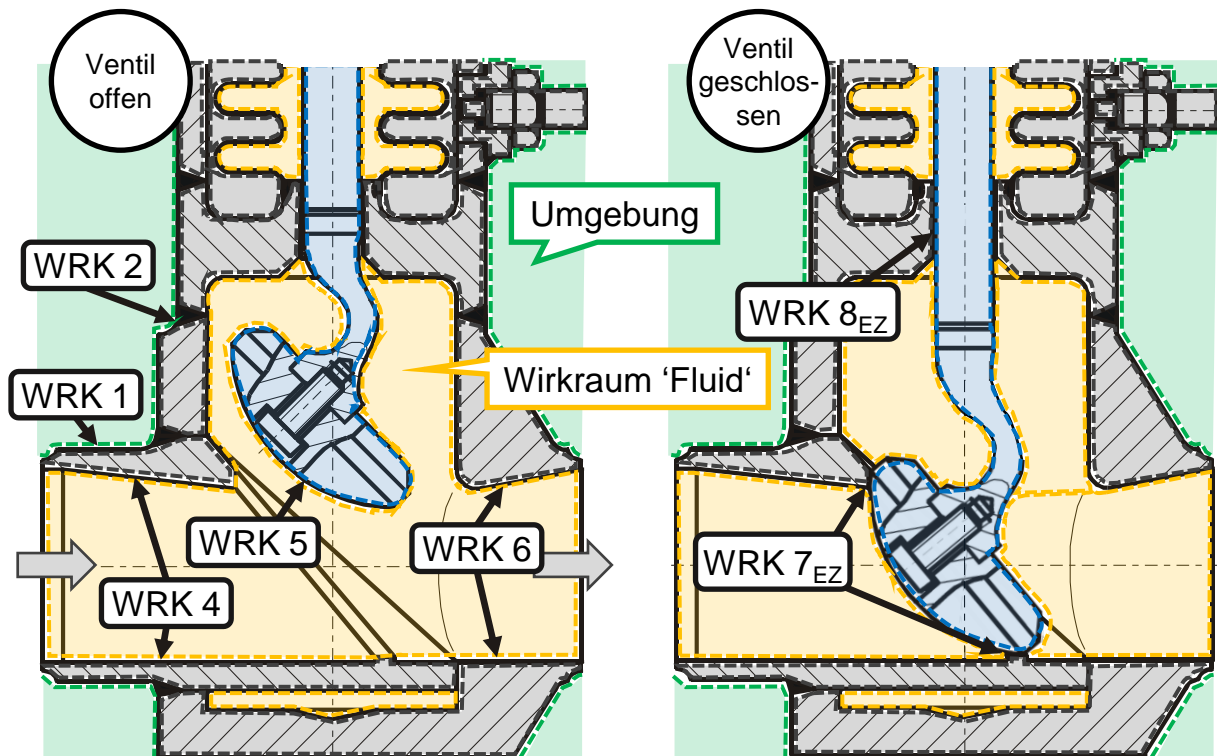


Abbildung 5.19: Auswahl potentieller zum Ablösen führender Wirkraumkontakte

Im Zuge des Schließprozesses wird der Ventilteller durch Translation der Spindel in den Ventilsitz bewegt. Durch einen Versatz zwischen Spindelmittellinie und Ventiltellermitte wird an jeder Stelle über den Umfang des Ventilsitzes eine gleichmäßige Pressung erreicht.³³⁶ Das zusätzliche Drehmoment kann zur Relativbewegung zwischen Ventilteller und Ventilsitz führen, welche über WRK 7_{EZ} in Abhängigkeit der Eigenschaften der Werkstoffoberflächen zu unbeabsichtigten Ablösen von Partikeln durch Verschleiß führt, vgl. Abbildung 5.18c.

Die auf den Ventilteller wirkenden Kräfte werden über die Spindelführung in das Gehäuse geleitet. Durch den Bauteiloberflächenkontakt und in Abhängigkeit der Eigenschaften der Werkstoffoberflächen entsteht Reibung und erhöht die Wahrscheinlichkeit unbeabsichtigten Verschleißes. Der Wirkraum des Fluids ist in direktem Kontakt mit dem Entstehungsort der Partikel, wodurch diese Partikel zu einer Kontamination des Fluids führen.

³³⁶ Vgl. VDI 2223 (2004), S. 33.

Identifizierung der Ursachen des Eindringens von Fremdstoffen und weiteren Störgrößen

Grundvoraussetzung für das Eindringen von Störgrößen in das System ist das Vorhandensein von Störgrößen in der Systemumgebung. Ohne Größen, die das System beeinflussen, ist eine derartige Kontaminationsentstehung nicht möglich. Weiterhin bedarf es für eine negative Beeinflussung einen Kontakt zwischen dem Inhalt des Wirkraums der Umgebung, von welchem die Störgrößen ausgeht, und dem Inhalt des Wirkraums, die von der Störgröße nicht beabsichtigt beeinflusst werden sollen. Dabei existieren Gestalt-Anordnungen, die einen unmittelbaren Störgrößeneinfluss implizieren, Abbildung 5.20a, sowie Gestalt-Anordnungen, die durch einen mittelbaren Störgrößeneinfluss charakterisiert sind, Abbildung 5.20b.

Bei Gestalt-Anordnungen mit *unmittelbarem* Störgrößeneinfluss bilden Umgebung und Wirkräume, deren Inhalte keine unbeabsichtigte Störgrößeneinfluss erfahren sollen, Wirkraumkontakte ohne Zwischenelemente, sodass beispielsweise Fremdkörper direkt in das zu verarbeitende Lebensmittel gelangen. Gestalt-Anordnungen mit *mittelbarem* Störgrößeneinfluss wirken zunächst auf Zwischenelemente des Systems ein, wie beispielsweise das Gehäuse, bevor die Störgröße auf Wirkrauminhalte trifft, welche keine beabsichtigte Veränderungen durch die Störgröße erfahren sollen.

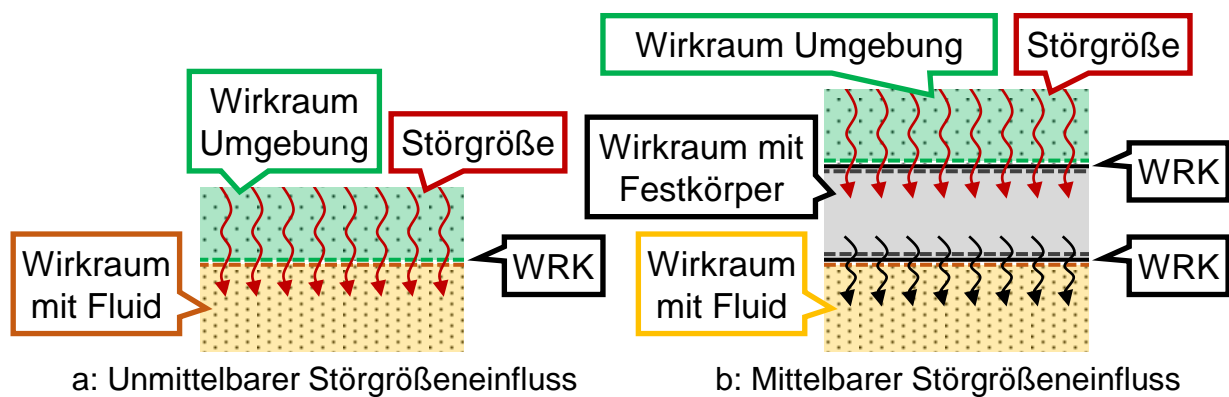


Abbildung 5.20: Schematische Darstellung der Voraussetzungen für unmittelbare und mittelbare Störgrößeneinflüsse

Zur Identifizierung unbeabsichtigten Eindringens von Fremdstoffen (Stofffluss) und Störgrößen (Energiefluss) werden alle Wirkraumkontakte zwischen Umgebung und System während sämtlicher Systemzustände hinsichtlich eines potentiellen Störgrößeneinflusses analysiert, sodass in einem anschließenden Bewertungsprozess diese Wirkraumkontakte hinsichtlich der Auswirkungen sowie weiterer Kriterien beurteilt werden können.

Abbildung 5.21 Detail 1 zeigt am Beispiel des Absperrventils, dass Staub und Luftfeuchte im Wirkraum der Umgebung nicht unmittelbar über Wirkraumkontakte in die Wirkräume des Fluids gelangen, wodurch wird ein direkter Einfluss durch Eindringen von Fremdkörpern in das Fluid verhindert wird.

Weitere Störgrößen aus der Umgebung müssen anhand der Systemumgebungsbedingungen identifiziert werden. In Abhängigkeit der Umgebungstemperatur werden beispielsweise bestimmte Bauteile des Ventils erwärmt, z. B. das Gehäuse, welche über Wirkraumkontakte in direktem Kontakt zu fluidgefüllten Wirkräumen stehen (WRK1 und 2), sodass eine potentielle Erwärmung entstehen kann. Dies kann in Abhängigkeit der Fluid-Eigenschaften zu einer Kontamination führen, insbesondere während des geschlossenen Ventilzustands, da während dieses Zustands das Fluid keine erzwungene Bewegung erfährt.

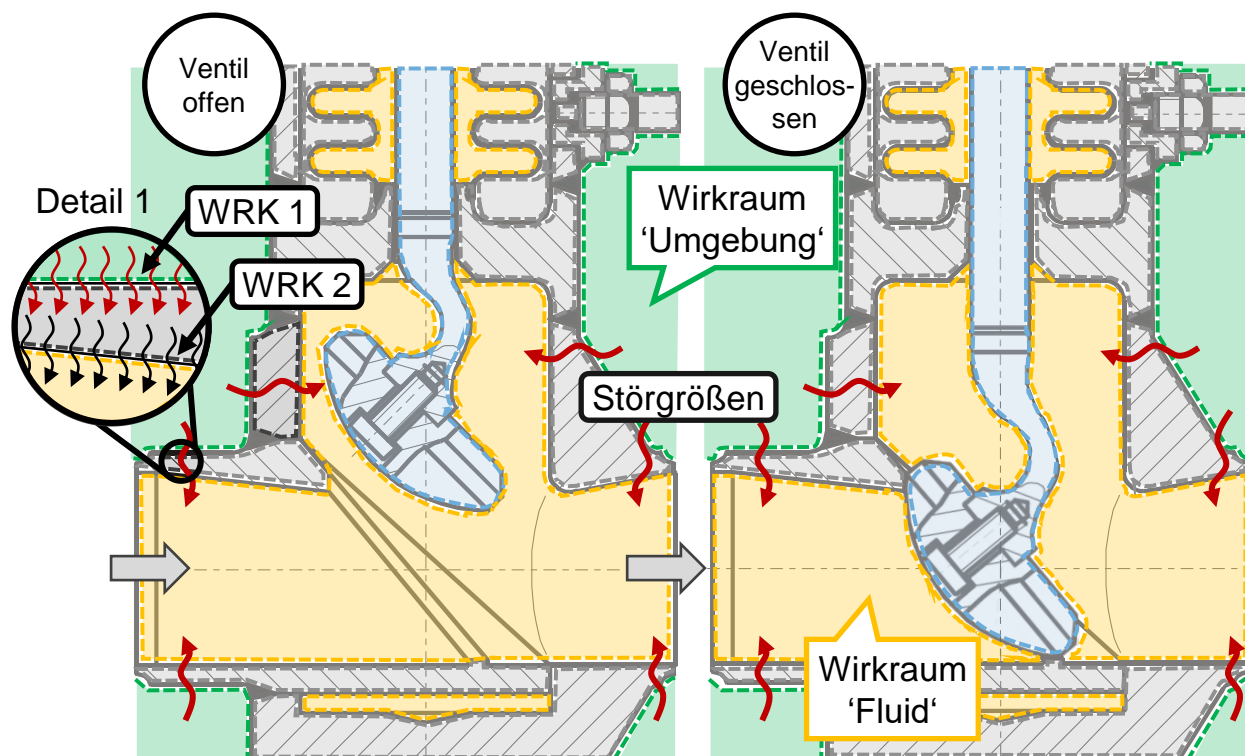


Abbildung 5.21: Unbeabsichtigtes Eindringen von Fremdstoffen und Störgrößen am Absperrventil

6 Synthese hygienegerechter stoffverarbeitender Systeme

Auf Basis der Grundlagen aus Kapitel 4 und Kapitel 5 soll im folgenden Kapitel gezeigt werden, in welcher Art und Weise das Wirkraummodell bei der Synthese hygienegerechter Produkte hinzugezogen werden kann. Für die Eignung des Wirkraummodells für die Synthese ist insbesondere die Beschreibung der Modellelemente mittels Eigenschaften eine wichtige Voraussetzung, vgl. Abschnitt 4.3.2. Im Fokus des Kapitels steht das Aufzeigen der Eignung des Wirkraummodells zur Umsetzung einer hygienegerechten Gestalt unter Nutzung etablierter Vorgehensmodelle und Methoden.

Synthese beschreibt in der Produktentwicklung allgemein den Vorgang des Suchens und Findens sowie des Zusammensetzens und Kombinierens von Elementen, die abschließend zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem führen.³³⁷ In der Phase des Gestaltens umfasst die Synthese Tätigkeiten im Zuge des operativen Vorgehens³³⁸, „*bei der der Konstrukteur Gestalt- und Werkstoffeigenschaften von Gestaltungselementen festlegt.*“³³⁹ Während das Ziel der Analyse die Identifizierung des Gestalt-Funktions-Zusammenhangs sowie das Ermitteln von Schwachstellen beispielsweise in Form von Nicht-Funktionen darstellt, vgl. Abschnitt 5.4, beschreibt die Gestaltsynthese das Umsetzen beabsichtigter Funktionen sowie beabsichtigter Prozesse in eine geeignete Gestalt unter gleichzeitiger Reduzierung der ermittelten Schwachstellen.³⁴⁰

Analyse- und Syntheseschritte dürfen nicht isoliert voneinander betrachtet werden, vgl. Abbildung 6.1. Die Analyse sollte stets mit dem Ziel des Erkenntnisgewinns für die Synthese betrieben werden. Andererseits stehen bei der Synthese oftmals verschiedene Varianten zur Funktionserfüllung zur Verfügung, deren Eignung erst durch anschließende Analyseschritte beurteilt werden kann.³⁴¹ Grundlage für Analyse- und Syntheseschritte ist eine modellbasierte Beschreibung des Produkts bzw. des Gestaltungsgegenstandes. Im Folgenden soll gezeigt werden, in welcher Weise das Wirkraummodell, vgl. Abschnitt 4.3, für die Gestaltsynthese genutzt wird.

³³⁷ Vgl. Feldhusen, Grote (2013), S. 287.

³³⁸ Dem operativen Vorgehen ist das strategische Vorgehen übergeordnet, vgl. VDI 2223 (2004), S. 17ff.

³³⁹ VDI 2223 (2004), S. 5.

³⁴⁰ Vgl. Matthiesen et al. (2018), S. 3.

³⁴¹ Vgl. Feldhusen, Grote (2013), S. 486; Matthiesen et al. (2018), S. 3

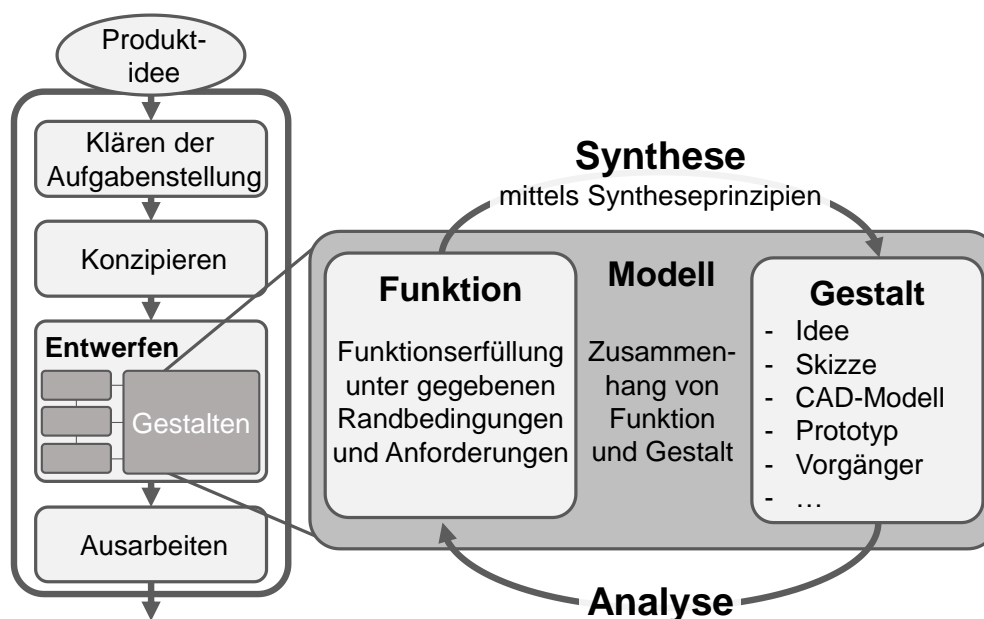


Abbildung 6.1: Systematik des strategischen Vorgehens im Gestaltungsprozess³⁴²

6.1 Syntheseprinzipien in der Gestaltung

Gemäß der Syntheseprinzipien der Gestaltung nach MATTHIESEN et al., wird in dieser Arbeit zwischen den drei Syntheseprinzipien unterschieden:

- Hinzufügen von Wirkflächenpaaren oder Leitstützstrukturen
- Entfernen von Wirkflächenpaaren oder Leitstützstrukturen
- Ändern der Eigenschaften von Wirkflächenpaaren oder Leitstützstrukturen³⁴³

Das Prinzip des *Hinzufügens* oder *Entfernens* von Wirkflächenpaaren oder Leitstützstrukturen beeinflusst gleichermaßen die Existenz bzw. die Erscheinungsform von Wirkräumen. Das heißt, dass neue Wirkflächenpaare bzw. veränderte Leitstützstrukturen ebenfalls die Eigenschaften der betreffenden Wirkräume beeinflussen. Werden Eigenschaften von Wirkflächenpaaren oder Leitstützstrukturen verändert, werden davon unter anderem auch Eigenschaften von Wirkraumgehalten, Eigenschaften der Wirkraum-Topologie oder der Wirkraum-Anordnung beeinflusst.

Den Syntheseprinzipien liegt auf Grund der Menge an unterschiedlichen Eigenschaften eine große Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten zugrunde. Sie stellen die Voraussetzung für ein diskursives Problemlösen dar, welches für die Generierung von Varianten und zur Erstellung eines breiten Lösungsfeldes notwendig ist.

Im Zuge dieser Forschungsarbeit sollen diese Syntheseprinzipien genutzt werden, um die während der Analyse aufgedeckten Nicht-Funktionen durch eine entsprechende Ge-

³⁴² In Anlehnung an Matthiesen (2019), S. 4 und VDI 2223 (2004), S. 43.

³⁴³ Vgl. Matthiesen et al. (2018), S. 16 sowie Beetz et al. (2018), S. 993.

staltanpassung entweder zu *eliminieren*, d. h. sie durch Hinzufügen von Wirkflächenpaaren in einen beabsichtigten Funktionszusammenhang zu bringen, den *Einfluss* der Nicht-Funktionen zu *reduzieren*, beispielsweise durch Veränderung von Gestalteigenschaften, oder die *Auswirkungen* von Nicht-Funktionen durch zusätzliche Maßnahmen wie Reinigungsfunktionen zu *minimieren*.

6.2 Gestaltsynthese hygienegerechter Produkte mit dem Wirkraummodell

In der Phase der Gestaltung werden im Zuge von Synthesevorgängen beabsichtigte Funktionen mit Hilfe geeigneter Wirkprinzipien in Werkstoff- und Gestalteigenschaften umgesetzt. Neben der beabsichtigten Funktionserfüllung muss bei der Gestaltung in Anwendungsgebieten, in denen eine hygienegerechte Gestalt von Relevanz ist, speziell auf die Reduzierung des Kontaminationsrisikos geachtet werden. Eine Möglichkeit das Kontaminationsrisiko zu senken ist die Anzahl sowie den Einfluss und die Auswirkungen durch Analyseschritte aufgedeckter Nicht-Funktionen zu reduzieren.

Es existieren zahlreiche Konstruktionshilfsmittel in Form von Praxisbeispielen, die bei durchgängiger Umsetzung zu hygienegerechten Konstruktionen führen. Viele Hilfsmittel adressieren jedoch nur ganz spezielle Produkte oder Baugruppen, sodass möglicherweise während der Konstruktion anderer Produkte keine Hilfsmittel zur Verfügung stehen. In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, dass mit Hilfe des Wirkraummodells aufgedeckte Nicht-Funktionen dazu dienen, die Anzahl hygienerelevanter Schwachstellen im Zuge der Synthese zu reduzieren, sodass eine Entwicklung hygienegerechter Produkte, trotz fehlender Abdeckung durch Hygienic Design Hilfsmittel, ermöglicht wird.

6.2.1 Umsetzung von Anforderungen an eine hygienegerechte Gestalt

Ziel der Synthese bei der Gestaltung hygienegerechter Produkte ist, neben der Funktionserfüllung, die Beseitigung hygienerelevanter Schwachstellen, welche sich durch die Existenz von Nicht-Funktionen äußern. Dem gezielten Vorgehen bei der Synthese gehen die Ergebnisse des Analyseprozesses aus Kapitel 5 voraus. Allgemein sind für die Synthese hygienegerechter Produkte die folgenden Anforderungen durch eine entsprechende Produktgestalt zu erfüllen, vgl. Abschnitt 5.3:

- Unbeabsichtigtes Anhaften des Operanden oder von Hilfs- und Betriebsstoffen an Oberflächen des Operators vermeiden
- Unbeabsichtigtes Ansammeln des Operanden oder von Hilfs- und Betriebsstoffen in Bereichen (Toträumen) des Operators verhindern
- Unbeabsichtigtes Austreten (Leckage) des Operanden oder Hilfs- und Betriebsstoffen aus Bereichen des Operators vermeiden

- Unbeabsichtigtes Ablösen von Werkstoffen oder Diffusion von Hilfs- und Betriebsstoffen des Operators in Bereiche des Operanden sowie der Umgebung verhindern
- Eindringen von Fremdstoffen und weiteren Störgrößen aus der Systemumgebung in das System verhindern

Für die Anforderungserfüllung durch die Reduzierung von Nicht-Funktionen existieren derzeit keine Hinweise. Die Erfüllung der Anforderungen hängt von dem Einsatzverfahrensprinzip der jeweiligen zu entwickelnden Maschine ab und kann sehr unterschiedlich ausfallen.³⁴⁴ Einen Anhaltspunkt für die Reduzierung von Nicht-Funktionen liefert Abbildung 6.2.³⁴⁵ Ist es zur Anforderungserfüllung nicht möglich die jeweiligen Nicht-Funktionen vollständig zu eliminieren, gilt es für ein hygienegerechtes Produkt den *Einfluss* der jeweiligen Nicht-Funktion zu reduzieren und, falls dies nicht möglich ist, die *Auswirkungen* der Nicht-Funktionen zu *minimieren*. Hierzu zählen beispielsweise Reinigungsprozesse zur Wiederherstellung eines sauberen Zustands, falls ein unbeabsichtigtes Anhaften nicht verhindert werden kann.

Die Anwendung der in Abbildung 6.2 dargestellten Anregungen zur Reduzierung der Anzahl von Nicht-Funktionen soll anhand des Milchaufschäumers in Abbildung 6.3 beispielhaft kurz erläutert werden. Wie bereits in Abschnitt 4.3.3 erläutert, existiert zwischen dem Deckel und dem Gehäuse des Milchaufschäumers ein Spalt (Wirkraum 'Leckage' in Abbildung 6.3a), durch den Leckage auftreten kann. Eine Möglichkeit diese fehlende Funktion zur Verhinderung einer Leckage zu eliminieren, stellt das Verbinden von Gehäuse und Deckel dar, sodass beide Bauteile zu einem Bauteil zusammengefasst werden („Inhalt des Verbindungs-WR [...] mit anderem Inhalt füllen“, vgl. Abbildung 6.2). Dies hat jedoch zur Folge, dass das Befüllen sowie das Entleeren und Reinigen des Behälters erschwert wird. Aus diesem Grund besteht die alternative Möglichkeit den Einfluss des Spalts zu reduzieren. Gemäß Abbildung 6.2 können hierzu beispielsweise die Geometrie des Spalts angepasst, d. h. verkleinert, oder zusätzliche Gestaltelemente hinzugefügt werden.

Die umgesetzten Maßnahmen sind beispielhaft in Abbildung 6.3b dargestellt. Zu beachten ist, dass durch Veränderungen der Gestalt möglicherweise neue Nicht-Funktionen, z. B. in Form neuer Toträume, entstehen, die es zu beherrschen gilt. Hierbei müssen insbesondere Zielkonflikte abgewägt und Maßnahmen hinsichtlich ihrer Auswirkungen kritisch beurteilt werden.

³⁴⁴ Vgl. Beetz et al. (2017), S. 84-85.

³⁴⁵ Die Abbildung basiert auf den drei Synthesepinzipien aus Abschnitt 6.1 und den Prinzipien nach FREUND (2018) und MATHIAS (2016) zum Umgang mit ungewollten Größen.

Unbeabsichtigte Prozesse	Auswirkungen der Nicht-Funktion vermeiden	Einfluss reduzieren	Auswirkungen minimieren
Anhaften (Unbeabsichtigter Energiefluss, WRK Operand -Operator)	<ul style="list-style-type: none"> • Kontakt zwischen Operand und Operator: Topologie/ Anordnung variieren • WR-Inhalt der Maschine an dieser Stelle entfernen (WRK-Entstehung verhindern) 	<ul style="list-style-type: none"> • Werkstoff-Eigenschaften ändern (Kontaktkräfte verringern) • Geometrieigenschaften der am Kontakt beteiligten Wirkraumminhalte ändern 	<ul style="list-style-type: none"> • Geeignetes Reinigungsverfahren etablieren • Ersetzen der Gestaltelemente durch Einwegeteile (falls z. B. kein geeignetes Reinigungsverfahren existiert)
Ansameln/Totraum (Beabsichtigter Stofffluss nicht möglich, WRK Operand-Totraum)	<ul style="list-style-type: none"> • WR (Totraum) mit Feststoff füllen • Topologie ändern 	<ul style="list-style-type: none"> • Eintritt in WR verhindern (Größe des Spalts verringern, Zustandseigenschaften des Totraums) • Schnellen Wiederaustritt ermöglichen 	<ul style="list-style-type: none"> • Selbstabfließen ermöglichen (Form des WR-Inhalts) • Geeignetes Reinigungsverfahren etablieren • Ggf. Demontage zur Reinigung ermöglichen
Austreten/Leckage (Unbeabsichtigter Stofffluss, WRK Umgebung – Operand)	<ul style="list-style-type: none"> • Inhalt des Verbindungs-WR zwischen Umgebung und Operand mit anderem Inhalt füllen • WR-Zustandseigenschaften ändern (z. B. Druckdifferenz nutzen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Geometrie-Eigenschaften des Inhalts des Verbindungs-WR ändern (Verkleinern des Spalts) • Hinzufügen von Gestaltelementen (z. B. Dichtungen) • Leckage in unkritische Bereiche ermöglichen 	<ul style="list-style-type: none"> • Hinzufügen von Gestaltelementen zum Auffangen der Leckage (z. B. Spülkammern) • Geeignete Reinigungsverfahren etablieren
Ablösen (Unbeabsichtigter Stofffluss, WRK Werkstoffpartikel-Operand)	<ul style="list-style-type: none"> • Topologie anpassen, sodass Kontakte zwischen Wirkraumminhalten verhindert werden, die zum Ablösen führen • Werkstoff-Eigenschaften der WR-Inhalte ändern (Kein Ablösen von Partikeln) 	<ul style="list-style-type: none"> • Topologie ändern (Werkstoffpartikel gelangen nicht in WR des Operanden) • „Schützende“ WR-Inhalte hinzufügen (z. B. Beschichtung) 	<ul style="list-style-type: none"> • Zusätzliche Gestaltelemente zum Herausfiltern von Werkstoffpartikeln hinzufügen
Eindringen (Unbeabsichtigter Stoff-/Energiefluss, WRK Fremdstoff-Operand, Wirkung Umgebung auf Operand)	<ul style="list-style-type: none"> • Störgrößen im WR der Umgebung entfernen (evakuieren) • Inhalt des Verbindungs-WR zwischen Umgebung und Operand ändern • WR-Zustandseigenschaften ändern (z. B. Druckdifferenz nutzen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hinzufügen von Gestaltelementen (z. B. Dichtungen) • Geometrie-Eigenschaften des Inhalts des Verbindungs-WR ändern (Verkleinern des Spalts) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hinzufügen von Gestaltelementen zum Auffangen der Fremdkörper (z. B. Filter) • Zusätzliche Wirkungen auf WR-Inhalt (z. B. Erhitzen zum Abtöten von Bakterien)

Abbildung 6.2: Anregungen zur Reduzierung der Anzahl von Nicht-Funktionen für die Gestaltung hygienerechter Produkte

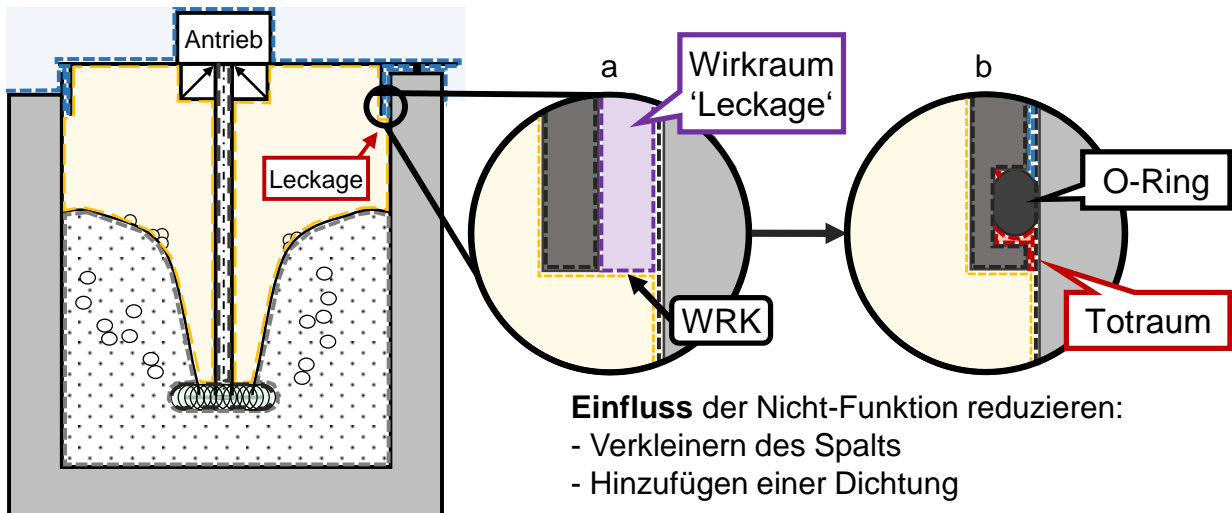


Abbildung 6.3: Beispiel zur Reduzierung des Einflusses einer Nicht-Funktion

Die einzelnen Schritte des Gestaltungsprozesses sind ausführlich in VDI 2223 beschrieben, vgl. Abbildung 6.4 links. Das Umsetzen von hygienerelevanten Anforderungen durch die Reduzierung der Anzahl an Nicht-Funktionen in den Schritten des Gestaltungsprozesses soll anhand des Absperrventils aus Abschnitt 5.4 ausgehend von der prinzipiellen Gesamtlösung, vgl. Abbildung 6.4 rechts, beispielhaft erläutert werden.

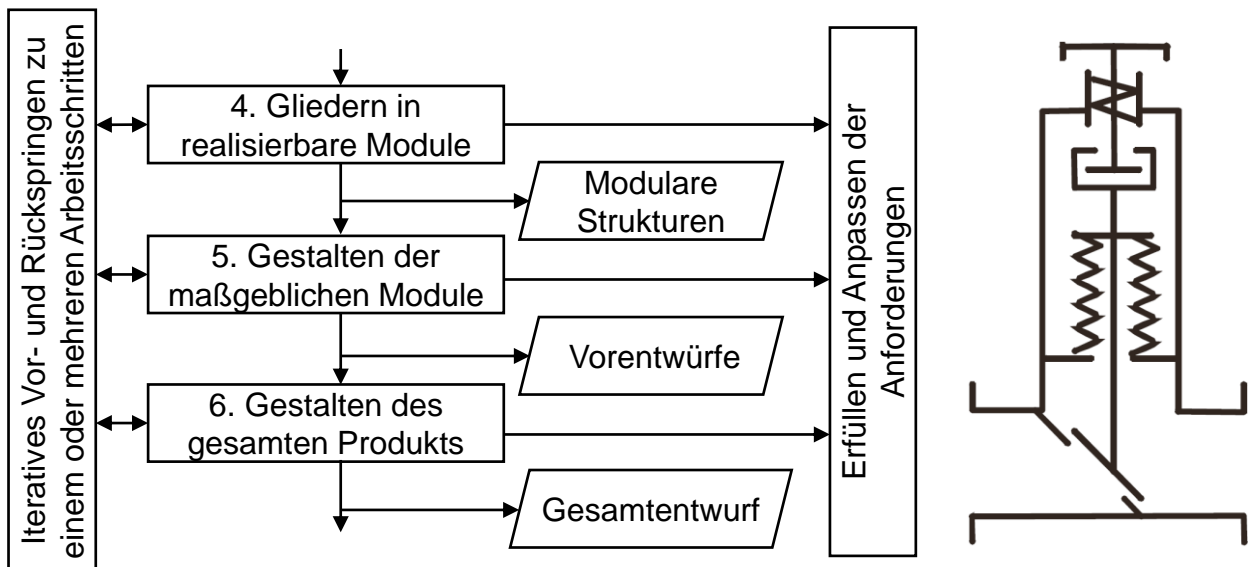


Abbildung 6.4 links: Schritte des Gestaltungsprozesses³⁴⁶, rechts: Prinzipielle Gesamtlösung des Absperrventils als Ausgangspunkt der Gestaltung³⁴⁷

³⁴⁶ Quelle: VDI 2223 (2004), S. 7: Die vor und nachgelagerten Arbeitsschritte finden sich in Abbildung 2.14.

³⁴⁷ Quelle: VDI 2223 (2004), S. 27.

Gliedern in realisierbare Module

Das Verständnis des Zusammenhangs von Funktion und Gestalt bildet die Voraussetzung für die Gliederung einer prinzipiellen Gesamtlösung in realisierbare Module.³⁴⁸ Ist dieses Verständnis (noch) nicht vorhanden, gilt es durch vorangestellte Analysen, beispielsweise mit Hilfe des C&C²-Ansatzes, diesen Zusammenhang anhand von Vorgänger- oder Vergleichsprodukten zu verstehen.

Auf Basis dieser Ergebnisse können zu realisierende Module identifiziert und priorisiert werden. Bei hygienerelevanten Produkten der Lebensmittelproduktion ist der Lebensmittelbereich bzw. der Bereich, in dem der Operand beabsichtigt transformiert wird, von großer Wichtigkeit. Hier wird zum einen durch die Verarbeitung des Lebensmittels der Nutzen der Maschine generiert, zum anderen darf von keinem Prozess am Lebensmittel eine Kontamination ausgehen oder ausgelöst werden.³⁴⁹

Abbildung 6.5 zeigt die für das Verfahrensprinzip des Absperrventils maßgeblichen Module, die aus der vorangegangenen wirkraumbasierten Analyse hervorgehen und durch Wirkräume begrenzt sind. Wesentliche Aufgabe des Produkts ist das bedarfsweise Öffnen und Schließen des Wirkraums 'Sperren', mit dem Ziel das *Leiten* des Fluids zu unterbrechen.

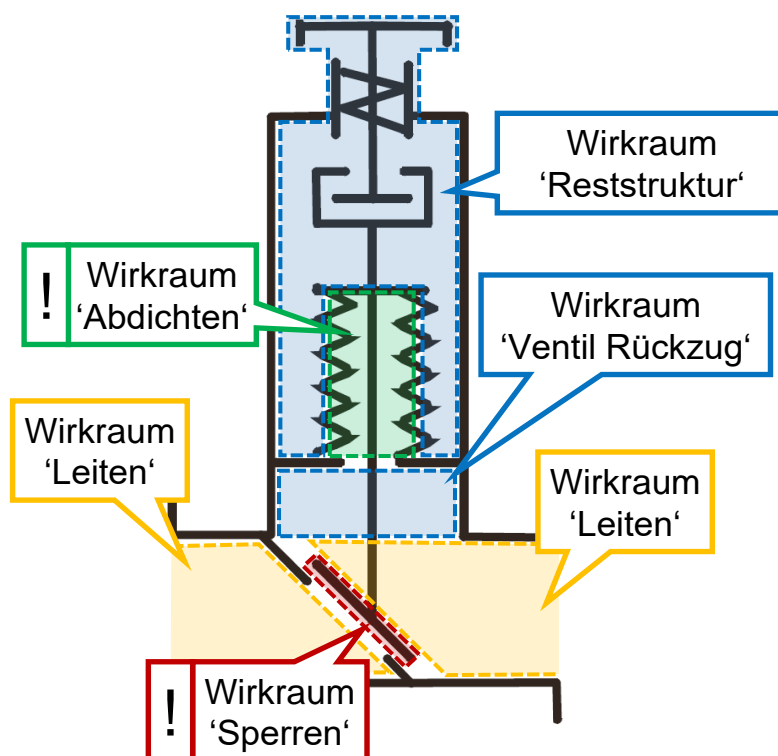


Abbildung 6.5: Einteilung des Absperrventils Anhand verfahrensprinziprelevanter Wirkräume

³⁴⁸ Vgl. VDI 2223 (2004), S. 22.

³⁴⁹ Weitere Möglichkeiten zur Modularisierung der prinzipiellen Lösung finden sich u. a. in VDI 2223 (2004), S. 19-23.

Weiterhin existieren der Wirkraum 'Ventil Rückzug' für das Ventil im geöffneten Zustand sowie der Wirkraum 'Abdichten' zum Abdichten des Fluidwirkraums gegenüber der Umgebung. Die vorangegangene Analyse aus Kapitel 5 zeigt, dass insbesondere in Bereichen der Wirkräume des *Sperrens* sowie des *Abdichtens* hygienerelevante Nicht-Funktionen existieren und sie daher den Schwerpunkt der Konstruktion bilden sollten.

Gestalten maßgeblicher Module

Beim Gestalten maßgeblicher Module auf Basis der Einteilung und Priorisierung im vorhergehenden Arbeitsschritt werden Bereiche der prinzipiellen Gesamtlösung geometrisch, stofflich und/oder programmtechnisch zu einem Vorentwurf konkretisiert. Der Konkretisierungsgrad sollte dabei nur so weit getrieben werden, dass ein „*Erkennen und Auswählen eines Gestaltungsoptimums möglich ist*“.³⁵⁰ Das zunächst unscharfe Arbeiten soll dabei für den kreativen Gestaltungsspielraum bewahrt werden. VDI 2223 empfiehlt beim Gestalten mit Wirkelementen, insbesondere mit Wirkflächen oder Wirkkörpern, zu beginnen.³⁵¹ Lösungen für Gestaltungsaufgaben der maßgeblichen Module können entweder intuitiv, unterstützt z. B. durch Kreativitätstechniken, oder diskursiv, beispielsweise durch systematische Variation, erarbeitet werden.³⁵²

Auf Basis der Analyseergebnisse kann gemäß Abschnitt 6.1 mit Hilfe der drei zur Verfügung stehenden Syntheseprinzipien eine Veränderung der Ausgangslösung erreicht werden. Da theoretisch eine unüberschaubare Menge an Lösungsvarianten erarbeitet werden kann, obliegt es dem Konstrukteur, durch welche genauen Maßnahmen die Schwachstellen beseitigt werden sollen. In Anlehnung an FREUND (2018) und MATTHIAS (2016) sowie Abschnitt 6.2.1 gilt es Maßnahmen für die Schwachstellenbeseitigung bei Zielkonflikten zu priorisieren. Am Beispiel des Absperrventils soll das diskursive Vorgehen mit Hilfe des Wirkraummodells verdeutlicht werden.

Die Dichtfunktion stellt die Hauptfunktion des Ventils dar, sodass hygienerelevante Nicht-Funktionen, die zur Verhinderung dieser Funktion führen, als besonders kritisch einzustufen sind. Die Ergebnisse der Analyse aus Abschnitt 5.4.2 zeigen, dass insbesondere das Anhaften von Lebensmitteln am Ventilteller oder am Ventilsitz dazu führen können, dass das für die Dichtfunktion relevante umlaufende Wirkflächenpaar zwischen den Bauteilen nicht gebildet werden kann, vgl. Abbildung 6.6.

Da der Ventilteller und -sitz verfahrensbedingt von Fluid umgeben ist, ist es an der Stelle nicht möglich diese Nicht-Funktion zu eliminieren. Vielmehr gilt es einen Werkstoff zu wählen, der mit dem Fluid nur geringe Haftkräfte ausbildet, sodass in diesem funktionsrelevanten Bereich möglichst kein Anhaften hervorgerufen wird (*Einfluss reduzieren*).

³⁵⁰ VDI 2221 (1993), S. 11.

³⁵¹ Vgl. VDI 2223 (2004), S. 22.

³⁵² Vgl. VDI 2223 (2004), S. 22; Ehrlenspiel et al. (2014), S. 71-72.

Weiterhin können zur Unterstützung des Abtrags von dennoch anhaftendem Fluid Reinigungsprozesse mit entsprechenden Reinigungswerkzeugen herangezogen werden (*Auswirkungen minimieren*).

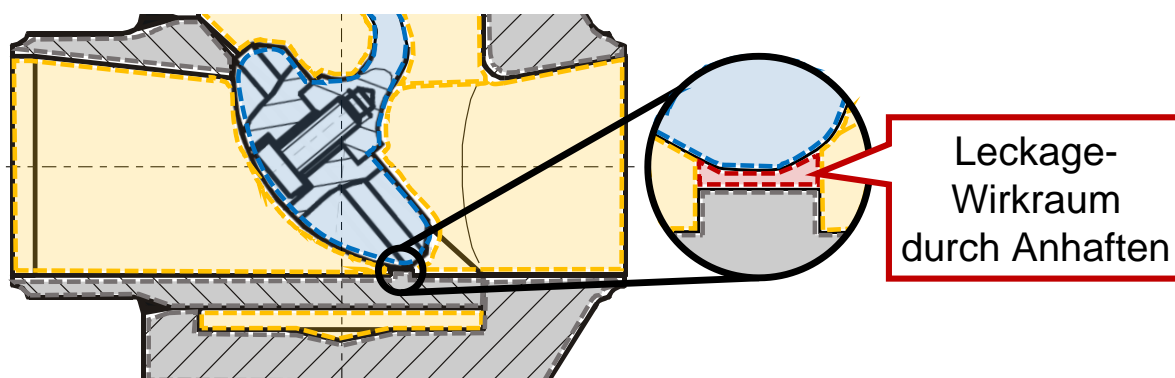


Abbildung 6.6: Nicht-Funktion durch Anhaften von Fluid am Ventilteller

Die Analyse zeigt überdies hinaus, dass der innenliegende Raum des Faltenbalgs, welcher für das Abdichten des Fluids innerhalb des Ventils gegenüber der Restwirkstruktur des Ventils verantwortlich ist, kritisch zu beurteilen ist. Die schlechte Reinigbarkeit des Innenraums sowie das Ansammeln und Anhaften von eingetretenem Fluid in diesem Bereich stellt in der bisherigen Gestalt eine potentielle Schwachstelle dar. Abbildung 6.7 zeigt, dass im Balg-Innenraum keine eindeutige Strömungsführung existiert, d. h. Fluid tritt durch Spalte der unteren Führung ein, jedoch wurde für das definierte Abführen von Fluid aus diesem Raum keine Maßnahme vorgesehen.

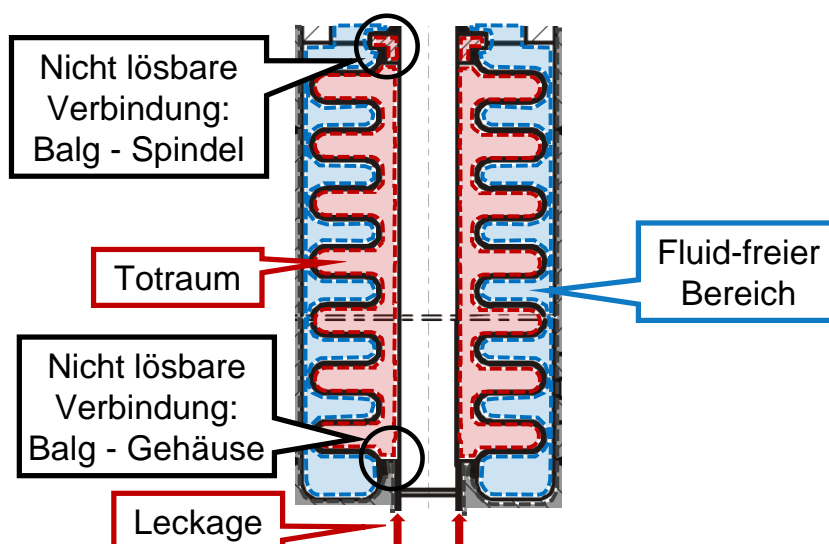


Abbildung 6.7: Ergebnisse der Analyse der Balgdichtung

Abbildung 6.8 zeigt verschiedene Gestalt-Alternativen für Anordnung der Faltenbalgdichtung, welche das Ergebnis einer systematischen Variation der Gestalteeigenschaften darstellt. Der dargestellte Endzustand stellt keinesfalls eine mögliche Lösung dar und soll verdeutlichen, dass die Anwendung der Syntheseprinzipien mit Hilfe des Wirkraummodells zu verschiedenen Lösungsalternativen führt. Das Ermitteln von Schwachstellen in

Fluid führen, ein erhöhtes Kontaminationsrisiko dar, weshalb das Auftreten dieser Toträume zu verhindern ist. Sollten die Toträume als solches nicht vermeidbar sein, so kann die Nicht-Funktion, welche das Eindringen in die Toträume ermöglicht, eliminiert oder die Auswirkungen des Eindringens mit Hilfe eines geeigneten Reinigungsverfahrens minimiert werden.

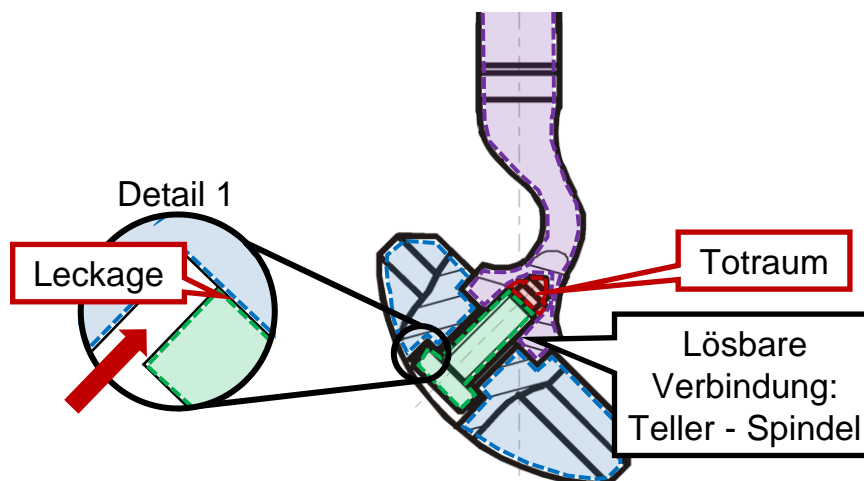
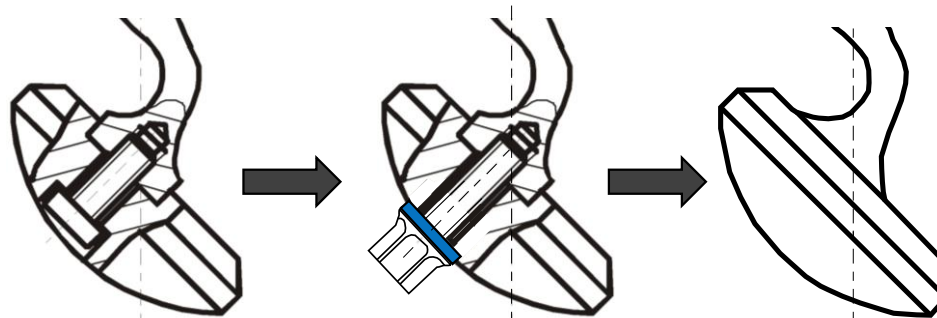


Abbildung 6.9: Ergebnisse der Analyse des Ventiltellers

Abbildung 6.10 zeigt Gestalt-Varianten zur Befestigung des Ventiltellers an der Spindel. Der erste Iterationsschritt nutzt hierbei das Prinzip zur *Reduzierung des Einflusses der Nicht-Funktion*. Das Einbringen eines zusätzlichen Gestaltelements in Form einer Dichtung zwischen Schraube und Schraubenauflage verhindert das Einströmen von Fluid in die Sacklochbohrung.

Eine Verbesserung dieser Variante kann durch Anwendung weiterer Prinzipien, gemäß Abbildung 6.2 erarbeitet werden. Das Prinzip zur *Vermeidung des Auftretens* im Falle des Totraums besagt, dass hierzu der Totraum entfernt werden muss. Da die Existenz des Totraums durch die gewählte Verbindungsart zwischen Ventilteller und Spindel bedingt wird, besteht die Möglichkeit eine andere Verbindungsart zu wählen, welche keine Toträume aufweist, vgl. Abbildung 6.10 rechts. Diese Variante nach Integralbauweise weist zwar keine Spalte auf, jedoch besteht hinsichtlich der Fertigung sowie der Montage ein erhöhter Aufwand. Hier gilt es in anschließenden Bewertungsprozessen das Verhältnis von Kosten und Nutzen zu beurteilen.

Ausgangslösung



Schwachstellen	- Totraum - Eindringen durch Spalt - Kontaminationsrisiko	- Spalte auf der Rückseite	- Erschwerte Montage - Erhöhter Fertigungsaufwand
Gründe	- Schraubverbindung mit Sackloch- u. Senkbohrung - Fehlende Dichtung	- Ventilteller und Spindel aus zwei Bauteilen	- Einbaubedingung
Maßnahme	- Entfernen von d. Senkbohrung - Hinzufügen von Dichtungen	- Zusammenfassen der Bauteile (Integralbauweise)	

Abbildung 6.10: Vorgehen beim Gestalten des Ventiltellers³⁵³

Gestalten des gesamten Produkts

Basierend auf den Vorentwürfen der maßgeblichen Module, folgt der Arbeitsschritt „Gestalten des gesamten Produkts“. Hierbei werden sowohl die bereits grobmaßstäblichen Module des vorherigen Arbeitsschritts als auch die noch nicht realisierten Module schrittweise zu einem maßstäblichen Gesamtentwurf konkretisiert.³⁵⁴

Für ein hygienegerechtes Produkt bedarf es einer hygienegerechten Gestalt aller Module, die für die Hygiene relevant sind. Da Produkte unterschiedliche Prozesse realisieren müssen, von denen jeweils unterschiedliche Kontaminationsrisiken ausgehen können, es bei Analyseschritten die gesamte Produktgestalt sowie sämtliche relevante Prozessschritte, bspw. der Nutzungsphase, mit einzubeziehen, um durch die Konkretisierung auftretende Schwachstellen aufzudecken

Am Beispiel des Absperrventils in Abbildung 6.11 ergibt sich auf Basis der Analyse die Herausforderung den Totraum am unteren Gehäuserand durch geeignete Syntheseschritte zu beseitigen bzw. die Auswirkungen zu reduzieren. Auf Basis der Syntheseprinzipien aus Abschnitt 6.1 und mit Hilfe von Abbildung 6.2 ergeben sich unterschiedliche Ansätze zur Verbesserung der Gestalt hinsichtlich des Kontaminationsrisikos.

Abbildung 6.11 zeigt mögliche Varianten, um das Risiko einer Kontamination durch den markierten Totraum zu senken. Für die Vermeidung des Auftretens des Totraums kann beispielsweise das Gehäuse aus einem Stück gefertigt werden, sodass keine Spalte und

³⁵³ Links und rechts: in Anlehnung an VDI 2223 (2004), S. 64; mittig: eigene Darstellung.

³⁵⁴ Vgl. VDI 2223 (2004), S. 24.

Toträume auftreten. Dies führt in dem aufgeführten Beispiel jedoch zu einem nicht fertigen Ventilsitz. Falls der Totraum beispielsweise auf Grund des gewählten Fertigungsverfahrens des Gehäuses nicht eliminierbar ist, kann für die Verbesserung der Reinigung der Totraum entleerbar gestaltet werden, indem zur Reinigung bzw. zur Entfernung von angelagertem Fluid ein Deckel geöffnet und der Totraum entleert und gesäubert wird.

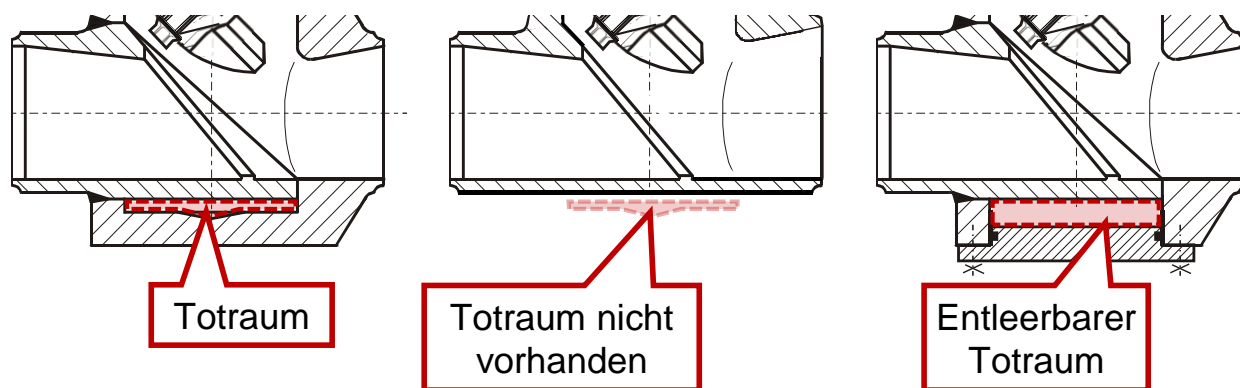


Abbildung 6.11: Ausschnitt zur Gestaltung des Absperrventilgehäuses³⁵⁵

6.2.2 Ausnutzung synergetischer Zusammenhänge

Bei der Entwicklung hygienegerechter Produkte gilt es stets zu beachten, dass neben Einsatzprozessen anschließende Reinigungsprozesse für den Nutzer von Relevanz sind. Eine „*leichte Reinigbarkeit*“ wird oftmals als wichtiges Kriterium für ein hygienegerechtes Produkt genannt.³⁵⁶ Je geringer der Aufwand bei der Reinigung des Produkts für den Nutzer ist, desto leichter ist die Reinigbarkeit einzuschätzen. In Anlehnung an WILDBRETT lässt sich der Reinigungsaufwand in Abhängigkeit von sechs Einflussfaktoren beschreiben:

- Chemiebedarf,
- mechanischer Aufwand,
- benötigte Temperatur,
- Zeitaufwand,
- Zustand, Menge und Art der Verschmutzung,
- Design, Rauigkeit, Material des zu reinigenden Guts.³⁵⁷

Während der Entwicklung von hygienegerechten Produkten müssen daher neben den eigentlichen Einsatzprozessen auch Reinigungsprozesse antizipiert werden. Eine Möglichkeit zur Erleichterung der Reinigbarkeit hinsichtlich des manuellen Aufwands des Nutzers in Bezug auf die Mechanik der Reinigung sowie den Zeitaufwand für den Reinigungsprozess ist die Ausnutzung von Synergieeffekten. Dazu können beispielsweise

³⁵⁵ Links: in Anlehnung an VDI 2223 (2004), S. 36; mittig und rechts: eigene Darstellung.

³⁵⁶ Vgl. Hauser (2008b), S. 121; EHEDG (2004), S. 11; DIN EN 1672-2 (2009), S. 6.

³⁵⁷ Vgl. Wildbrett (2006).

Wirkgrößen, die für Einsatzprozesse vonnöten sind, oder *Gestaltelemente* des Produkts derart genutzt oder angepasst werden, dass der Zusatzaufwand für den Nutzer während der Reinigungsprozesse gesenkt wird. Hierzu können beispielsweise Reststrukturen des Produkts genutzt werden, da diese definitionsgemäß funktionslos sind, oder Wirkstrukturen angepasst werden.

Der Operator stellt im Einsatzprozess Wirkgrößen zur Verfügung, welche die Basis zum Ablauf der Transformation des Operanden darstellen. Abbildung 6.12 zeigt, dass zur Vereinfachung der Reinigungsprozesse diese Wirkgrößen zur Unterstützung der Reinigung herangezogen werden können, wodurch eine Senkung des Aufwands für den Nutzer ermöglicht werden soll. Voraussetzung hierfür ist, dass die Wirkgrößen des Einsatzprozesses in einer für die Reinigungsprozesse unterstützenden Art zugrunde liegen. Hierbei liegt der Anspruch nicht auf einer vollständigen Übernahme aller Wirkgrößen des Einsatzprozesses oder einer vollständigen Substitution aller notwendigen Wirkgrößen der Reinigungsprozesse.

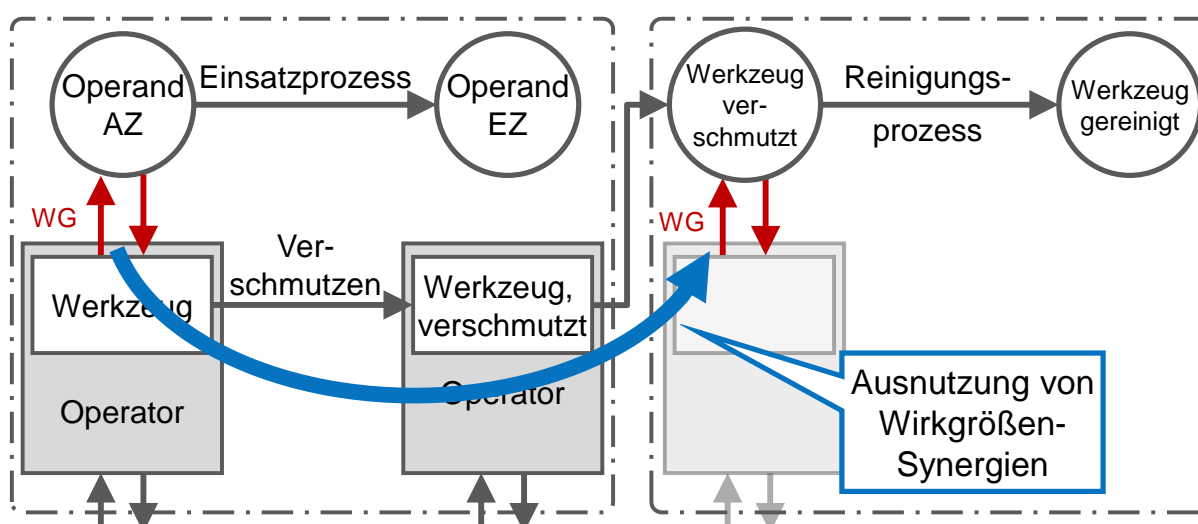


Abbildung 6.12: Ausnutzung von Synergien der Wirkgrößen

Zur Unterstützung des Reinigungsprozesses am Beispiel des in Abbildung 6.13 dargestellten Absperrventils soll die translatorische Wirkbewegung der Spindel im Einsatzprozess synergetisch ausgenutzt werden. Im Einsatzprozess wird der Ventilteller durch die Wirkbewegung in den Ventilsitz bewegt und sorgt für den gewollten Endzustand des Schließprozesses, vgl. Abschnitt 5.4.1.

Abbildung 6.13 links zeigt die Strömungsrichtung im Einsatzprozess. Da der Ventilteller auf strömungzugewandten und auf -abgewandten Flächen von Fluid umgeben ist, sollen im Reinigungsprozess alle Flächen des Ventiltellers gereinigt werden. Aus diesem Grund wird für die Reinigung vorgesehen, dass das Reinigungsfluid alternierend von der ursprünglichen Eingangsseite sowie von der Ausgangsseite hereingepumpt wird, vgl. Ab-

bildung 6.13 Pfeil (1). Die für den Einsatzprozess existierende translatorische Wirkbewegung, vgl. Abbildung 6.13 Pfeil (2), kann synergetisch für die Reinigung genutzt werden, indem der Ventilteller in verschiedenen Positionen von der Reinigungsfluidströmung angeströmt wird. Dadurch soll eine gleichmäßige Reinigung möglichst vieler Ventiltellerflächen erreicht werden.

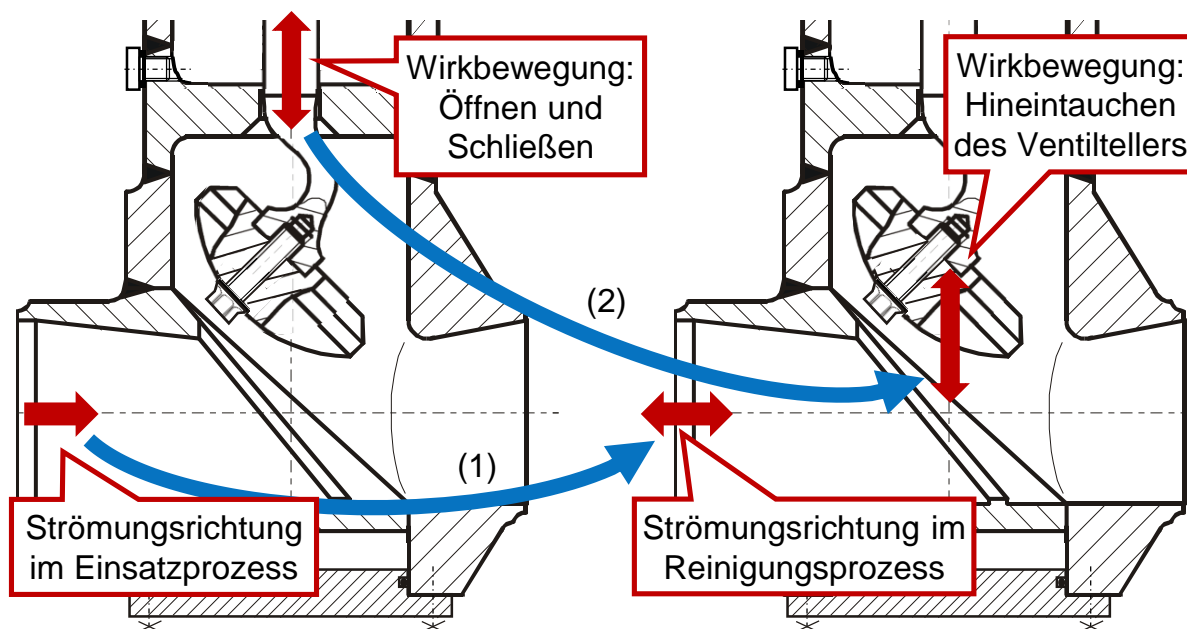


Abbildung 6.13: Synergetische Nutzung von Wirkzusammenhängen am Beispiel des Absperrventils

Die Produktgestalt ist derart festzulegen, dass Produkte die beabsichtigten Funktionen erfüllen. Oftmals wird für die Funktionserfüllung jedoch nicht das gesamte Bauteil ausgenutzt, d. h. nicht jede Oberfläche des Bauteils ist eine Wirkfläche und nicht jedes Bauteilvolumen ist Teil einer Leitstützstruktur. Durch lokale Anpassungen der Gestalt sollen, wie Abbildung 6.14 zeigt, die bislang ungenutzten Bereiche des Produkts, für die Unterstützung von Reinigungsprozessen genutzt werden.

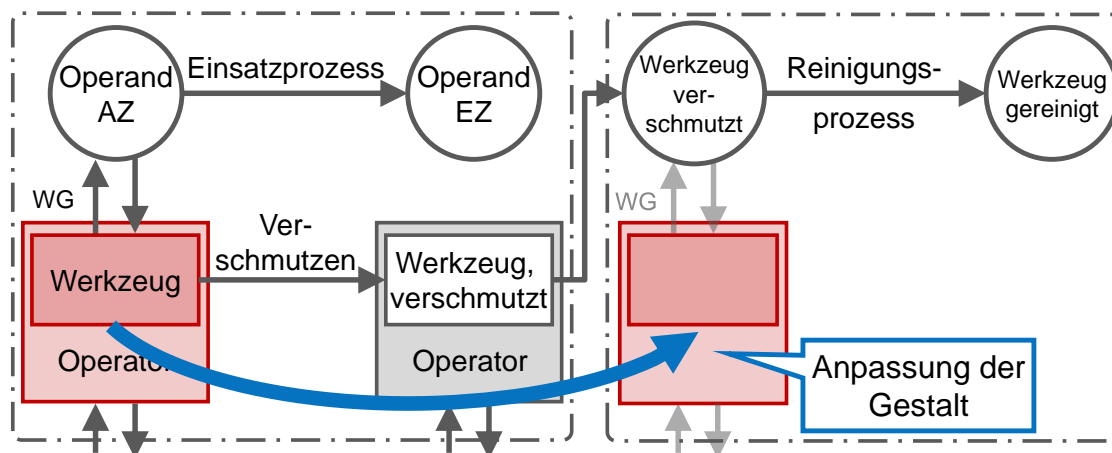


Abbildung 6.14: Anpassung der Gestalt zur Unterstützung der Reinigungsprozesse

Die Anpassung der Produktgestalt soll am Beispiel des Absperrventils in Abbildung 6.15 verdeutlicht werden. Das Gehäuse des Ventils dient der Leitung des Kraftflusses sowie der Abdichtung des innenliegenden Fluid-gefüllten Wirkraums gegenüber der Umgebung, vgl. Abschnitt 5.4.1. Die Gestalt des Gehäuses wird angepasst, sodass diese Bereiche zur Unterstützung der Reinigungsprozesse genutzt werden können, vgl. Abbildung 6.15 Pfeil (1), indem Bohrungen eingebracht werden, die den Stofffluss von Reinigungsfluiden in die Dichtkammer und aus der Dichtkammer heraus ermöglichen. Gleichzeitig gilt es zu beachten, dass die neuen, zur Unterstützung der Reinigung geschaffenen Bohrungen auf geeignete Weise verschlossen werden müssen, damit hierdurch keine neuen unbeabsichtigten Nicht-Funktionen auftreten.

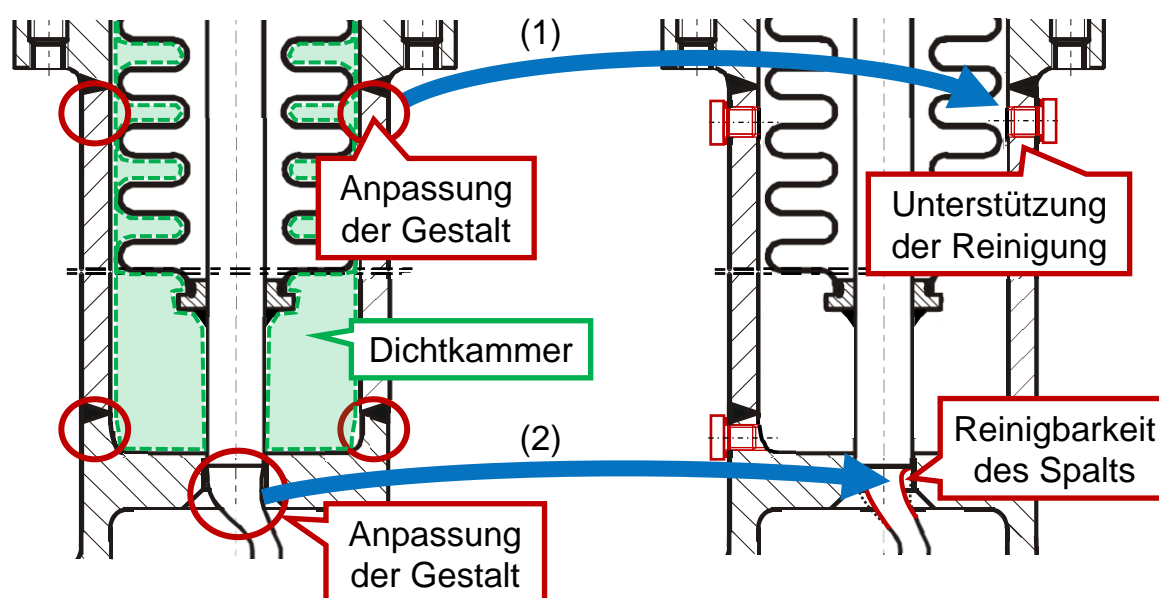


Abbildung 6.15: Anpassen der Gestalt zur Unterstützung von Reinigungsprozessen am Beispiel des Absperrventils

Gleichermaßen ist es möglich, Bereiche der Produktgestalt zu nutzen, die auf Grund bestimmter Positionen von Bauteilen „frei“ zur Verfügung stehen. Die Reinigbarkeit des Spaltes zwischen der Spindel und dem Gehäuse in Abbildung 6.15 ist auf Grund der schmalen Geometrie nur unzureichend möglich. Eine Maßnahme zur Verbesserung der Reinigbarkeit des Spaltes stellt die Verjüngung des gebogenen Abschnitts der Spindel (2) dar. Während des Reinigungsprozesses wird hierzu die Spindel so weit nach oben bewegt, dass die Verjüngung sich nunmehr an der Position des vorherigen schmalen Spaltes befindet.

6.3 Ableiten von Gestalteeigenschaften mit Hilfe des Wirkraummodells

Neben der Nutzung des Wirkraummodells zur Entwicklung hygienegerechter Produkte im Bereich der Lebensmittelindustrie bietet sich die Nutzung des Wirkraummodells eben-

falls bei Produkten anderer Industriezweige, wie bspw. der Halbleiterfertigung oder Medizintechnik, an. Oftmals müssen bestehende Produkte oder Reinigungswerkzeuge für spezielle Anwendungsszenarien, in denen technische Sauberkeit gefordert wird, angepasst werden, für die jedoch keine expliziten Gestaltanforderungen existieren, vgl. Abschnitt 2.1.2. Das Wirkraummodell bietet Produktentwicklern die Grundlage zur Ableitung von Gestalteigenschaften für angepasste Anwendungsszenarien oder veränderte Randbedingungen derartiger Produkte.

Das Vorgehen zur Ableitung von Gestalteigenschaften basiert auf einer einleitenden Analyse des anzupassenden Produkts oder Reinigungswerkzeugs in dem angedachten, neuen Anwendungsszenario. Dabei werden in Anlehnung an Abschnitt 5.4 unbeabsichtigte Prozesse infolge von Nicht-Funktionen in der Nutzung analysiert, sodass die Ursachen für die mögliche Entstehung eben derer geklärt werden. Mit Hilfe der erkannten Ursachen für unbeabsichtigte Prozesse und deren Zusammenhang mit der bisherigen Produktgestalt, müssen Anpassungen vorgenommen werden, sodass das Produkt im neuen Anwendungsszenario hinsichtlich der Anforderungen an Sauberkeit einsetzbar ist. Dabei existieren gemäß Abbildung 6.16 verschiedene Ansätze für Anpassungen, welche verschiedene Elemente des jeweiligen Systems betreffen. In Abhängigkeit des Ansatzes lassen sich unterschiedliche Maßnahmen mit Hilfe des Wirkraummodells zur Verbesserung der technischen Sauberkeit ableiten. Die dargestellten Ansätze können wahlweise auch in Kombination auftreten.

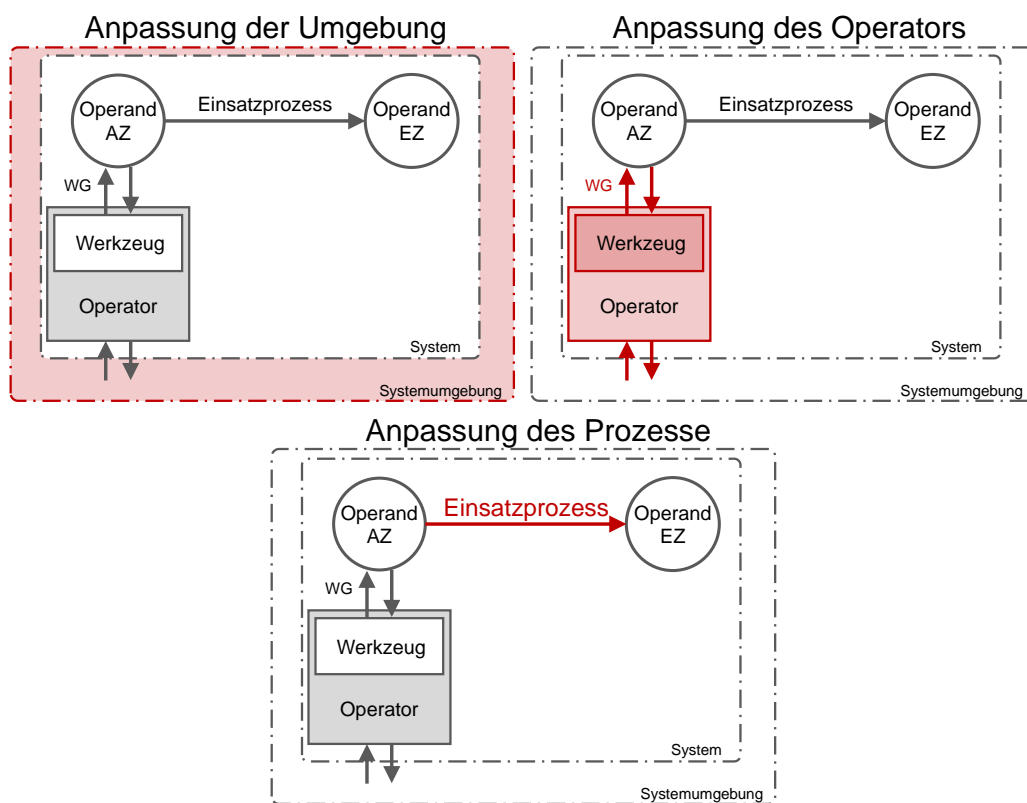


Abbildung 6.16: Ansätze zur Systemanpassung in Anlehnung an die Gliederung nach Abschnitt 6.2.1

Als Beispiel soll die Verlagerung einer Halbleiterfertigung von einer offenen Produktionsstätte in einen Reinraum dienen. Auf Grund erhöhter Anforderungen im Bereich der technischen Sauberkeit bedarf es einer Umgebung und einer Anlage, welche zu einer geringeren Verschmutzung des zu fertigenden Produkts führen. Hierzu sollen wohl die Umgebung als auch die Maschine, eine Beschichtungsanlage, angepasst werden. Als Umgebung der Anlage soll ein Reinraum mit Laminarströmung genutzt werden.

Die Granularität des Wirkraummodells in Abbildung 6.17 ist derart gewählt, dass die grundsätzliche Struktur des Systems analysiert, Schwachstellen erkannt und aufbauend darauf Gestalteigenschaften abgeleitet werden können. Im Wirkraum des Reinraums wird die Laminarströmung als Eigenschaft des Wirkraums dargestellt. Die Funktion der Laminarströmung ist die geführte Bewegung von Partikeln mit Hilfe von gereinigter Luft in Richtung der Auslässe am Boden des Raums. Hierdurch soll ein unkontrolliertes Verwirbeln und Ansammeln auftretender Partikel an unbeabsichtigten Bereichen verhindert werden. Aus der Analyse ergeben sich folgende Erkenntnisse für die Synthese:

- Alle Elemente in dem System, die orthogonal zur Strömungsrichtung orientiert sind, führen dazu, dass entstehende Partikel nicht in Richtung des Auslasses befördert werden können.
- Bereiche, die eine Verwirbelung der Strömung hervorrufen, führen zu einer unkontrollierten Verteilung von Partikeln auf angrenzenden Oberflächen.
- Bewegte Elemente, die sich entgegen der Strömungsrichtung oberhalb des zu fertigenden Produkts befinden, führen durch Partikelablösung zur Verschmutzung des zu fertigenden Produkts.

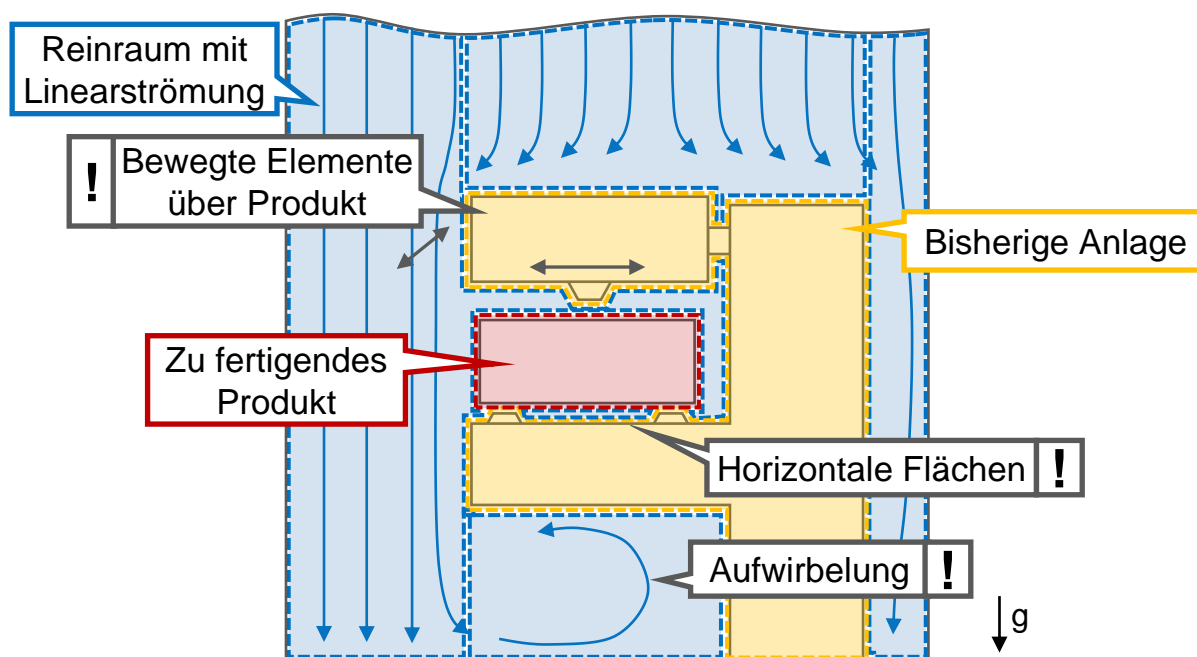


Abbildung 6.17: Beispiel der Anwendung des Wirkraummodells bei der Halbleiterfertigung

Basierend auf der Analyse und der abgeleiteten Erkenntnisse ist die Formulierung von Gestalteeigenschaften, die zu einer Reduzierung von Sauberkeit-Schwachstellen für dieses System führen, möglich:

- Inhalte von Wirkräumen, die dem Operator zugehörig sind, dürfen keine horizontalen Flächen aufweisen,
- Bauteilanordnungen, die zu einer Verwirbelung des Luftstroms führen, sind zu meiden, d. h. Bauteilkonturen dürfen keine plötzlichen Formabweichungen aufweisen,
- Sich berührende Bauteile dürfen oberhalb des zu fertigenden Produkts keine Relativbewegungen vollziehen.

Ein anderes Beispiel entstammt der Medizintechnik, bei dem ein Produkt entwickelt werden soll, dessen Reinigung im aktuellen Stand nur erschwert oder gar nicht möglich ist. Das Ableiten erforderlicher Gestalteeigenschaften sowohl für das Produkt selbst, als auch für erforderliche Reinigungswerkzeuge soll mit Hilfe des Wirkraummodells geschehen.

Bei Instrumenten für den Bereich der minimal-invasiven endoskopischen Operationstechnik, d. h. Instrumente für Eingriffe mit nur kleinsten Verletzungen von Haut und inneren Weichteilen, handelt es sich oftmals um rein mechanische Produkte. Abbildung 6.18 zeigt die grundsätzliche Funktionsweise eines derartigen Instruments. Sie besitzen einen Seilzugmechanismus, der eine intrakorporale Bewegung der Instrumentenspitze, also des eigentlichen Werkzeugs, von außerhalb ermöglicht. Bei vielen Operationswerkzeugen handelt es sich auf Grund ihrer aufwendigen Mechanik, welche die erforderliche Reinigung und Sterilisation nicht ermöglicht, um Einwegprodukte.³⁵⁸

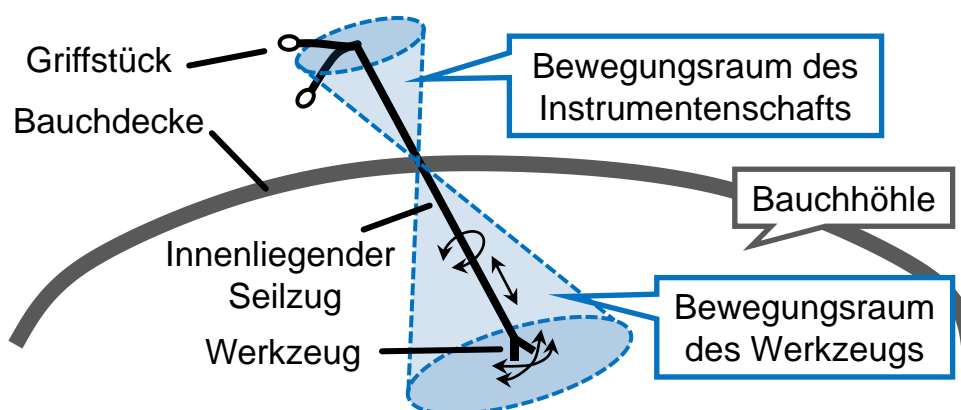


Abbildung 6.18: Funktionsweise und Wirkräume am Beispiel minimal-invasiver Operationsinstrumente im Einsatzprozess³⁵⁹

³⁵⁸ Vgl. Röse (2011), S. 12.

³⁵⁹ In Anlehnung an Röse (2011), S. 12.

Für verschiedene Prozesse bei der Operation werden unterschiedliche Instrumente verwendet, welche unterschiedliche Zwecke erfüllen, wie beispielsweise das Ermöglichen des Zugangs zum Körper, die Bildgebung, das Halten von Gewebe oder das mechanische sowie thermische Trennen sowie Koagulieren von Gewebe.³⁶⁰ Abbildung 6.19 zeigt ein beispielhaftes Instrument der Laparoskopie, welches mit einer Zange ausgerüstet ist und zum Fassen, Schneiden und Koagulieren von menschlichem Gewebe genutzt wird.

Im Zuge des Einsatzprozesses im menschlichen Körper, kann durch eine Analyse gezeigt werden, dass alle im Körper, aber auch teilweise außerhalb des Körpers befindliche Elemente des Instruments durch Blut oder Gewebe kontaminiert sind. Auf Grund der hohen Hygieneanforderungen im Bereich der Medizin müssen nach dem Einsatzprozess alle kontaminierten Elemente gereinigt und sterilisiert werden.³⁶¹ Das bedeutet, dass alle Oberflächen des Instruments, die mit Oberflächen des menschlichen Körpers oder mit Körperflüssigkeiten in Kontakt getreten sind im Anschluss einem Wiederherstellungsprozess des sterilen Zustands unterzogen werden müssen.

Während der Reinigungsprozesse müssen alle Partikel manuell und per Spülmaschine entfernt werden, sodass im anschließenden Sterilisationsprozess alle verbliebenen Mikroorganismen abgetötet bzw. inaktiviert werden können.³⁶² Dies bedeutet, dass alle Kontakte zwischen Verschmutzung und den Bauteilen des Instruments durch entsprechende Wirkungen, die von den Reinigungsprozessen ausgehen, gelöst und abtransportiert werden müssen.

Abbildung 6.19 zeigt die Skizze des Operationsinstruments, welches einer Patentschrift entnommen ist. Darin sind im Bereich des Griffstücks weitere Toträume und Spalte zu erkennen, in welche unbeabsichtigt Verschmutzung eindringen kann.³⁶³ Als Ergebnis der Analyse der zu reinigenden Flächen des Instruments geht hervor, dass insbesondere die Spalte am Werkzeug, der Hohlraum des Schafts, in dem der Seilzug liegt, sowie die Toträume und Spalte im Bereich des Griffstücks eine spezielle Berücksichtigung hinsichtlich der Gestaltung des Instruments bzw. von Reinigungswerkzeugen erfordern. Alle kontaminierten Oberflächen des Instruments, die durch das Reinigungsfluid sowie des Reinigungswerkzeugs nicht erreicht und dadurch keine lösende Wirkung erfahren, sind nicht reinigbar.

Auf Basis dieser Erkenntnisse lassen sich für dieses System folgende Gestalteigenschaften ableiten:

³⁶⁰ Vgl. Röse (2011), S. 4-6.

³⁶¹ Vgl. Bundesgesundheitsblatt (2012), S. 1245-1246.

³⁶² Vgl. DIN EN 556-1 (2002), S. 4; Jatzwauk (2012), S. 185.

³⁶³ Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf das Eintragen aller Toträume und Spalte verzichtet.

- Alle kontaminierten Oberflächen des Instruments müssen für das Reinigungswerkzeug frei zugänglich sein, sodass eine eindeutige Reinigung ermöglicht wird.
- Bauteilanordnungen, die zu unbefriedigend zu reinigenden Spalte führen, sind für Reinigungsprozesse zu trennen. Ist eine Trennung nicht möglich, können die Auswirkungen der Verunreinigung durch den Einsatz von Einweegelementen eliminiert werden, vgl. Abbildung 6.2.
- Die Reinigung schwer zugänglicher Oberflächen sollte durch entsprechend geformte Reinigungswerkzeuge unterstützt werden, wie beispielsweise die Reinigung des hohlen Schafts. Die Geometrie des Reinigungswerkzeugs soll die Reinigung des zu reinigenden Elements unterstützen.

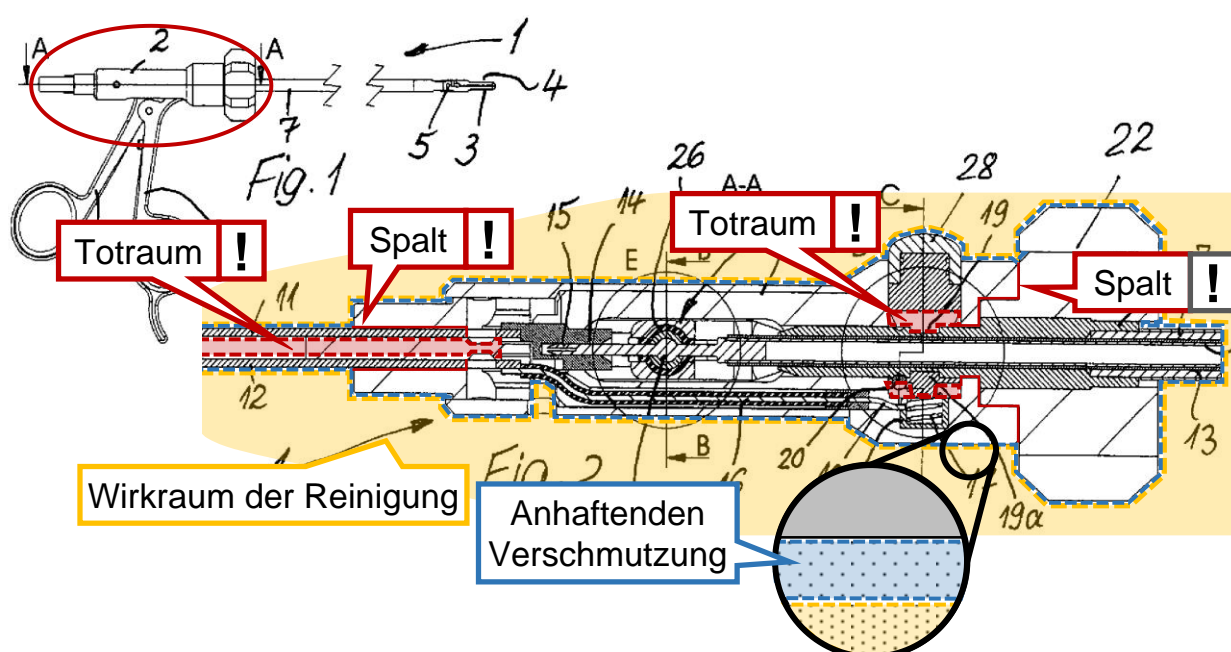


Abbildung 6.19: Operationsinstruments während der Reinigung, Ausschnitt aus Patentschrift³⁶⁴

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz des Wirkraummodells nicht nur auf den Bereich der Lebensmittelherstellung und -verarbeitung beschränkt ist, sondern auch Systeme anderer Industriezweige, wie bspw. der Medizintechnik oder der Halbleiterfertigung, analysiert und für die Gestaltung Anforderungen abgeleitet werden können.

³⁶⁴Quelle: Sutter (2000), S. 9, weitere Abbildungen finden sich in Anhang A2.

7 Evaluation anhand der Konstruktion einer hygienegerechten Schokoladengießmaschine

Im folgenden Kapitel 7 wird, basierend auf den vorgestellten Modellen aus Kapitel 4 und den darauf aufbauenden Kapiteln 5 und 6, die Anwendung des Wirkraummodells bei der Entwicklung einer Maschine im Zuge eines Industrieprojekts verdeutlicht.

Das Ziel der Evaluation in dieser Arbeit liegt im *Nachweis der Anwendbarkeit* des Wirkraummodells bei der Entwicklung hygienegerechter Produkte. Anwendungsevaluationen zielen auf die Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse und die Eignung zur Lösung von Aufgaben, für die die Modelle entwickelt wurden.³⁶⁵ Von großer Wichtigkeit in der folgenden Evaluation ist das Aufzeigen der Anwendbarkeit der in dieser Forschungsarbeit entwickelten Modelle und Methoden bei der Schwachstellenanalyse hinsichtlich des Erkennens von Nicht-Funktionen zur anschließenden hygienebetreffenden Optimierung der Maschine. Hierzu wird in den folgenden Abschnitten anhand einer Konstruktion einer Schokoladengießmaschine erläutert, inwiefern die Forschungsergebnisse bei der Entwicklung eines hygienegerechten Produkts verhelfen.

7.1 Grundlagen und Ausgangslage der Entwicklung

Der Industriepartner, die Firma *OKA-Spezialmaschinenfabrik GmbH & Co. KG*, stellt für die lebensmittelverarbeitende Industrie verschiedene Maschinen her, die für die Verarbeitung von Gebäck und Konfekt, Tiernahrung oder Milchprodukten, wie bspw. Käse, eingesetzt werden. Das Portfolio reicht von konventionellen mechanischen Maschinen bis zu vollautomatischen Hochgeschwindigkeitsmaschinen mit Arbeitsbreiten bis zu 1800 mm.

Die für das Projekt angestrebte Entwicklung zielt auf eine neuartige Maschine zur Herstellung von Pralinen mit dem sogenannten *One-Shot-Verfahren*. Pralinen, gefüllte Schokoladentafeln, Riegel und vergleichbare Schokoladenprodukte werden heutzutage oftmals mit Hilfe des One-Shot-Verfahrens produziert, vgl. Abbildung 7.1. Bei diesem Verfahren werden mit Hilfe von Schokoladengießmaschinen mindestens zwei verschiedene Gießmassen dosiert und darauffolgend gleich zeitig in eine Gießform gepumpt. Dabei entstehen zeitgleich Hülle und Füllung des Schokoladenprodukts, sodass zwischenzeitliche Kühlprozesse wie in anderen Verfahren nicht erforderlich sind. Die für die Schokoladenprodukte zu gießenden Massen werden in separaten *Vorratsbehältern* gespeichert, mit Hilfe von *Dosierpumpen* dosiert und anschließend durch eine gemeinsame, konzentrische *Ringdüse*, wie Abbildung 7.1 zeigt, zeitlich abgestimmt herausgepumpt. Übliche Schokoladengießmaschinen ermöglichen die gleichzeitige Produktion zwischen acht

³⁶⁵ Vgl. Blessing, Chakrabarti (2009), S. 184-185.

Schokoladenprodukten in der kleinsten Ausführung und bis zu 60 Produkten in den größten Arbeitsbreiten pro Takt. Damit ergeben sich durchschnittliche One-Shot-Produktionsleistungen in Abhängigkeit der Pumpengeometrie zwischen 100 kg/h und 3500 kg/h, was in Abhängigkeit des Pralinengewichts einer Taktzeit zwischen ca. 1,5 s und 3,5 s entspricht.³⁶⁶

Die zentrale Baugruppe einer Schokoladengießmaschine stellt die Dosiereinheit dar. Die Pumpen der Dosiereinheit ermöglichen die Dosierung und das Fördern der Gießmassen in Abhängigkeit der Maschinenarbeitsbreite in unterschiedlich vielen parallelen Gießkammern. Dosierpumpen stellen eine spezielle Form von Verdrängerpumpen dar, die entweder als Konstant- oder als Verstellpumpen ausgeprägt sind³⁶⁷, und liefern gezielt einen diskontinuierlichen Volumenstrom, indem pro Arbeitstakt definierte Dosiervolumina ausgegeben werden.

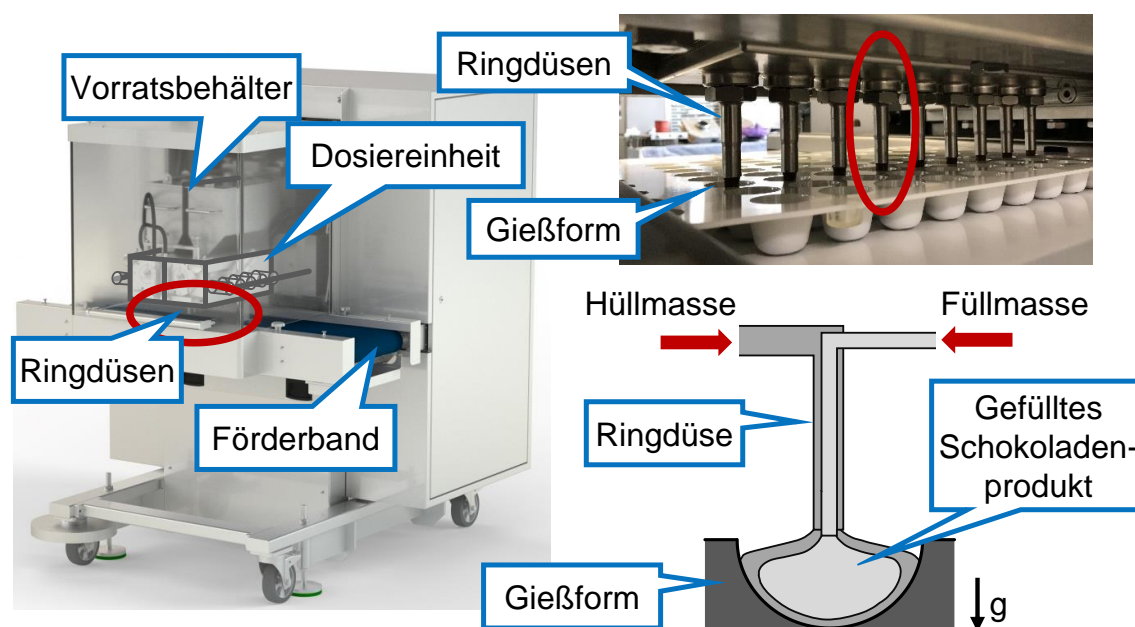


Abbildung 7.1: Zentrale Baugruppen der Maschine und Prinzipdarstellung des One-Shot-Verfahrens³⁶⁸

Existierende Dosiereinheiten bestehen in der Regel aus mehreren, parallelen Hubkolbenpumpen, wobei die Hubkolben-Anzahl von der Anzahl gleichzeitig zu dosierender Schokoladenprodukte abhängt. Abbildung 7.2 zeigt schematisch ein solches Hubkolbensystem, das aus neun parallelgeschalteten Hubkolbenpumpen aufgebaut ist, die über einen zentralen Antrieb angetrieben werden. Jede Hubkolbenpumpe besteht aus einem separaten Gehäuse, einem translatorisch beweglichen Hubkolben, einer zentralen drehbaren Ventilwelle sowie einer Einlass- und einer Auslassbohrung. Auf die Antriebssysteme der

³⁶⁶ Vgl. Meyer (2009), S. 427ff.; Kniel (2001).

³⁶⁷ Konstantpumpen fördern pro Arbeitstakt stets das gleiche Volumen. Bei Verstellpumpen ist eine Einstellung des verdrängten Volumens möglich, vgl. Findeisen, Helduser (2015), S. 130.

³⁶⁸ In Anlehnung an Beetz et al. (2018), S. 987.

beweglichen Bauteile wird an dieser Stelle nicht detailliert eingegangen, da diese für eine hygienegerechte Gestalt nicht von zentraler Wichtigkeit sind. Für den Dosierprozess werden die Hubkolben translatorisch aus dem Gehäuse herausbewegt, sodass in Abhängigkeit des zurückgelegten Weges durch einen partiellen Unterdruck ein definiertes Dosiervolumen entsteht. Die Rotation der Ventilwelle um 90° verbindet das Dosiervolumen mit der Auslassbohrung, sodass durch eine translatorische Bewegung des Hubkolbens in das Gehäuse hinein das für den Prozess notwendige Schokoladenvolumen verdrängt wird und in Richtung der Ringdüse gelangt.

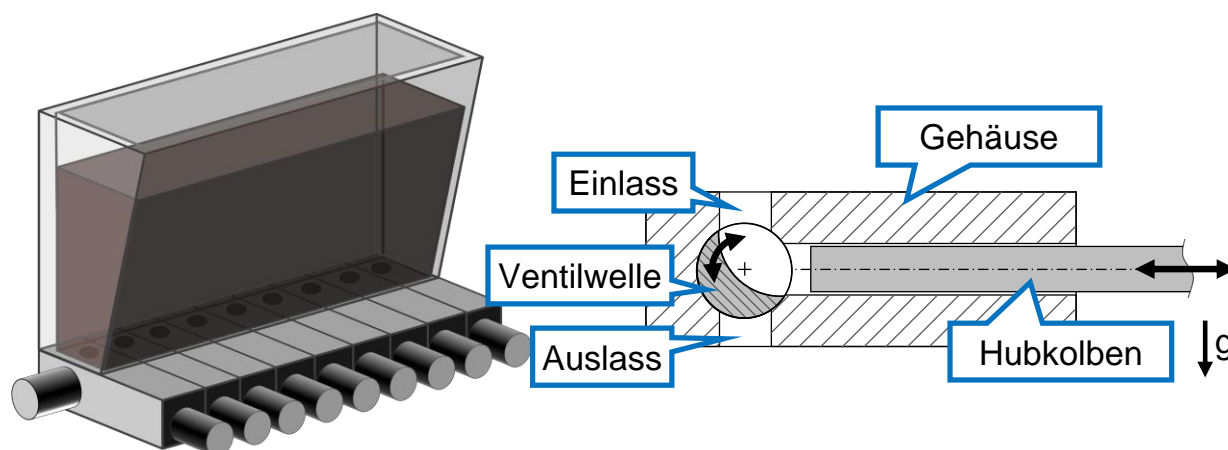


Abbildung 7.2 links: Schematische Darstellung eines Hubkolbensystems, rechts: Schnittdarstellung einer Hubkolbenpumpe³⁶⁹

Schokoladengießmaschinen mit Hubkolbenpumpen besitzen jedoch Nachteile hinsichtlich verschiedener Nutzungsprozesse. Betreiber derartiger Gießmaschinen bemängeln die während des Einsatzprozesses auftretende Leckage von Schokolade auf das Förderband.³⁷⁰ Weiterhin werden die Reinigungsprozesse, welche durch aufwendige (De-)Montageprozesse geprägt sind, beanstandet, da eine vollständige, manuelle Demontage aller Hubkolben sowie deren Gehäuse und weiterer Bauteile notwendig ist. Im Anschluss müssen alle Einzelteile gereinigt werden, wodurch auf Grund der hohen Anzahl von Einzelteilen ein entsprechend hoher zeitlicher Aufwand resultiert.³⁷¹

Ziel der nachfolgenden Konstruktion einer Dosiereinheit mit neuen Dosierpumpen für eine One-Shot-Schokoladengießmaschine ist die Beseitigung von hygiene relevanten Schwachstellen, welche insbesondere während Nutzungsphase in Einsatz- und Reinigungsprozessen zu einem erhöhten Kontaminationsrisiko führen. Das Zielsystem des Entwicklungsprojekts sieht das Beibehalten des diskontinuierlichen Pumpverfahrens mit Hilfe von Verdrängerpumpen in der neuen Produktgeneration als eine zentrale Anforderung vor.

³⁶⁹ In Anlehnung an Beetz et al. (2018), S. 987.

³⁷⁰ Vgl. Beetz et al. (2018), S. 992.

³⁷¹ Vgl. Beetz et al. (2018), S. 987.

7.2 Schwachstellenanalyse des Ausgangssystems

Zu Beginn der Entwicklung gilt es zunächst die *beabsichtigten Einsatzprozesse* und Wirkelemente zur Realisierung der *beabsichtigte Funktionen* zu identifizieren und das Zusammenwirken zu verstehen, damit anschließend hygienerelevante Schwachstellen der Konstruktion als Basis unbeabsichtigter Prozesse ermittelt werden können. Abbildung 7.3 zeigt den Dosierprozess, welcher Teil der relevanten Einsatzprozesse ist, im Detail. Hierin sind Wirkräume und Wirkbewegungen in die jeweiligen Zustände eingezeichnet.³⁷²

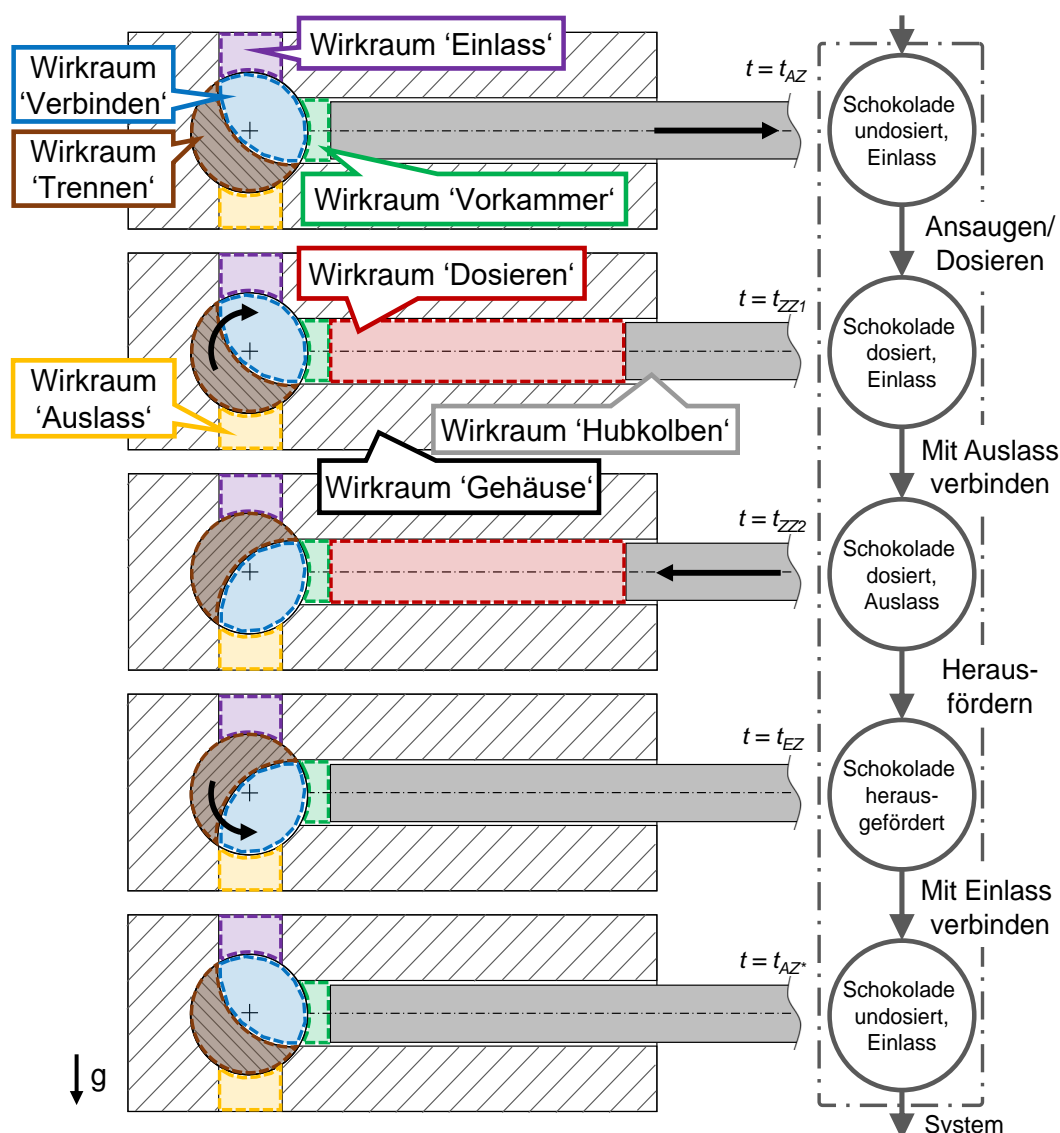


Abbildung 7.3: Wirkräume während des Ansaugprozesses

Während des Ansaugprozesses wird die Schokolade, welche den passiven Operanden darstellt, aus dem Vorratsbehälter durch Vergrößerung des Wirkraums 'Dosieren' und einem daraus resultierenden partiellen Unterdruck in ebendiesen Wirkraum gefördert. Die

³⁷² Zur Analyse der beabsichtigten Funktionen kann beispielsweise der C&C²-Ansatz genutzt werden. An dieser Stelle ist eine Detaillierung dieses Vorgehens jedoch nicht notwendig.

Wirkräume 'Einlass', 'Verbinden' und 'Vorkammer' werden von Schokolade durchströmt. Der Inhalt des Wirkraums 'Gehäuse' umgibt die zuvor genannten Wirkräume und sorgt für ein gerichtetes Leiten des Fluidstroms. Im Endzustand des Ansaugprozesses besitzt der Wirkraum 'Dosieren' ein beabsichtigtes Soll-Volumen zwischen 5 und 15 cm³, welches durch die translatorische Bewegung des Hubkolben-Wirkraums variabel einstellbar ist. Damit das dosierte Volumen herausgefördert werden kann, wird es durch Rotation der Ventilwelle und des Wirkraums 'Trennen' mit dem Wirkraum 'Auslass' verbunden. Anschließend verdrängt der Hubkolben das Dosiervolumen, sodass die Schokolade durch die Wirkräume 'Vorkammer', 'Verbinden' und 'Auslass' herausgefördert wird. Zur Wiederherstellung des Anfangszustands wird abschließend die Ventilwelle in die ursprüngliche Stellung rotiert, sodass der nächste Dosierprozess beginnen kann.

Nach der Klärung der Funktionen für die beabsichtigten Prozesse gilt es darauf aufbauend hygienerelevante Schwachstellen, d. h. existierende Nicht-Funktionen zu analysieren, welche im Hinblick auf eine hygienegerechte Gestalt zu vermeiden sind, und darauf aufbauend Anforderungen für die Konstruktion abzuleiten.

Die eingekreisten Bereiche in Abbildung 7.4 zeigen existierende Nicht-Funktionen, die zur *Leckage*, beispielsweise während des Teilprozess 'Herausfördern', führen, da dabei ein partieller Überdruck aufgebaut wird und die Leckagewirkung vergrößert wird. Durch die Existenz des Wirkraums 'Leckage 1' zwischen Hubkolben und Gehäuse, ergibt sich ein alternativer Weg für die Schokoladenmasse während des Herausförderns. Abbildung 7.4b zeigt, dass Schokoladenmasse ebenfalls in den Wirkraum 'Leckage 2' hineingepresst werden kann. Innenliegende Hubkolbenpumpen werden durch den Wirkraum 'Leckage 2' untereinander verbunden, wohingegen die beiden außenliegenden Hubkolben des Dosiersystems jeweils einen den Leckagewirkraum durch fehlende Dichtungen zur Umgebung besitzen, wodurch es zu *unbeabsichtigtem Austreten* und dem Bilden eines WRK mit dem Wirkraum der Umgebung kommen kann, vgl. Abbildung 7.4a. Die dargestellten Leckagewirkräume existieren permanent, d. h. während aller Zustände im Einsatzprozess.

Aus diesen Überlegungen werden folgende Kernanforderungen (KA) an die Gestalt abgeleitet:

- **KA1:** Anzahl der Leckagewirkräume zwischen Umgebung und Lebensmittel reduzieren zur Minimierung des Auftretens von Leckage
- **KA2:** Leckage minimieren, beispielsweise durch Einsatz von Dichtungen zwischen Wirkräumen der Umgebung und des Lebensmittels
- **KA3:** Anzahl der notwendigen Dichtungen minimieren zur Reduzierung des Reinigungsaufwands

- **KA4:** Auswirkungen von Leckage reduzieren, indem beispielsweise austretende Schokolade in unkritischere Bereiche gelangt

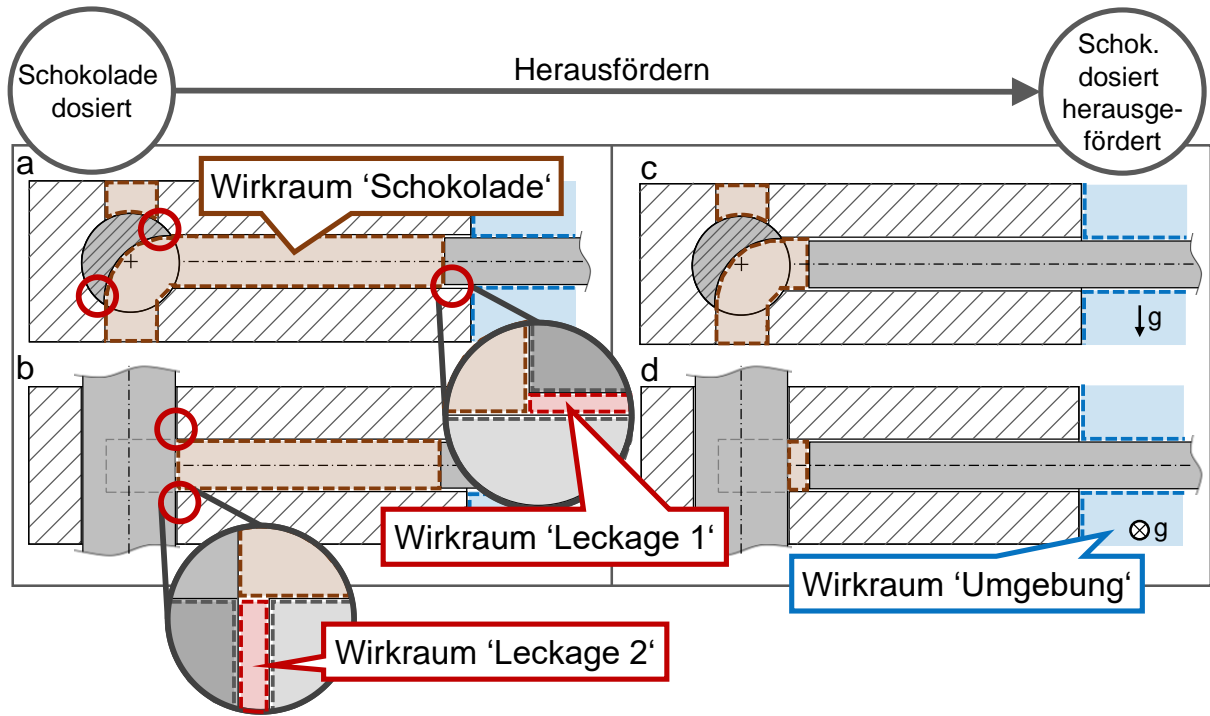


Abbildung 7.4: Leckagewirkräume bei der Hubkolbenpumpe

Abbildung 7.5 verdeutlicht die Existenz potentieller *Toträume* der Hubkolbenpumpe, in denen sich Schokolade während des Förderns sowie der Rotation der Ventilwelle auf Grund von Leckagewirkräumen sammelt und ein selbstständiges Rückfließen nicht eindeutig ermöglicht wird.

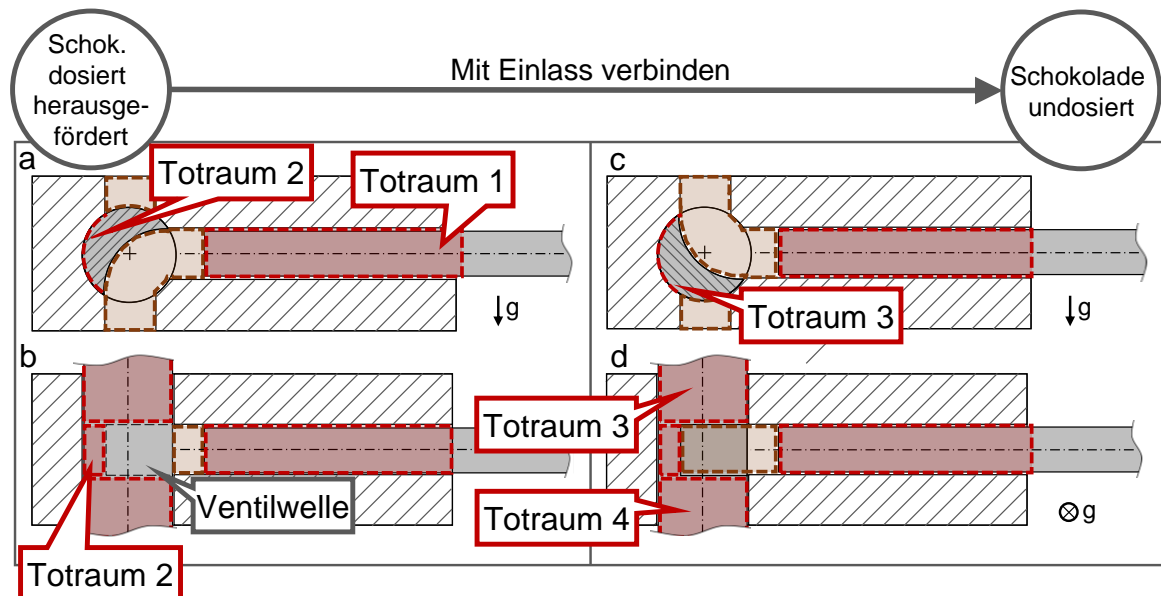


Abbildung 7.5: Toträume der Hubkolbenpumpe

Totraum 1 beschreibt den Raum zwischen dem Hubkolben und dem Gehäuse, Totraum 2 befindet sich zwischen der Ventilwelle und dem Gehäuse. Durch eine oszillierende Bewegung der Ventilwelle um je 90° bleibt dieser Totraum dauerhaft bestehen, sodass darin eingeschlossene Schokoladenmasse zu einer Kontamination führen kann. Totraum 3 und 4 umfassen die Bereiche zwischen der Ventilwelle und dem Gehäuse, welche in Abbildung 7.5d dargestellt sind.

Hieraus werden folgende Anforderungen abgeleitet:

- **KA5:** Größe des Totraums am Kolben, bspw. Kolbenlänge, reduzieren
- **KA6:** Kontinuierliche Wirkbewegungen bevorzugen, sodass der Inhalt der Toträume stetig durchmischt wird
- **KA7:** Zusätzliche Spül-Wirkräume zur Reinigung der Toträume einbringen

Mit Nicht-Funktionen, die zu *unbeabsichtigtem Anhaften* von Schokolade auf Oberflächen der Hubkolbenpumpe führt, ist immer dann zu rechnen, wenn Oberflächen der geschmolzenen Schokolade in Kontakt mit Bauteiloberflächen kommen.

Damit Schokolade hinsichtlich Glanz, Schmelz- und Bruchverhalten sowie Fettreifbildung und Lagerbeständigkeit ein optimales Erscheinungsbild aufweist, wird eine Verarbeitungstemperatur zwischen 32° C und 33° C benötigt.³⁷³ Kühlt die Schokoladenmasse nach dem Einsatzprozess in der Maschine ab, kristallisiert sie, sodass sich die Schokoladenmasse an den jeweiligen Oberflächen der Maschine verfestigt. Verfestigungen der Schokoladenmasse zwischen Bauteilen, die zur Funktionserfüllung eine Relativbewegung ausführen müssen, sind dahingehend besonders kritisch zu beurteilen. Dies gilt insbesondere auch für Bauteile, die für Reinigungsprozesse demontiert werden müssen. *Unbeabsichtigtes Anhaften* von flüssiger Schokolade findet demnach an allen Flächen der Maschine statt, mit denen Schokolade durch Leckage, Eindringen in Toträume sowie durch beabsichtigte Prozesse in Kontakt kommt.

Folgende Anforderungen ergeben sich auf Basis der Untersuchung des Anhaftens:

- **KA8:** Anzahl und Größe von Oberflächen, an denen unbeabsichtigtes Anhaften auftritt, reduzieren (insbesondere Toträume und Leckagewirkräume)
- **KA9:** Werkstoffeigenschaften wählen, die zur Verringerung des Anhaftens führen
- **KA10:** Oberflächen temperieren, sodass keine Verfestigung der Schokolade auftritt

Abbildung 7.6 zeigt den Anfangs- und des Endzustand der Hubkolbenpumpe des Prozesses des Herausförderns. *Unbeabsichtigtes Ablösen* von Werkstoffpartikeln innerhalb

³⁷³ Vgl. Kattenberg (2001), S. 1; Danzl (2013), S. 50.

dieses Prozesses kann durch Relativbewegungen von Hubkolben und Gehäuse hervorgerufen werden. Dies ist im Speziellen dann der Fall, wenn der dazwischen liegende Wirkraum 'Spalt' während der Bewegung eine Nicht-Funktion erfüllt und überbrückt wird, sodass die Wirkräume von Hubkolben und Gehäuse in direkten Kontakt treten. In Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften und der auftretenden Kräfte kommt es hierdurch zu unbeabsichtigten Ablösen. Der Wirkraum 'Schokolade' steht über WRK 1 in direktem Kontakt zu dem Wirkraum des Ablösens, wodurch abgelöste Partikel mit dem Wirkraum der Schokolade ein Wirkflächenpaar bilden und zu einer Kontamination des Lebensmittels führen können.

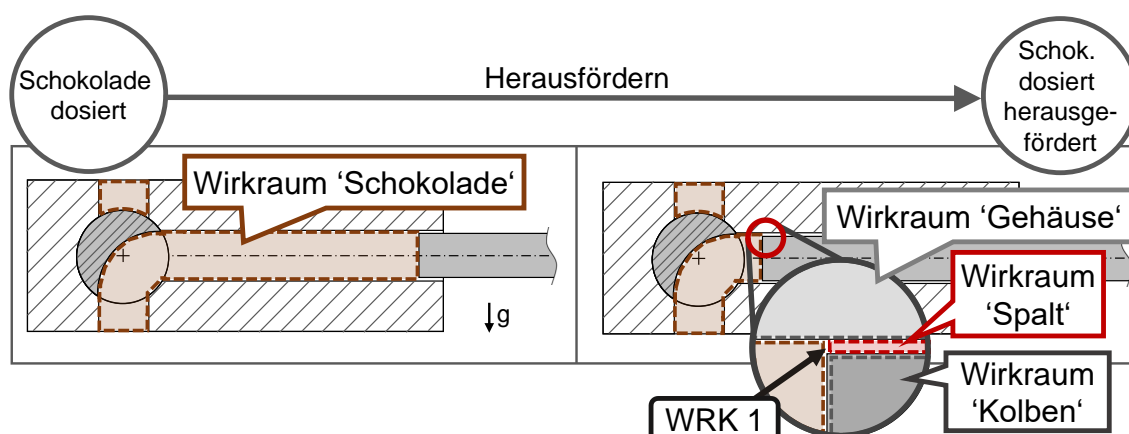


Abbildung 7.6: Unbeabsichtigtes Ablösen am Hubkolben

Durch die Rotation der Ventilwelle im anschließenden Prozess, dessen Zustände in Abbildung 7.7 dargestellt sind, wird die Ausgangsstellung wiederhergestellt. Vergleichbar mit Abbildung 7.6 ist durch die Relativbewegung in diesem Prozess zwischen Wirkraum 'Gehäuse' und 'Ventilwelle' mit unbeabsichtigten Ablösen von Werkstoffpartikeln zu rechnen, sofern an dieser Stelle ein direkter Bauteilkontakt auftritt. Die Voraussetzung hierfür ist gegeben, sobald der Wirkraum des Spalts das Bilden eines Wirkraumkontakts zwischen Wirkraum 'Gehäuse' und 'Ventilwelle' nicht verhindern kann.

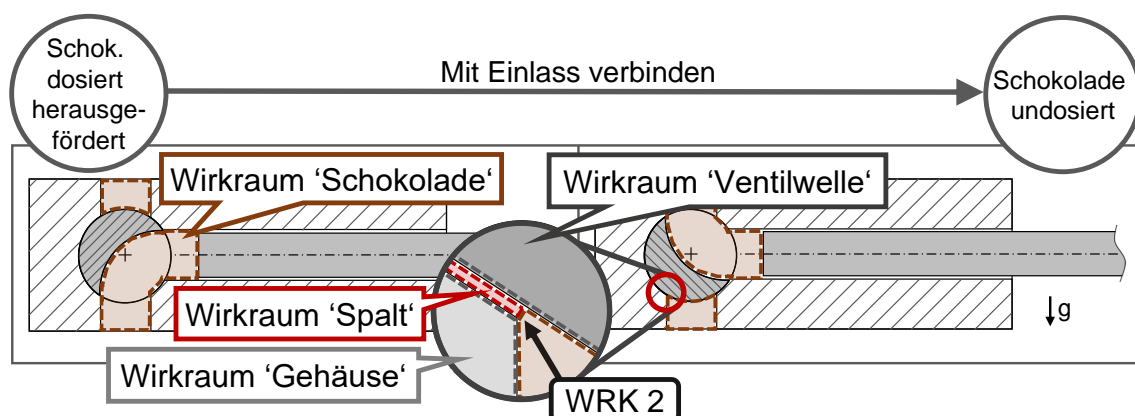


Abbildung 7.7: Unbeabsichtigtes Ablösen an der Ventilwelle

Enge, funktionsrelevante Passungen, fertigungsbedingte Formabweichungen der Wirkraumgeometrie sowie anliegende Belastungen an der Ventilwelle führen hierbei zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit des Eintretens von unbeabsichtigtem Ablösen.

Folgende Anforderungen ergeben sich auf Basis der Analyse des unbeabsichtigten Ablösens:

- **KA11:** Eindeutige Lagerung von relativ zueinander bewegten Bauteilen
- **KA12:** Für enge Passungen Werkstoffe mit geeigneten Gleiteigenschaften verwenden

Nicht-Funktionen, die für *Eindringen von Fremdstoffen* in den Lebensmittelbereich verantwortlich sind, stellen ein Kontaminationsrisiko dar und sind ausschnittsweise in Abbildung 7.8 durch potentiell gefährdete Bereiche dargestellt. Während des Ansaugprozesses wird der Dosier-Wirkraum vergrößert, wodurch mittels partiellen Unterdruck Schokolade angesaugt wird. Durch die Wirkräume 'Spalt 1' und 'Spalt 2', existieren Verbindungen zwischen dem Wirkraum mit Schokolade und dem Wirkraum der Umgebung (WRK 3 und 4). Partikel, die sich im Wirkraum der Umgebung befinden, können durch den partiellen Unterdruck und die Spaltwirkräume in den Wirkraum der Schokolade gesaugt werden, wodurch eine Kontamination des Lebensmittels hervorgerufen werden kann. Hieraus lassen sich folgende Anforderungen ableiten:

- **KA13:** Bereiche, in denen sich Schokolade befindet und ein geringerer Druck als in der Umgebung herrscht, dürfen keine Verbindung zur Umgebung besitzen
- **KA14:** Schaffung einer fremdpartikelarmen Maschinenumgebung

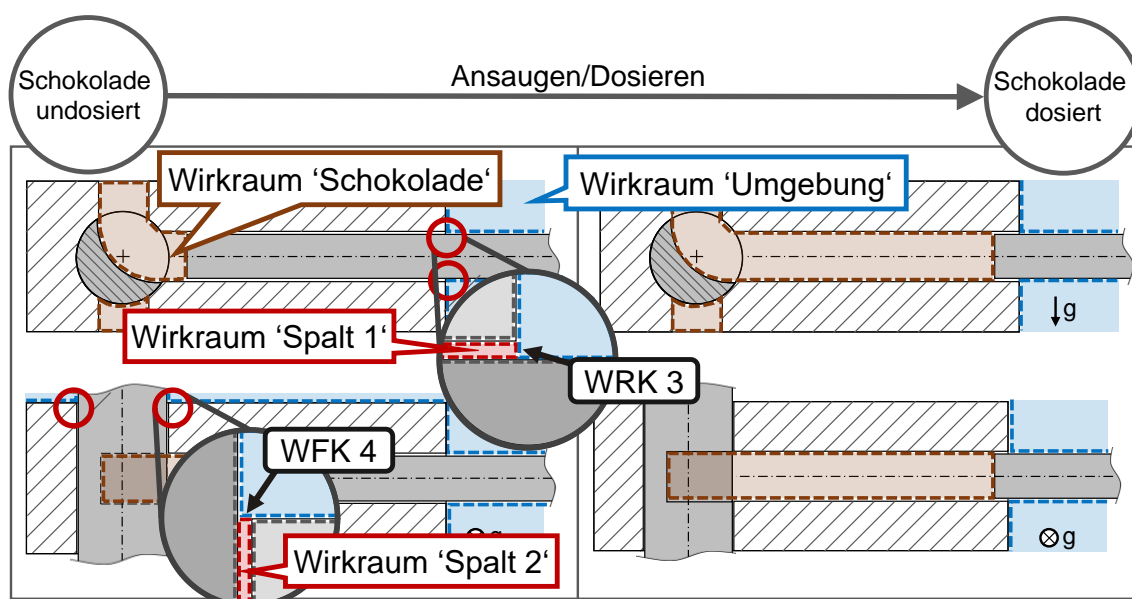


Abbildung 7.8: Eindringen von Fremdstoffen in die Hubkolbenpumpe

Zur Wiederherstellung des anfänglichen sauberen Zustands der Pumpe, beispielsweise für den Wechsel der Schokoladenart, muss das System gereinigt werden. Hierbei gilt es

alle Oberflächenkontakte zwischen anhaftender Schokolade sowie weiterer z. B. eingedrungener oder abgelöster Stoffe und den Oberflächen der Hubkolbenpumpe mit Hilfe geeigneter Reinigungsverfahren zu lösen und aus dem System zu fördern.

Die Dosiereinheit wird für Reinigungsprozesse demontiert und in Einzelteile zerlegt. Die lebensmittelberührenden und verschmutzten Bauteile zeigt Abbildung 7.9. Verschmutzte Bauteile sind über gebildete Wirkraumkontakte mit dem Lebensmittel, beispielsweise WRK 1, oder Fremdstoffen charakterisiert. Durch die Zerlegung in Einzelteile soll das Erreichen aller verschmutzten Bereiche sichergestellt werden. Der Demontage nachgelagert ist die „Out-of-Place“ Reinigung mit Hilfe eines schokoladenlösenden Reinigungsfluids innerhalb einer speziell für diese Dosiereinheit konstruierte Spülmaschine. Hierbei wirkt das Reinigungsfluid mit Hilfe geeigneter Wirkbewegungen und Fluid-Geschwindigkeiten auf die Kontakte zwischen Verschmutzung und Bauteilen. Die Wirkbewegung des Reinigungsfluids erfolgt wie Abbildung 7.9 zeigt von unten und radial von den Seiten, sodass alle Wirkräume mit Verschmutzung erreicht werden sollen.

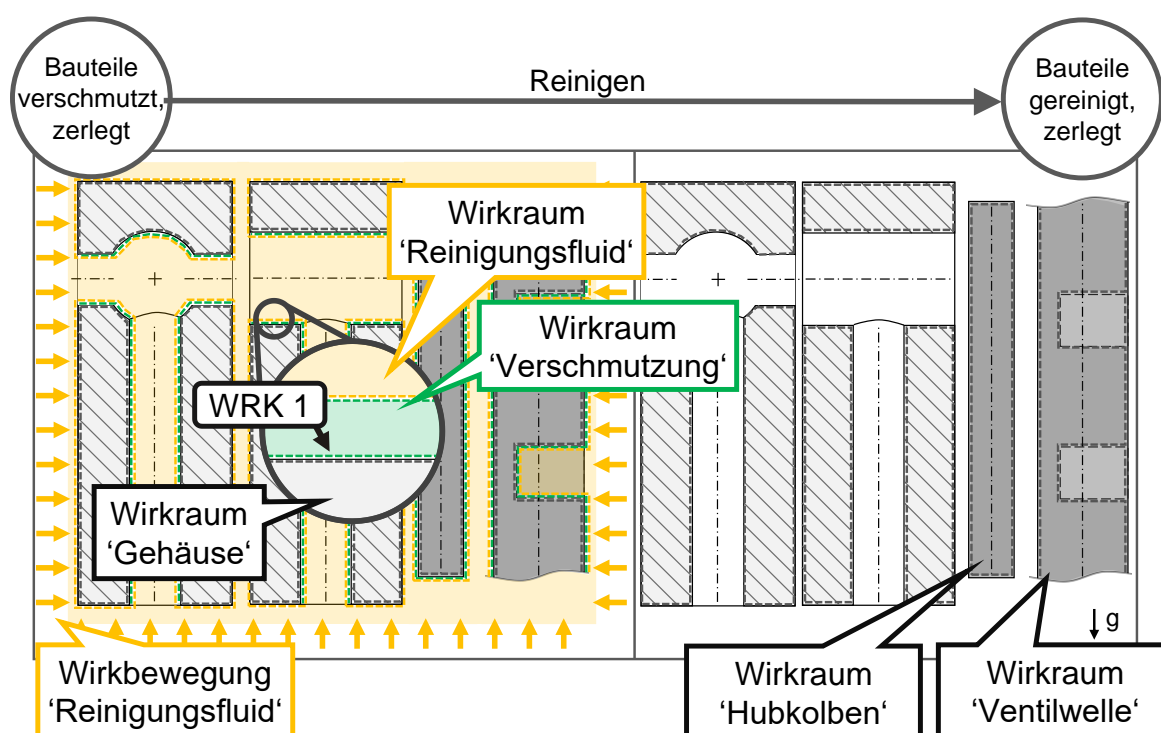


Abbildung 7.9: Wirkräume des Hubkolbensystems während der Reinigung

Aus dieser Analyse leiten sich folgende Anforderungen für die Konstruktion ab:

- **KA15:** Ermöglichen des Durchspülens ohne Demontage zur Reduzierung des manuellen Reinigungsaufwands
- **KA16:** Minimierung der Anzahl von Bauteilen zur Reduzierung des Reinigungsaufwands
- **KA17:** Zugänglichkeit der verschmutzten Wirkräume der demontierten Bauteile erhöhen

7.3 Gestaltsynthese neuer Lösungen

Die Synthese neuer Gestaltlösungen für eine neue Dosierpumpe basiert auf der Variation der Gestalt mit dem Ziel der Beseitigung der im Analyseprozess identifizierten Schwachstellen durch Erfüllung der abgeleiteten (Kern-)Anforderungen. Die durch Variation und Kombination generierten Lösungsvarianten werden insbesondere hinsichtlich der Reduzierung der Anzahl hygienerrelevanter Nicht-Funktionen analysiert.

Wirkraumstruktur der Dosierpumpe

Die Analyse der Hubkolbenpumpe zeigt, dass sich insbesondere durch die Translationsbewegung der neun Hubkolben Verbindungen zur Umgebung ergeben, welche ein erhöhtes Kontaminationsrisiko zur Folge haben. Jede einzelne Hubkolbenpumpe ist über einen Leckage-Wirkraum mit der Umgebung in Kontakt, wodurch Schokolade austreten kann oder Fremdstoffe eintreten können. Weiterhin führen Relativbewegungen der Bauteile zu nachteiligem Abrieb, welcher direkt in das Lebensmittel gelangt.

Aus diesen Gründen werden im Zuge der Gestaltsynthese neue Lösungsvarianten erarbeitet, bei denen die genannten hygienerlevanten Schwachstellen nicht auftreten. Dieses Vorgehen soll dazu führen, dass hygienerrelevante Schwachstellen nicht aufwendig ausgebessert werden müssen, sondern, dass die Schwachstellen von Beginn an nicht existent sind.

Die Ergebnisse in Form der abgeleiteten Anforderungen an die Gestalt der vorangegangenen wirkraumbasierten Analyse der Hubkolbenpumpe sollen für die Entwicklung einer neuen Dosiereinheit herangezogen werden. Da die neue Dosierpumpe das Einsatzverfahren des *volumetrischen Dosierens* beibehalten soll, werden die verfahrensprinziprelevanten Wirkrauminhalte und -anordnungen der Hubkolbenpumpe aus den Analyseergebnissen extrahiert und für die systematische Lösungssuche genutzt. Abbildung 7.10 zeigt die Wirkraumstruktur einer einzelnen Dosierkammer, welche die relevanten Eigenschaften der Dosierpumpe beinhaltet. Die gesamte Dosiereinheit soll aus insgesamt neun parallelen Dosierpumpen bestehen, die aus Gründen der Übersicht nicht alle abgebildet sind.

Die dargestellte Wirkraumstruktur beinhaltet neben den Wirkräumen auch deren Topologieeigenschaften in Form einer prinzipiell notwendigen Verknüpfung der Wirkräume zueinander. Die angrenzenden Begrenzungen sind bewusst nicht miteinander verbunden, um bei der Lösungssuche zunächst keine Einschränkungen vorzunehmen. Im Gestaltungsprozess sind die Begrenzungen anschließend derart festzulegen, dass keine Leckage entstehen kann.

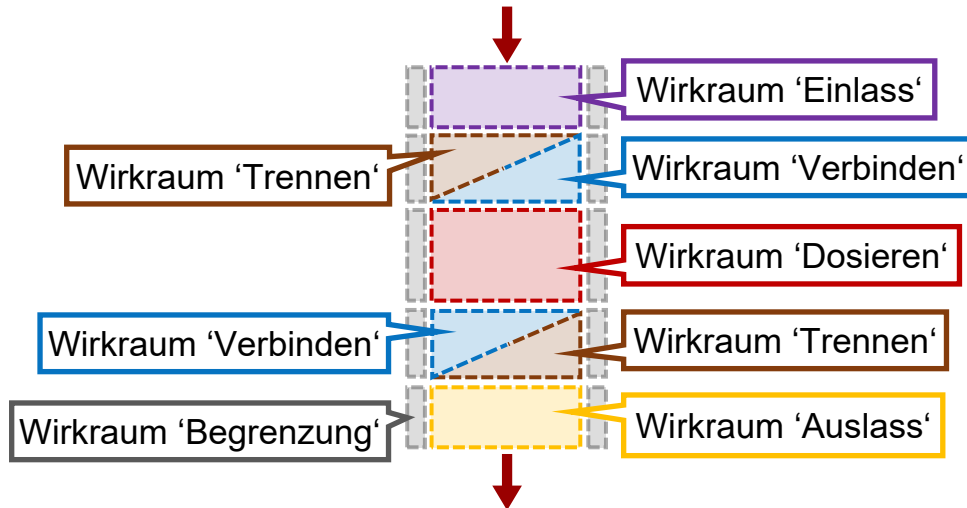


Abbildung 7.10: Verfahrensrelevante Wirkräume und deren Anordnung für eine Dosierkammer der Dosiereinheit

Abbildung 7.11 zeigt die Prozessstruktur des Dosierverfahrens mit Hilfe der Wirkraumstruktur sowie relevanten Eigenschaften der Wirkräume. Dabei ist ersichtlich, dass die Inhalte der Wirkräume zu unterschiedlichen Prozesszeitpunkten unterschiedliche Eigenschaften aufweisen müssen. Von erheblicher Relevanz ist hierbei das Erreichen des geforderten variablen Dosiervolumens, d. h. der Verhinderung von Leckage und Anhäufung von Material in Toträumen.

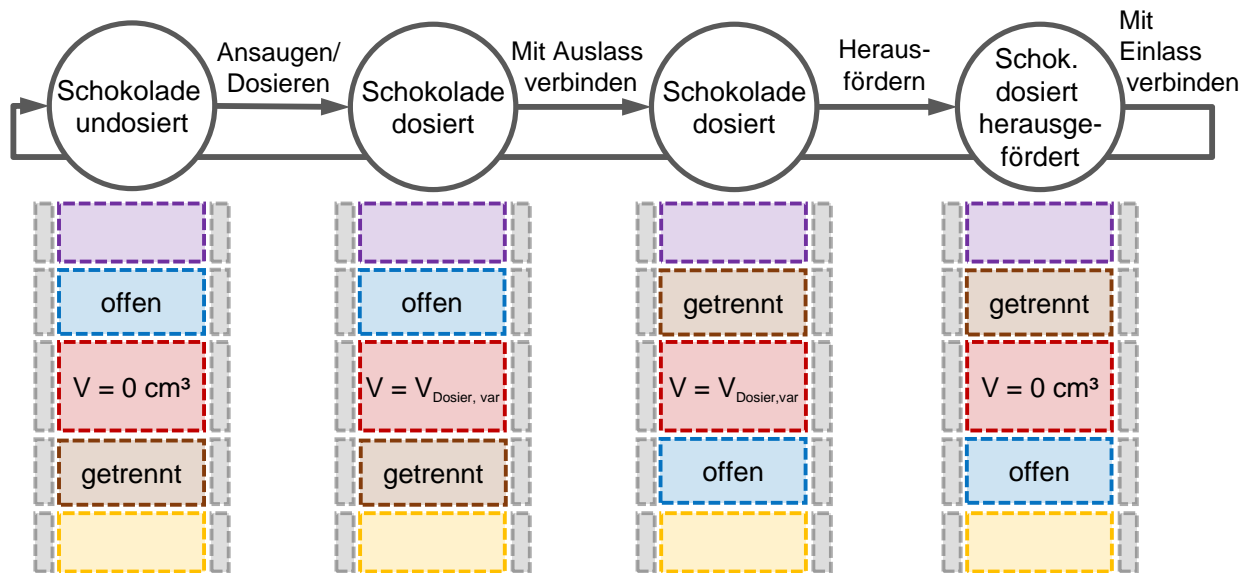


Abbildung 7.11: Wirkräume im Prozesszusammenhang des volumetrischen Dosierverfahrens

Erarbeitung von Lösungsvarianten

Basierend auf der Wirkraumstruktur der Dosierpumpe in Abbildung 7.10 und Abbildung 7.11 werden mit Hilfe der Syntheseprozesse neue Lösungsvarianten entwickelt. Dabei steht neben der beabsichtigten Funktionserfüllung insbesondere die Reduzierung von Nicht-Funktionen im Vordergrund.

Die Verbindungen zwischen dem Wirkraum 'Dosieren' und dem Wirkraum der Umgebung stellen maßgebliche Schwachstellen der bisherigen Dosierpumpe dar. Einerseits führen diese Verbindungen zur Leckage von Schokolade, andererseits können dadurch Fremdstoffe in die Schokolade gelangen, die zu einer Kontamination führen. Aus diesem Grund soll bei der neuen Dosierpumpe die Anzahl der Leckagewirkräume reduziert werden. Dies kann dadurch erreicht werden, dass beispielsweise zusätzliche Dichtungen bei den Hubkolben sowie der Ventilwelle eingesetzt werden. Dies bedingt jedoch eine größere Anzahl von Bauteilen und eine erhöhte Anzahl von Toträumen bzw. Spalte. Mit dem Ziel einer möglichst einfachen Reinigung und einer verringerten Kontaminationsgefahr sollen daher Schwachstellen nicht nur lediglich ausgebessert, sondern die grundsätzliche Struktur der Dosierpumpe verändert werden, sodass die Anzahl Schwachstellen reduziert wird.

Der zentrale Wirkraum für die Erfüllung des Dosierens stellt der Wirkraum 'Dosieren' dar. Zum Ansaugen, Dosieren und Fördern muss die Größe des Wirkraums in Abhängigkeit des Prozesses variieren. Umgebende Wirkraumanteile sind in der Lage durch eine entsprechende Wirkbewegung den Wirkraum so zu verändern, dass die im jeweiligen Prozessschritt geforderte Dosiermenge erreicht wird. Auf Basis der Eigenschaftensvariation von Modellelementen soll systematisch ein Lösungsfeld erarbeitet werden. In Abbildung 7.12 sind Varianten abgebildet, welche die Dosierfunktion erfüllen und durch die Variation des Werkstoffverhalten, starr oder elastisch, die Art der Wirkbewegung, translatorisch und rotatorisch, sowie die Anzahl von bewegten Körpern gebildet werden.

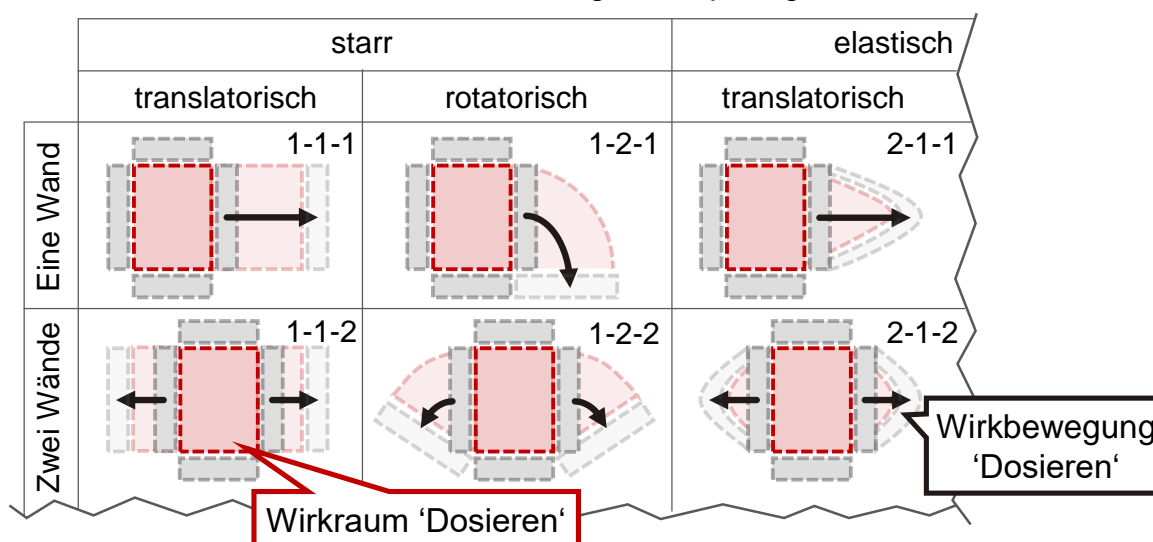


Abbildung 7.12: Systematische Variation zur Vergrößerung des Dosier-Wirkraums (Ausschnitt)

Es bietet sich an, die Anzahl der zu Leckage führenden Nicht-Funktionen, die durch die Verbindung des Dosier-Wirkraums und der Umgebung entstehen, durch die Nutzung vorhandener verfahrensrelevanter Wirkräume zu reduzieren. Abbildung 7.13 zeigt unterschiedliche daraus entwickelte prinzipielle Gesamtlösungen der Dosiereinheit. Sie sind

insbesondere durch die geringe Anzahl an Verbindungen zwischen Dosier-Wirkraum und Umgebung charakterisiert.

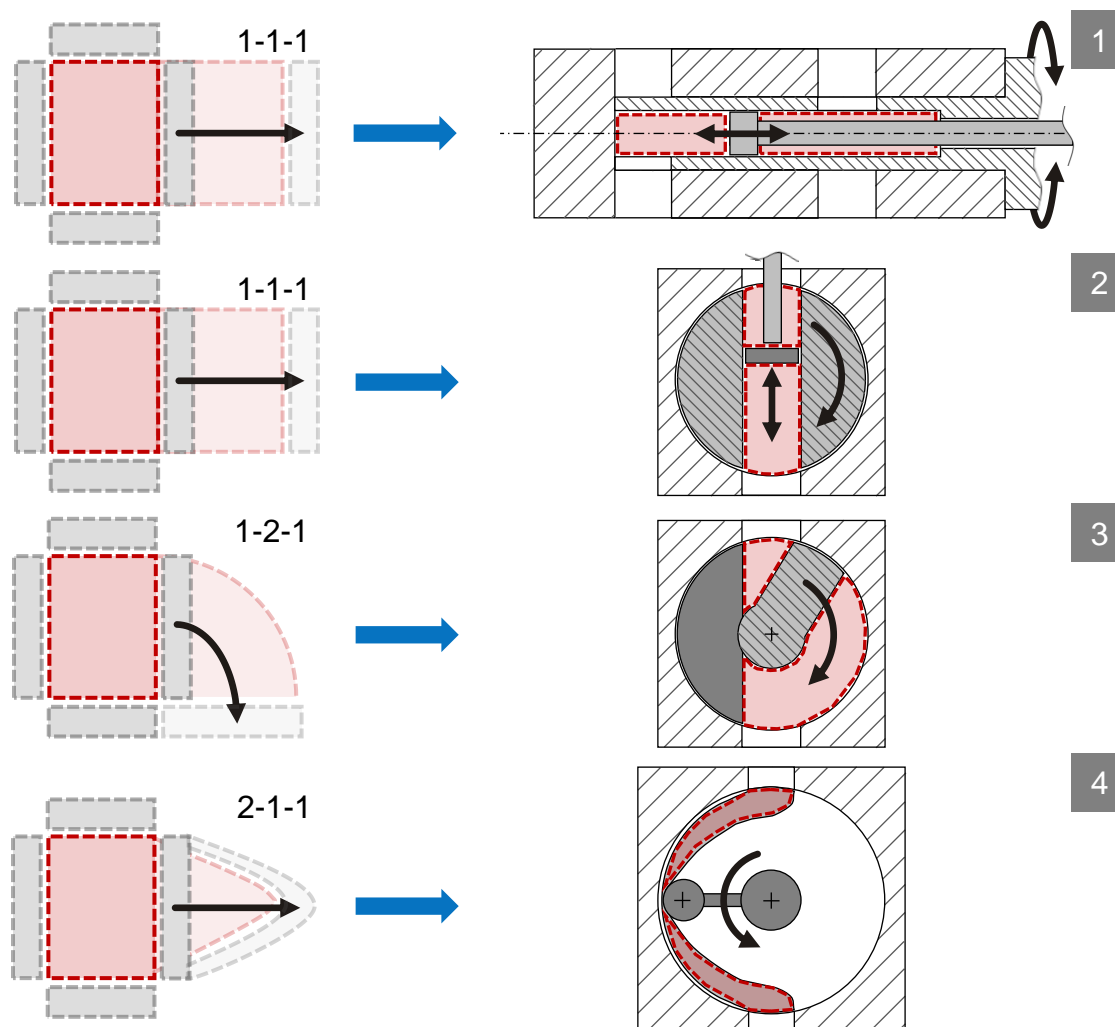


Abbildung 7.13: Prinzipielle Gesamtlösungen der Dosiereinheit

Gestaltung der Dosierpumpe

Im Zuge des Bewertungsprozesses zeigte sich, dass Variante 3 aus Abbildung 7.13 von einem Expertenteam als aussichtsreichste Variante bewertet wurde. Die Bewertungsergebnisse in Abbildung 7.14 verdeutlichen, dass die Verschleißanfälligkeit als wichtigstes hygienerelevantes Kriterium eingeschätzt wird und insbesondere bei diesem Kriterium drei der vier Varianten deutliche Defizite aufweisen. Bei der Konkretisierung der Variante 3 gilt es insbesondere auf die Reduzierung von Toträumen zu achten, da diese im Bewertungsprozess als besonders kritisch angesehen werden. Während des Konkretisierungsprozesses soll das Wirkraummodell genutzt werden, um eine Entscheidungsgrundlage der voranschreitenden Gestalt unter hygienerelevanten Anforderungen zu ermöglichen.

Kriterien	Gew.	Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
Anzahl Bauteile KA15-17	0,22	2	0,44	2	0,44	4	0,88	3	0,66
Leckageanfälligkeit KA1-4; KA13-14	0,44	1	0,44	2	0,88	3	1,32	4	1,76
Verschleiß KA11-12	1	1	1,00	1	1,00	3	3,00	0	0,00
Reinigbarkeit KA8-10	0,56	2	1,12	2	1,12	3	1,68	2	1,12
Keine Toträume KA5-7	0,56	1	0,56	1	0,56	2	1,12	4	2,24
Summe		7	3,56	8	4	15	8	13	5,78

Abbildung 7.14: Bewertung der Varianten mittels gewichteter Bewertungskriterien

Abbildung 7.15 zeigt einen ersten grobmaßstäblichen Vorentwurf. Dieser teilt sich in die Antriebs- und Getriebeeinheit, die Dosiereinheit bestehend aus neun parallel angeordneten Dosierkammern sowie der Lagerungseinheit. Die Gestaltungsbereiche sind derart angeordnet, dass im Gegensatz zur ursprünglichen Dosiereinheit eine völlige Kapselung der Dosiereinheit ermöglicht wird, sodass die Möglichkeiten des Eindringens von Fremdstoffen oder einer Leckage der Schokolade reduziert sind. Weiterhin sind lediglich an den beiden Enden des Dosierbereichs Dichtungen notwendig, da alle anderen Kammern keine Verbindung zur Umgebung aufweisen. Das Auftreten von Verschleiß wird durch eine eindeutige Lagerung der Hohl- und der Schieberwelle erreicht, wobei die jeweiligen Lagereinheiten gegenüber dem Lebensmittelbereich abgedichtet und einfach demontierbar gestaltet sind. Zur Reinigung ist eine vollständige Entnahme der Dosiereinheit vorgesehen, sodass diese eine Reinigung an einem separaten Ort ermöglicht wird, mit dem Ziel die Verschmutzung der Restmaschine zu reduzieren.

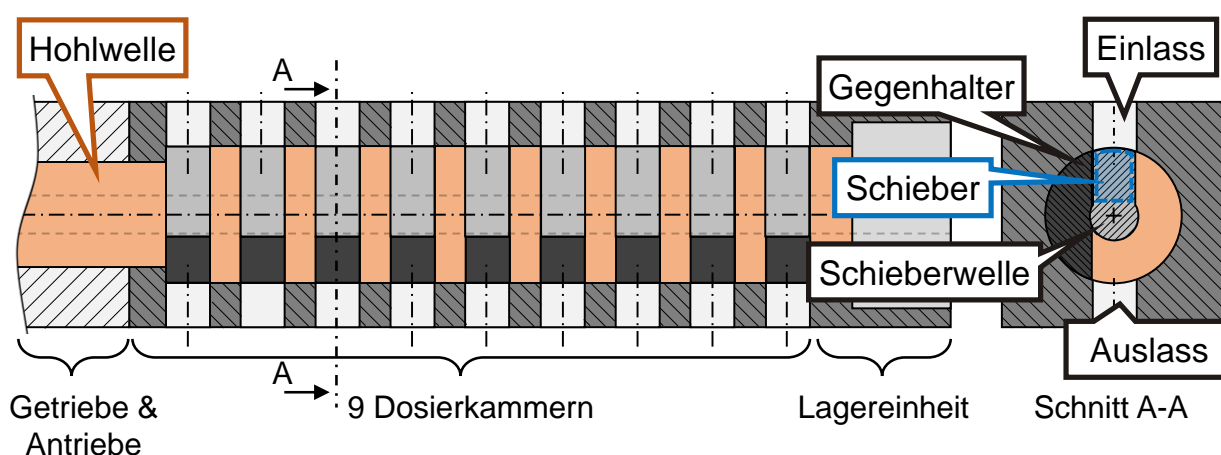


Abbildung 7.15: Vorentwurf der Dosiereinheit mit Gestaltungsbereichen

Im ersten Entwurf bestehen die Dosierkammern aus dem Schieber, der Schieberwelle, den Gegenhaltern sowie der Hohlwelle. Es zeigt sich, dass die Reduzierung von Nicht-Funktionen bei diesem Konzept insbesondere von der Gestaltung dieses Bereichs abhängt, da hier die Schokolade verarbeitet wird. Entscheidend ist, neben der Vermeidung

des Austretens von Schokoladen und Eindringens von Fremdstoffen, Toträume zu verhindern sowie die Reinigung durch eine einfache Demontage der gesamten Einheit zu erleichtern. Eine Herausforderung bei der Gestaltung der Dosiereinheit stellt die Verbindung zwischen Schiebern und Schieberwelle dar. Abbildung 7.16 zeigt Analyse- und Syntheseschritte zur Gestaltung der Verbindung, welche durch die Wirkraummodellierung relevanter Wirkräume unterstützt werden.

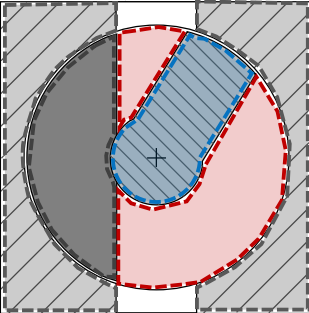
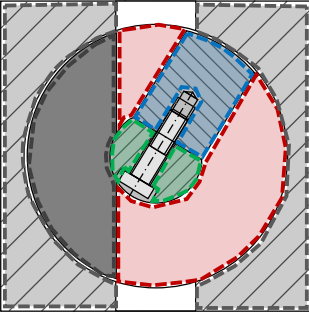
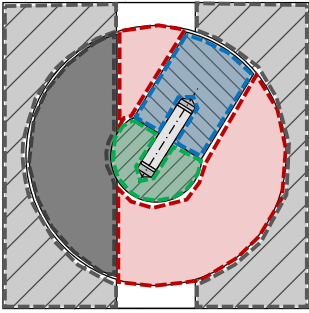
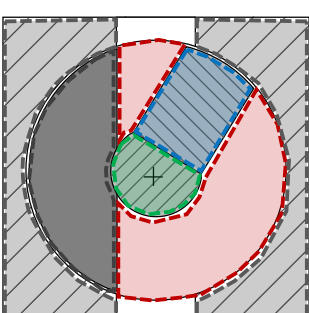
Ausgangslösung	Schwachstellen	Gründe	Maßnahmen
	<ul style="list-style-type: none"> - Schieberwelle nicht fertigbar/ nicht montierbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Geometrische Restriktionen - Welle und Schieber einteilig 	<ul style="list-style-type: none"> - Schieber und Welle trennen - Realisierung einer reibkraftschlüssigen Verbindung
	<ul style="list-style-type: none"> - Unbeabsichtigtes Eindringen zwischen Schieber & Welle sowie zwischen Schraube & Bohrung - Totraum in Sacklochbohrung - Erschwerte Reinigung dieser Flächen 	<ul style="list-style-type: none"> - Schraubverbindung innerhalb des Dosierwirkraums - Spalte in Kontakt mit Dosierwirkraum 	<ul style="list-style-type: none"> - Ersetzen der Schraubverbindung durch lösbare Verbindung für vereinfachte Reinigung
	<ul style="list-style-type: none"> - Unbeabsichtigtes Eindringen zwischen Schieber & Welle sowie zwischen Bolzen & Bohrung - Totraum in Sacklochbohrung - Unbeabsichtigtes Ablösen durch Kontakt von Schieber und Gehäuse 	<ul style="list-style-type: none"> - Stiftverbindung innerhalb des Dosierwirkraums - Spalte in Kontakt mit Dosierwirkraum - Fehlende radiale Sicherung des Schiebers 	<ul style="list-style-type: none"> - Versetzen der Verbindung von Schieber und Welle außerhalb des Wirkraums der Schokolade
	<ul style="list-style-type: none"> - Unbeabsichtigtes Eindringen zwischen Schieber & Welle sowie zwischen Bolzen & Bohrung 	<ul style="list-style-type: none"> - Spalte in Kontakt mit Dosierwirkraum 	<ul style="list-style-type: none"> - Trennung von Schieber und Welle während Reinigungsprozessen

Abbildung 7.16: Iteratives Vorgehen beim Gestalten der Dosierpumpe

Die Ausgangslösung, bei der der Schieber und die Schieberwelle in einem integralen Bauteil realisiert sind, stellt aus hygienerelevanten Gesichtspunkten eine Variante dar,

die lediglich Spalte besitzt, die durch das Wirkprinzip des Konzepts bedingt sind. Diese Gestaltvariante muss jedoch durch Restriktionen der Fertigungsverfahren sowie der fehlenden Montierbarkeit verworfen werden.

Mit Hilfe eines iterativen Vorgehens wurde die Gestalt der Dosiereinheit stetig weiterentwickelt, bis die Anzahl der hygienerelevanten Nicht-Funktionen auf ein tragbares Minimum reduziert wurde. Die erarbeitete Gestalt zeichnet sich durch die in Abbildung 7.17 dargestellte Trennung von Schieber und Schieberwelle in separate Bauteile aus. Die Verbindung der Bauteile findet gemäß Detail A in Abbildung 7.17 außerhalb des Lebensmittelbereichs statt, sodass das Eindringen in Spalte der Verbindungselemente verhindert und dadurch die Reinigung vereinfacht wird.

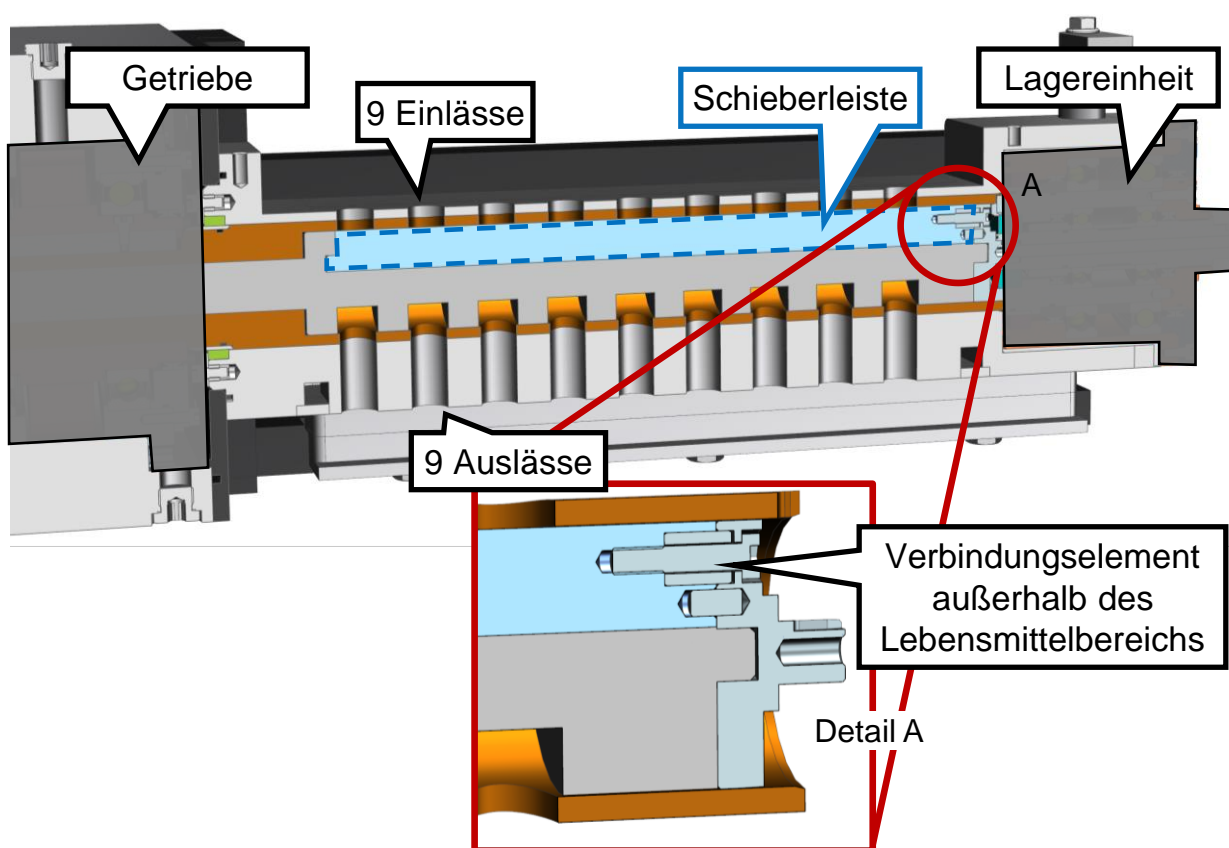


Abbildung 7.17: CAD-Modell der Verbindung von Schieberleiste und Schieberwelle

Auf Basis der Festlegung der Verbindungsart und Gestalt von Schieber und Welle wurden alle davon abhängigen Gestaltungsbereiche gestaltet. Abbildung 7.18 zeigt das CAD-Modell des Gesamtentwurfs der Dosiereinheit. Durch die Kapselung der Dosiereinheiten werden die wesentlichen Nachteile, resultierend aus der Vielzahl Nicht-Funktionen bisheriger Dosiereinheiten, vermieden. Insbesondere der unbeabsichtigte Austritt von Schokolade während der Dosierprozesse wird vollständig durch das angepasste Pumpenkonzept verhindert. Alle Dosierkammern befinden sich gesammelt auf einer Schieberwellen-Hohlwellen-Baugruppe und nicht wie bisher in separaten Hubkolben-Gehäuse-Einheiten,

wodurch der Demontageaufwand für die Reinigung durch die reduzierte Anzahl von Einzelteilen gesenkt wurde. Die Reduzierung der Anzahl von Toträumen stellt zudem die Basis für ein geringeres Kontaminationsrisiko dar.

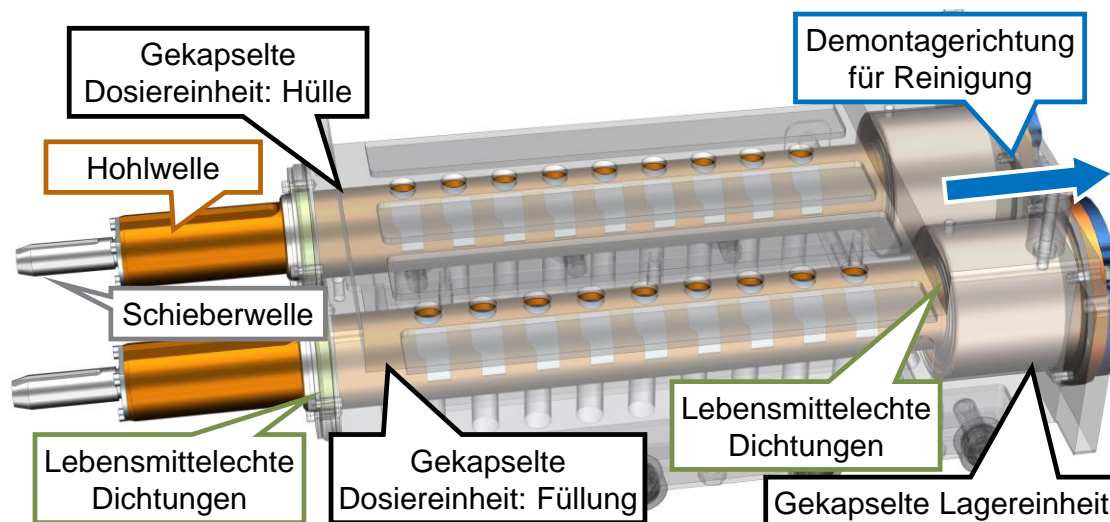


Abbildung 7.18: Gesamtentwurf der Dosiereinheit

Abbildung 7.19 zeigt das bisherige Hubkolbensystem und das neu entwickelte Schwenkolbensystem vergleichend anhand hygienerelevanter Kriterien. Die Anzahl regelmäßig zu reinigender Bauteile, notwendiger Demontageschritte zur Reinigung sowie die Anzahl unbeabsichtigter Verbindungen von Lebensmittelbereich und Umgebung wurden signifikant gesenkt, wodurch eine erhebliche Erhöhung erfüllter hygienerelevanter Anforderung erreicht werden konnte. Lediglich die Anzahl potenzieller Toträume blieb unverändert.

Kriterien	Bisheriges Hubkolbensystem ¹	Neuentwickeltes Schwenkolbensystem
Anzahl regelmäßig zu reinigender Bauteile ²	~56	~27
Anzahl Demontageschritte für die Reinigung ²	~64	~37
Anzahl potentieller Toträume pro Dosierkammer im Betrieb	~3	~3
Anzahl nicht gedichteter Verbindungen zur Umgebung im Betrieb ²	~20	0
Weitere Merkmale	<ul style="list-style-type: none"> • Leckage tropft auf Fließband • Abrieb gelangt ins Lebensmittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Leckage auf Fließband • Abriebpotential verringert • Erleichterung der Demontage der Dosiereinheit durch Zugriff von vorne • Antriebskomponenten nicht über dem Lebensmittelbereich

¹ Exakte Angaben zu diesem System liegen nicht vor und wurden daher anhand vorliegender Broschüren und Demonstrationsvideos abgeschätzt; ² Grundlage für Werte sind Dosiersysteme mit insgesamt 18 Pumpeinheiten für 9 One-Shot-Produkte. Die angegebene Anzahl hängt von der Granularität der Zählweise ab.

Abbildung 7.19: Vergleich zwischen dem bisherigen Hubkolbensystem und dem entwickelten Schwenkolbensystem

Die potenziellen Toträume treten jedoch lediglich im Betrieb auf und können im Zuge der Reinigung vollständig gereinigt werden, da sie stets zwischen zwei demontierbaren Bauteilen auftreten.

Abbildung 7.20 zeigt das im Rahmen der Evaluation entwickelte Dosiersystem im montierten Zustand in der Gesamtmaschine. Die ersten Tests lassen erwarten, dass die angestrebte Zielsetzung der Verbesserung der Dosiereinheit hinsichtlich der Aspekte einer hygienegerechten Gestaltung erreicht wird. Umfangreichere Dauertests bei Pilotunternehmen wurden bis zur Vollendung dieser Forschungsarbeit nicht abschließend beendet.



Abbildung 7.20: CAD-Modell der gesamten Schokoladengießmaschine³⁷⁴

³⁷⁴ Quelle: Beetz (2017), S. 7.

8 Fazit

Das Fazit fasst die zentralen Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und ordnet sie bezüglich ihres Nutzens für die Produktentwicklung ein. Im abschließenden Ausblick wird ein Überblick über mögliche nachfolgende Forschungsvorhaben gegeben, die auf den in dieser Arbeit beschriebenen Ergebnissen aufbauen.

8.1 Ergebnisse

Die Entwicklung hygienegerechter Produkte bzw. Maschinen ist von erheblicher Relevanz, insbesondere, wenn es um die Erhaltung der Gesundheit geht. Konsumenten von Nahrungsmitteln gilt es vor Krankheiten durch kontaminierte Lebensmittel zu schützen. Aus Sicht der Maschinenbetreiber spielt aus diesem Grund eine hygienegerechte Produktgestalt eine wesentliche Rolle. Einerseits werden hierdurch die Anzahl von Lebensmittelrückrufen reduziert, andererseits ergeben sich für sie Vorteile hinsichtlich anfallender Wartungsarbeiten, primär in Form von verkürzten oder vereinfachten Reinigungsprozessen. Die Potenziale von Hygienic Design wurden bisher noch nicht vollends ausgeschöpft, da bisherige Konstruktionshilfsmittel lediglich bei bestimmten Maschinenarten oder ausgewählten Baugruppen unterstützen und daher nicht für alle Konstruktionen einsetzbar sind. Bedarf bestand daher in Möglichkeiten zur hygieneorientierten Optimierung bisher nicht abgedeckter Produkte durch allgemeinere Methoden.

In der vorliegenden Arbeit wurde aufbauend auf dieser Problemstellung ein Ansatz in Form eines Produktmodells entwickelt, welches auf dem C&C²-Ansatz aufbaut, womit bislang lediglich beabsichtigte Funktionen und Fehlfunktionen ermittelt werden konnten. Durch die Beschreibung technischer Systeme mit Hilfe von Wirkräumen konnte eine Möglichkeit entwickelt werden Nicht-Funktionen zu ermitteln, d. h. fehlende Funktionen, die dadurch geprägt sind, dass notwendige Wirkflächenpaare zur Realisierung einer beabsichtigten Funktion *nicht* vorhanden sind. Hierdurch besteht insbesondere im Bereich der Entwicklung hygienegerechter Produkte das Potential hygienerelevante Schwachstellen, wie beispielsweise Ursachen von Leckage oder Toträumen, zu identifizieren, wodurch die Basis für die daran anschließende Optimierung gebildet wird.

In dieser Forschungsarbeit konnte gezeigt werden, dass das Wirkraummodell im Rahmen der Entwicklung hygienegerechter Produkte genutzt werden kann, um hygienerelevante Schwachstellen zu ermitteln, Anforderungen an die Gestaltoptimierung abzuleiten und während der Synthese diese Schwachstellen systematisch zu beseitigen.

Es wurde verdeutlicht, dass hygienegerechte Produkte neben der Erfüllung von beabsichtigter Funktionen und Prozessen auch hygienerelevante Anforderungen erfüllen d. h. folgende *unbeabsichtigter* Prozesse verhindern müssen:

- Unbeabsichtigtes *Anhaften* von Stoffen an relevanten Oberflächen

- Unbeabsichtigtes *Ansammlung* von Stoffen, bspw. in Toträumen
- Unbeabsichtigtes *Ablösen* oder Diffusion von Stoffen
- Unbeabsichtigtes *Austreten* Stoffen
- Unbeabsichtigtes *Eindringen* von Stoffen aus der Systemumgebung

Basis der unbeabsichtigten Prozesse stellen die beschriebenen Nicht-Funktionen dar, welche durch die fehlenden Funktionen zu Kontamination führen können. Es wurde gezeigt, wie mit Hilfe des Wirkraummodells diese Nicht-Funktionen als Basis unbeabsichtigter Prozesse identifiziert werden können.

Aufbauend auf der Analyse wurde gezeigt, wie das Wirkraummodell während der Phase der *Gestaltsynthese* genutzt werden kann. Dabei werden die drei Syntheseprinzipien der Gestaltung, *Hinzufügen von Wirkflächenpaaren oder Leitstützstrukturen*, *Entfernen von Wirkflächenpaaren oder Leitstützstrukturen* sowie *Ändern der Eigenschaften von Wirkflächenpaaren oder Leitstützstrukturen*, genutzt, um die Anzahl aufgedeckter Nicht-Funktionen aus der Analyse zu reduzieren. Mit dem Ziel eine allgemein nutzbare Unterstützung zur Umsetzung der Anforderung zu ermöglichen, wurde eine Tabelle als Anregungen zur Nutzung von Syntheseprinzipien erarbeitet. Diese soll Anhaltspunkte für die Beseitigung von hygiene relevanten Nicht-Funktionen geben. Anhand des Vorgehens des methodischen Gestaltens der VDI 2223 wurde verdeutlicht, wie das Wirkraummodell während einzelner Phasen zur Anforderungsumsetzung genutzt werden kann.

Bei Produkten mit Hygiene relevanz müssen neben dem Einsatzprozess auch Reinigungsprozesse bei der Konstruktion beachtet werden. Soll die oft geforderte „*einfache Reinigbarkeit*“ der Maschine durch die Ausnutzung von Synergieeffekten erreicht werden, können zum Erkennen der Zusammenhänge Ergebnisse der wirkraumbasierten Analyse herangezogen werden. Es wurde gezeigt, dass hierzu Wirkgrößen, die für Einsatzprozesse erforderlich sind, genutzt werden können oder wie die vorhandene Gestalt angepasst werden kann, um den Zusatzaufwand für den Nutzer während der Reinigungsprozesse zu senken.

Das Wirkraummodell kann darüber hinaus bei der Entwicklung von Produkten, die nicht für die Produktion von Lebensmitteln eingesetzt werden, aber dennoch ein hohes Maß an Sauberkeit erfordern, in ähnlicher Weise eingesetzt werden. Dies wurde am Beispiel der Halbleiterfertigung sowie eines Produkts der Medizintechnik aufgegriffen. Dabei wurde gezeigt, dass, basierend auf identifizierten Nicht-Funktionen, Soll-Gestalteigenschaften einer Neu- bzw. Anpassungskonstruktion abgeleitet werden können.

Die abschließende Evaluation der Nutzbarkeit des Wirkraummodells bei der Entwicklung von hygienegerechten Produkten wurde anhand der Entwicklung einer hygienegerechten Schokoladengießmaschine durchgeführt. Ziel der Konstruktionsaufgabe stellte die Identifikation bestehender Nicht-Funktionen mit Hilfe des Wirkraummodells dar, welche es im

Zuge der Gestaltanalyse zu eliminieren bzw. das Einwirken zu reduzieren oder die Auswirkungen zu minimieren galt. Gefordert war hierbei insbesondere, dass die Schwachstellen nicht durch aufwendige Ausbesserungen der Feingestalt reduziert werden, sondern dass die Existenz der Schwachstellen von Grund auf verhindert wird. Dabei wurde die Dosiereinheit aufbauend auf einem neuen Dosierpumpenkonzept grundlegend neu konzipiert. Es konnte gezeigt werden, dass in der Analyse unter Zuhilfenahme des Wirkraummodells Ursachen der Schwachstellen der bisherigen Dosierpumpe herausgearbeitet werden können. Aufbauend auf einer Reduzierung des Systems auf relevante Wirkräume wurde im Zuge der Gestaltsynthese eine neue Dosierpumpe entwickelt, welche hinsichtlich Hygienegesichtspunkten weniger Schwachstellen aufweist. Dies konnte einerseits durch die Kapselung der Dosiereinheit gegenüber umgebender Einheiten, andererseits durch die leckagereduzierende Struktur und Anordnung der Dosierkammern erreicht werden.

8.2 Ausblick auf weitere Forschung

Das in dieser Forschungsarbeit entwickelte Wirkraummodell bietet das Potenzial für weitere Felder, deren Erforschung lohnenswert erscheint.

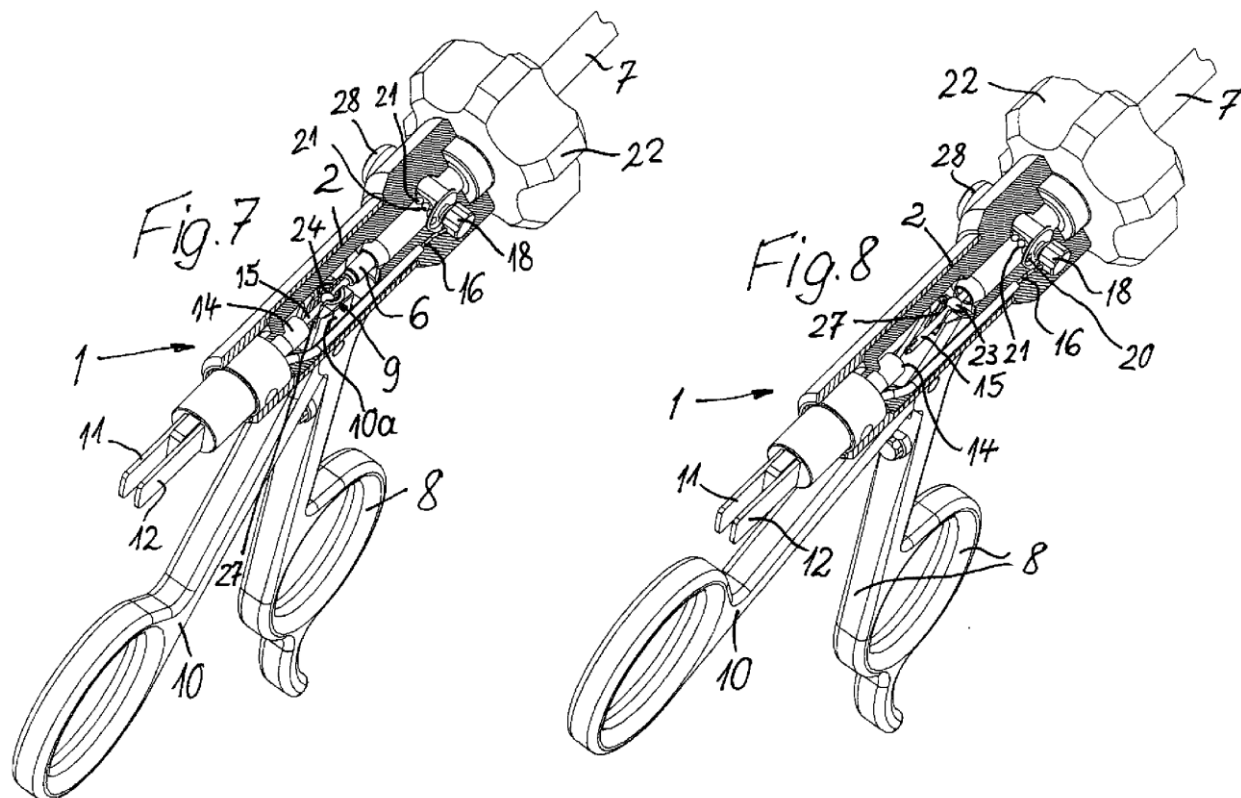
- Das Identifizieren von Nicht-Funktionen spielt neben der Entwicklung hygienege rechter Produkte auch in anderen Branchen eine fundamentale Rolle. Die in dieser Arbeit am Rande betrachteten Bereiche der Medizintechnik oder der Fertigung von sauberkeitsrelevanten Bauteilen in der Automobil- oder Elektrobranche bieten weitere Möglichkeiten zur Nutzung und Erweiterung des Wirkraummodells. Eine Erweiterung der Anwendbarkeit erscheint daher als erfolgversprechend.
- Die Arbeit fokussiert insbesondere die Grundlagen des Wirkraummodells und verdeutlicht dessen Potenzial im Bereich der Entwicklung hygienege rechter Produkte zumeist in Form von qualitativen Aussagen. Für umfangreichere und detaillierte Analysen bietet sich das Verknüpfen von Gleichungen und Wirkräumen an, die die physikalischen Zusammenhänge adressieren, wie z. B. die Kontinuitätsgleichung, mit dem Ziel qualitative Aussagen zu quantifizieren.
- Das in dieser Arbeit fokussierte Wirkraummodell ist der Theorie technischer Systeme zuzuordnen und beschreibt aus konstruktionswissenschaftlicher Sicht was festgelegt wird. Die darauf aufbauenden Methoden zur Identifizierung von Nicht-Funktionen geben erste Antworten auf die Frage, *wie* von Produktentwicklern Produkteigenschaften festgelegt werden. Zur Evaluation des Erfolgs der Handlungsanleitung erscheint eine ausführliche Beurteilung im Bereich der Lehre zur Unterstützung von Studierenden im Bereich des Konstruierens sowie weitergehende Evaluationen im Bereich der Industrie unter realen Bedingungen sinnvoll, mit dem Ziel die beschriebenen Methoden hinsichtlich der Anwendbarkeit zu verbessern.

Anhang A – Hauptteil

A1 – Auszug aus der Anforderungsliste für ein Chemieabsperrentil

Anforderungsliste für Projekt		Name: Chemieventile Typ GAMMA			
Ersteller: H.- J. Franke		Nr: 4711			
Blatt: 1		Erst-Erstellungs-Datum: 02.07.1997			
Nr.	Benennung	Wert und Dimension	Typ	Verantwortlich	Bemerkung
	Technische Anforderung				
1	Nennweitenbereich DN von	32 bis 150	F	V	
2	Nenndruck PN	100 bar	F	V	
3	Maximaler Absperrendruck	20 bar	B	K	
4	Einschweißenden	nach DIN	F	K	
5	Für toxische Medien gemäß WN U 587 321		F	K	
6	Hermetisch dicht		F	K	
7	Maximal-Temperatur	150 °C	B	K	
8	Anfahrgradient	< 25 °C/min	B	K	
9	10 Werkstoffvarianten gemäß WN WST 148	Tabelle (alle)	F	K	
10	Leckagekontrolle	anzeigend	W	V	Info zu
11	Baulänge	< 3 × DN	W	K	Medien
12	ζ-Wert	< 0,8	B	V	siehe WN
13	Handbetätigt		F	V	
14	Schließzustand erkennbar		W	V	
.	.				
.	.				
.	.				
	Wirtschaftliche Anforderungen				
30	Erwartete Stückzahl je Baugröße und Werkstoff	< 30/a	B	V	
31	Herstellkosten (für Nennweite DN 50)	< 40 EURO	B	V	
32	Verkaufsfreigabe	01.05.98	B	GL	
33	Möglichst Teile von Baureihe ALPHA verwenden		W	GL, K	
34	NC-Maschinen auslasten		W	GL	
35	Baukastenmöglichkeiten prüfen		W	K	
.	.				
.	.				
.	.				

Quelle: VDI 2223 (2004), S. 28

A2 – Weitere Abbildungen des Griffstücks

Quelle: Sutter (2000), S. 11

Anhang B – Glossar

Die Quellennachweise der mit ^(A) gekennzeichneten Begriffe finden sich in den Kapiteln 1-8 der Forschungsarbeit.

Begriff	Definition
Arbeitsmittel/Operator ^(A)	Das technische Produkt stellt als Arbeitsmittel im technischen Prozess eine geeignete Wirkgröße bereit, die auf den Operanden einwirkt und so zur Transformation seines Anfangs- in einen Endzustand in einem entsprechenden Zeitintervall genutzt wird.
Eigenschaft ^(A)	Eine Eigenschaft ist ein gedanklich abgegrenzter Teil einer Beschreibung eines Objekts bzw. eines technischen Systems und setzt sich aus einem Merkmal und einer zugewiesenen Ausprägung zusammen. Eigenschaften können quantitativer, qualitativer sowie komparativer Natur sein und weisen nicht notwendigerweise eine Einheit auf.
Einsatzprozess ^(A)	Der Einsatzprozess stellt den zentralen Prozess der Nutzungsphase des Produkts dar. Während des Einsatzprozesses fungiert das Produkt als Operator und erfüllt seinen beabsichtigten Zweck.
Fehlfunktion ^(A)	Eine Fehlfunktion differenziert sich von der Funktion durch den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen, der sich auf Grund von Beobachtungen oder Messungen am realen Produkt beschreiben lässt und unbeabsichtigt ist.
(Produkt-)Funktion ^(A)	Unter einer Funktion wird die lösungsneutrale Beschreibung des kausalen Zusammenhangs zwischen Ein- und Ausgangsgrößen des technischen Produkts verstanden. Als Ein- und Ausgangsgrößen fungieren ausschließlich Energien und Signale.
Gestalteigenschaft ^(A)	Gestalteigenschaften beinhalten die geometrischen und werkstofflichen Eigenschaften eines Produkts, wobei werkstoffliche Eigenschaften gleichermaßen mechanische Eigenschaften, Oberflächeneigenschaften sowie physikalische Eigenschaften umfassen.
Gestaltelement ^(A)	Gestaltelemente sind Elemente, mit deren Hilfe sich die Produktgestalt strukturieren lässt. Sie konkretisieren Wirkelemente und sind durch Eigenschaften der Geometrie und der Werkstoffe charakterisiert.
Methode ^(A)	Eine Methode beschreibt ein planmäßiges, regelbasiertes Vorgehen nach dessen Vorgabe bestimmter Handlungen ein zuvor definiertes Ziel zu erreicht werden soll. Eine Methode gibt dazu Empfehlungen oder Anweisungen, die bei der Durchführung der Arbeitsschritte und der Dokumentation der Ergebnisse helfen sollen.

Begriff	Definition
Methodik ^(A)	Als Methodik wird die Kombination mehrerer Methoden und Werkzeuge in ein planmäßiges Vorgehen bezeichnet.
(Produkt-)Modell ^(A)	Produktmodelle bzw. produktdarstellende Modelle sind vereinfachte, abstrahierte und zweckmäßige Repräsentationen eines Objekts bzw. eines Produkts auf einer definierten, abstrakten Ebene ohne zeitliche Dimension. In Produktmodellen werden produktrelevante Informationen und Daten abgebildet, die während des Produktentwicklungsprozesses festgelegt werden und in den jeweiligen Arbeitsschritten notwendig sind.
Nicht-Funktion	Unter einer Nicht-Funktion wird eine nicht vorhandene Funktion gesehen, d. h. die fehlende Erfüllung einer bestimmten Funktion. Hierzu zählt beispielsweise die fehlende Funktion zur Verhinderung des Anhaftens von Lebensmittel oder eine fehlende Funktion zur Verhinderung des Austretens von Lebensmittel
Objekt ^(A)	Objekte sind geometrisch, stoffliche Gebilde, welche einen Zustand besitzen, der durch die Angabe seiner Objekteigenschaften zu einem bestimmten Zeitpunkt beschrieben wird.
Operand ^(A)	Operanden sind stoffliche Gebilde, die im Zuge eines technischen Prozesses eine Zustandsänderung von einem Anfangs- in einen Endzustand innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls erfahren.
Physikalischer Effekt ^(A)	Physikalische Effekte sind physikalische Erscheinungen, die als Gesetzmäßigkeiten, beispielsweise als Keileffekt, COULOMBSches Reibungsgesetz oder Effekt der Druckfortpflanzung, formuliert werden. Entsprechendes gilt für biologische oder chemische Erscheinungen.
(Technisches) Produkt ^(A)	Ein technisches Produkt ist ein künstlich erzeugtes Gebilde in geometrischer und stofflicher Form und dient zur Erfüllung eines Nutzens, d. h. zur Erfüllung eines beabsichtigten Prozesses.
Prozess ^(A)	Ein (technischer) Prozess wird als Transformationsprozess verstanden, welcher eine definierte Zustandsänderung eines Objekts, Operand genannt, innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls von einem Anfangszustand in einen beabsichtigten Endzustand des Operanden beschreibt.
Reststruktur ^(A)	Eine Reststruktur ist ein Volumen eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines Gases oder eines felderfüllten Raums, das nie Teil einer Leitstützstruktur wird.

Begriff	Definition
Verfahren ^(A)	Als Verfahren wird die definierte Aufeinanderfolge von Operationen bezeichnet, die zur Realisierung der Transformation von stofflichen Systemen von einem Anfangs- in einen bestimmten Endzustand beitragen.
Verfahrensprinzip ^(A)	Einem Verfahrensprinzip zugehörig sind alle Wirkelemente und -größen, die für die Realisierung der Transformation notwendig sind, wozu vornehmlich verfahrensprinziprelevante Wirkgrößen (WG), Wirkflächen (WF), Wirkkörper (WK) und Wirkräume (WR) gehören
Wirkfläche ^(A)	Eine Wirkfläche ist eine Oberfläche eines festen Körpers oder eine Oberfläche bzw. Grenzfläche einer Flüssigkeit, eines Gases oder von Feldern. Jeder Energie-, Stoff oder Signalfluss eines Systems erfolgt über Wirkflächen.
Wirkflächenpaar ^(A)	Für die Realisierung einer Wirkung muss ein Kontakt zwischen zwei Wirkflächen, ein Wirkflächenpaar (WFP), gebildet werden, welches jedoch nur existiert, solange die beteiligten Wirkflächen in Kontakt stehen.
Wirkgröße ^(A)	Wirkgrößen stellen Größen dar, welche während eines Prozesses auf den Operanden wirken und zu dessen Transformation beitragen. Wirkgrößen liegen ausschließlich in Form von Energien und Signalen vor.
Wirkkörper	Der Inhalt feststoffgefüllte Wirkräume wird als Wirkkörper bezeichnet.
Wirkprinzip ^(A)	Ein Wirkprinzip konkretisiert die Produktfunktion und bringt Wirkelemente, wie Wirkflächen, Wirkkörper und Wirkbewegungen, in einen Zusammenhang, wobei erste geometrische und werkstoffliche Eigenschaften festgelegt werden.
Wirkraum	Ein Wirkraum stellt ein abgegrenztes Volumen dar, welches über seine Eigenschaften charakterisiert wird und im Gegensatz zu Wirkflächenpaaren zeitbeständig ist, d. h. nicht nur während eines Energie-, Stoff- oder Signalflusses existiert. Wirkräume können mit unterschiedlichen Inhalten gefüllt sein.
Wirkraumkontakt	Unter Wirkraumkontakt wird das Berühren der Oberflächenzweier benachbarter Wirkräume verstanden.
Zustand ^(A)	Der Zustand von Objekten wird mit Hilfe seiner Eigenschaften zu einem bestimmten Zeitpunkt charakterisiert

Literaturverzeichnis

Achereiner (2009)

Achereiner, F.: Verbesserung von Adhäsionseigenschaften verschiedener Polymerwerkstoffe durch Gasphasenfluorierung. 2009. Dissertation.

Albers et al. (2005)

Albers, A.; Burkhardt, N.; Mebold, M.; Saak, M.: SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development. In: Samuel, A.; Lewis, W. (Hrsg.): Proceedings ICED 2005. 15th international conference on engineering design. ICED 2005. Melbourne, Australia. Barton, A.C.T: 2005, S. 553-554.

Albers, Mebold (2007)

Albers, A.; Mebold, M.: SPALTEN Matrix. Product Development Process on the Basis of Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In: Krause, F.-L. (Hrsg.): The Future of Product Development. Proceedings of the 17th CIRP Design Conference. Berlin. Berlin - New York: 2007, S. 43-50.

Albers et al. (2008a)

Albers, A.; Alink, T.; Matthiesen, S.; Thau, S.: Support of system analyses and improvement in industrial design through the contact & channel model. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojetic, N. (Hrsg.): Proceedings DESIGN 2008. 10th International Design Conference. DESIGN 2008. Dubrovnik, Croatia. Zagreb: 2008, S. 245-252.

Albers et al. (2008b)

Albers, A.; Matthiesen, S.; Mebold, M.; Alink, T.; Thau, S.: Systematische Modellbildung und Raum für individuelles Vorgehen mit C&CM in einem Industrieprojekt. In: Brökel, K.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Rieg, F.; Stelzer, R. (Hrsg.): Nachhaltige und effiziente Produktentwicklung. 6. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2008. Aachen: Shaker 2008.

Albers (2010)

Albers, A.: Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In: Proceedings of the TMCE 2010, Ancona, Italien, 12-16. April 2010. 2010.

Albers et al. (2016a)

Albers, A.; Reiss, N.; Bursac, N.; Richter, T.: iPeM – integrated Product engineering Model in context of Product Generation Engineering. In: Procedia CIRP, 50. 2016, S. 100-105.

Albers et al. (2016b)

Albers, A.; Behrendt, M.; Klingler, S.; Matros, K.: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser 2016, S. 541-569.

Andreasen, Hein (1987)

Andreasen, M. M.; Hein, L.: Integrated Product Development. Berlin u. a.: Springer Verlag 1987.

Baumgarten (1996)

Baumgarten, B.: Petri-Netze. Grundlagen und Anwendungen. 2. Aufl. HochschulTaschenbuch. Heidelberg u. a.: Spektrum, Akad. Verl. 1996.

Beetz, Kloberdanz (2016)

Beetz, J.-P.; Kloberdanz, H.: Modellbasierte Anforderungsermittlung durch systematische Prozessanalyse als Basis des Hygienic Designs. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X. Beiträge zum 27. DfX-Symposium, Oktober 2016. Hamburg: TuTech Verlag 2016, S. 207-218.

Beetz (2017)

Beetz, J.-P.: Neue Dosiermaschine für die Produktion gefüllter Schokoladenprodukte. In: Ingenieur-Spiegel: Fachmagazin für Ingenieure (3). 2017, S. 6-8.

Beetz et al. (2017)

Beetz, J.-P.; Kloberdanz, H.; Kirchner, E.: New Ways of Hygienic Design. A Methodical Approach. In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Vol. 1. Vancouver, Kanada: 21.-25.08.2017. 2017, S. 81-90.

Beetz et al. (2018)

Beetz, J.-P.; Schlemmer, P. D.; Kloberdanz, H.; Kirchner, E.: Using the new Working Space Model for the development of Hygienic Products. In: Proceedings of the 15th International Design Conference. DESIGN 2018. Dubrovnik, Kroatien. 21-24. Mai 2018. 2018, S. 985-996.

Birkhofer (1980)

Birkhofer, H.: Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1, Nr. 70. Düsseldorf: VDI-Verlag 1980. Dissertation.

Birkhofer, Schott (1996)

Birkhofer, H.; Schott, H.: Die Entwicklung umweltgerechter Produkte - eine Herausforderung für die Konstruktionswissenschaft. In: Konstruktion, 48 (12). 1996, S. 386-396.

Birkhofer et al. (2007)

Birkhofer, H.; Anderl, R.; Franke, H.-J.: Life Cycle Engineering. In: Krause, F.-L.; Gausemeier, J. (Hrsg.): Innovationspotenziale in der Produktentwicklung. München - Wien: Hanser Verlag 2007, S. 205-215.

Birkhofer, Wäldele (2008)

Birkhofer, H.; Wäldele, M.: Properties and characteristics and attributes and... - an approach on structuring the description of technical systems. In: Vanek, V.; Hosnedl, S.; Bartak, J. (Hrsg.): Proceedings of the Applied Engineering Design Science Workshop. AEDS 2008. Pilsen, Tschechische Republik: 2008, S. 19-34.

Birkhofer (2011)

Birkhofer, H.: From design practice to design science: the evolution of a career in design methodology research. In: Journal of Engineering Design, 22 (5). 2011, S. 333-359.

Birkhofer et al. (2012)

Birkhofer, H.; Rath, K.; Zhao, S.: Umweltgerechtes Konstruieren. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. München - Wien: Hanser Verlag 2012, S. 563-581.

Birkhofer, Kloberdanz (2017)

Birkhofer, H.; Kloberdanz, H.: Produktinnovation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt 2017.

Birkhofer et al. (2018)

Birkhofer, H.; Schulze, K.; Zhao, S.; Sarnes, J.: Umweltgerechtes Konstruieren. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. München - Wien: Hanser Verlag 2018, S. 599-620.

Blessing, Chakrabarti (2009)

Blessing, L.; Chakrabarti, A.: DRM, a design research methodology. Dordrecht - New York: Springer 2009.

Bundesgesundheitsblatt (2012)

Bundesgesundheitsblatt: Anforderungen an die Hygiene bei der Aufbereitung von Medizinprodukten. Empfehlung der Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention (KRINKO) beim Robert Koch-Institut (RKI) und des Bundesinstitutes für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM), 55 (10). 2012, S. 1244-1310.

Bundesinstitut für Risikobewertung (2005)

Bundesinstitut für Risikobewertung: Fragen und Antworten zum Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP)-Konzept. 2005.

Czichos, Habig (2015)

Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. 4., vollst. überarb. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015.

Danzl (2013)

Danzl, W.: Weniger Fettreif auf der Schokolade. Der Einfluss des Temperiergrads auf Kristallisation und Fließverhalten. In: Lebensmitteltechnik (3). 2013, S. 50-51.

DIN EN 1672-2 (2009)

DIN EN 1672-2 Juli 2005. Deutsche Fassung EN 1672-2:2005: Nahrungsmittelmaschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Teil 2: Hygieneanforderungen. Ausg. 2009. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 2009.

DIN EN ISO 12100 (2010)

DIN EN ISO 12100: Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung. Ausg. 2010. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 2010.

DIN EN 556-1 (2002)

DIN EN 556-1: Sterilisation von Medizinprodukten. Ausg. 2002. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 2002.

DIN EN ISO 14159 (2008)

DIN EN ISO 14159: Sicherheit von Maschinen – Hygieneanforderungen an die Gestaltung von Maschinen. Ausg. 2008. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 2008.

DIN EN 1822-1 (2009)

DIN EN 1822-1: Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA) – Teil 1: Klassifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung. Ausg. 2009. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 2009.

Dudenredaktion (2018a)

Dudenredaktion: "Hygiene" auf Duden online. 2018. <https://www.duden.de/node/665181/revisions/1655494/view>, zuletzt geprüft am 02.10.2018.

Dudenredaktion (2018b)

Dudenredaktion: "Merkmal" auf Duden online. 2018. <https://www.duden.de/node/703634/revisions/1211966/view>, zuletzt geprüft am 02.10.2018.

Dutschk (2000)

Dutschk, V.: Oberflächenkräfte und ihr Beitrag zu Adhäsion und Haftung in glasfaserverstärkten Thermoplasten. 2000. Dissertation.

Ebel (2015)

Ebel, B.: Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung. Forschungsberichte, Nr. 85: Karlsruher Insitut für Technologie (KIT) 2015. Dissertation.

EHEDG (2004)

EHEDG: Gestaltungskriterien für Hygienegerechte Maschinen, Apparate und Komponenten. Frankfurt: European Hygienic Engineering and Design Group 2004.

Ehrlenspiel (2009)

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4., aktualisierte Aufl. München - Wien: Hanser Verlag 2009.

Ehrlenspiel, Meerkamm (2013)

Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5., überarbeitete und erw. Aufl. München - Wien: Hanser Verlag 2013.

Ehrlenspiel et al. (2014)

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.; Mörtl, M.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 7. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg 2014.

Engelhardt (2012)

Engelhardt, R. A.: Uncertainty Mode and Effects Analysis – heuristische Methodik zur Analyse und Beurteilung von Unsicherheiten in technischen Systemen des Maschinenbaus. 2012. Dissertation.

Ersoy (1975)

Ersoy, M.: Wirkfläche und Wirkraum: Ausgangselemente zum Ermitteln der Gestalt beim rechnergestützten Konstruieren. Braunschweig: 1975. Dissertation.

Europäisches Parlament (2002)

Europäisches Parlament: Verordnung (EG) Nr. 178/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Januar 2002 zur Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts, zur Errichtung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit und zur Festlegung von Verfahren zur Lebensmittelsicherheit. L 31/1. 2002.

https://www.bfr.bund.de/cm/343/2002_178_de_efsa.pdf, zuletzt geprüft am 02.10.2018.

Europäisches Parlament (2006)

Europäisches Parlament: Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung).

2006. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2006/42/oj>, zuletzt geprüft am 02.10.2018.

FAO/WHO (2009)

FAO/WHO: Food hygiene. Basic texts. Codex Alimentarius. 4. Auflage. Codex Alimentarius Commission. Rom: FAO/WHO 2009.

Feldhusen, Grote (2013)

Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. überarbeitete Aufl. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 2013.

Feldhusen (2016)

Feldhusen, J.: Gestaltung von Elementen und Systemen. In: Sauer, B. (Hrsg.): Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1. Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen. 9. Auflage. Berlin - Heidelberg: Springer Vieweg 2016, S. 151-187.

Findeisen, Helduser (2015)

Findeisen, D.; Helduser, S.: Ölhydraulik. Handbuch der hydraulischen Antriebe und Steuerungen. 6., neu bearb. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg 2015.

Franke (1976)

Franke, H.-J.: Untersuchungen zur Algorithmisierbarkeit des Konstruktionsprozesses. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1, Nr. 47. Düsseldorf: VDI-Verlag 1976. Dissertation.

Frede (2010)

Frede, W.: Handbuch für Lebensmittelchemiker. Lebensmittel, Bedarfsgegenstände, Kosmetika, Futtermittel. 3. Aufl. Dordrecht: Springer 2010.

Frei (2002)

Frei, N.: Der Konstruktionsprozess: Wirkmodelle basierend auf Constraints. Diss. ETH, Nr. 14533. 2002. Dissertation.

Freund (2018)

Freund, T.: Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in technischen Systemen. 2018. Dissertation.

Fritsche (2016)

Fritsche, O.: Mikrobiologie. Berlin - Heidelberg: Springer Spektrum 2016.

Giapoulis (1996)

Giapoulis, A.: Modelle für effektive Konstruktionsprozesse. Konstruktionstechnik München, Nr. 27: Shaker Verlag 1996. Dissertation.

Gramlich (2013)

Gramlich, S.: Vom fertigungsgerechten Konstruieren zum produktionsintegrierenden Entwickeln. Durchgängige Modelle und Methoden im Produktlebenszyklus. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1, Nr. 423. Düsseldorf: VDI-Verlag 2013. Dissertation.

Graßhoff (1996)

Graßhoff, A.: CIP-Anlagen in der Lebensmitteltechnik. In: VDI-Berichte Nr. 1238. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996, S. 105-114.

Groß et al. (2017)

Groß, A.; Stretz, A.; Ersoy, M.; Eulenbach, H.-D.: Bestandteile der Dämpfung. In: Ersoy, M.; Gies, S. (Hrsg.): Fahrwerkhandbuch. Grundlagen - Fahrdynamik - Fahrverhalten- Komponenten - Elektronische Systeme - Fahrerassistenz - Autonomes Fahren- Perspektiven. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2017, S. 487-540.

Grüner (2001)

Grüner, C.: Die strategiebasierte Entwicklung umweltgerechter Produkte. Konstruktionstechnik / Maschinenelemente, Nr. 349. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001. Dissertation.

Habig, Woydt (2014)

Habig, K.-H.; Woydt, M.: Tribologie. In: Dubbel, H.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 24., aktualisierte und erweiterte. Auflage. Berlin: Springer 2014, S. E89-E97.

Hauser (2008a)

Hauser, G.: Hygienegerechte Apparate und Anlagen für die Lebensmittel- Pharma- und Kosmetikindustrie. Weinheim: Wiley-VCH-Verlag 2008.

Hauser (2008b)

Hauser, G.: Hygienische Produktionstechnologie. Weinheim: Wiley-VCH-Verlag 2008.

Heidemann (2001)

Heidemann, B.: Trennende Verknüpfung - Ein Prozessmodell als Quelle für Produktideen. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1, Nr. 351. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001. Dissertation.

Hofmann (2007)

Hofmann, J.: Stoffübergang bei der Reinigung als Qualifizierungsmethode der Reinigbarkeit. 2007. Dissertation.

Hubka (1984)

Hubka, V.: Theorie technischer Systeme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. 2., völlig Neubearb. und erw. Aufl. Berlin u. a.: Springer Verlag 1984.

Hubka, Schregenberger (1989)

Hubka, V.; Schregenberger, J. W.: Eine Ordnung konstruktionswissenschaftlicher Aussagen. In: VDI-Z 131. 1989, S. 33-36.

Hubka, Eder (1992)

Hubka, V.; Eder, W. E.: Einführung in die Konstruktionswissenschaft. Übersicht, Modell, Ableitungen. Berlin: Springer-Verlag 1992.

Jatzwauk (2012)

Jatzwauk, L.: Validierung von Reinigungs-, Desinfektions- und Sterilisationsverfahren. In: Der MKG-Chirurg, 5 (3). 2012, S. 185-192.

Kattenberg (2001)

Kattenberg, H.: Kakaobutter und ihre Funktionen. Qualität der Schokolade hängt von der Kakaobutter ab. In: Zucker- und Süßwaren Wirtschaft. 3. 2001, S. 1-3.

Kirchner, Birkhofer (2017)

Kirchner, E.; Birkhofer, H.: Maschinenelemente und Mechatronik. 4. überarbeitete Auflage. Aachen: Shaker Verlag 2017.

Kloberdanz et al. (2009)

Kloberdanz, H.; Engelhardt, R.; Mathias, J.; Birkhofer, H.: Process Based Uncertainty Analysis - An Approach to Analyse Uncertainties Using a Process Model. In: Norell Bergendahl, M.; Grimheden, M.; Leifer, L.; Skogstad, P.; Lindemann, U. (Hrsg.): Proceedings ICED 2009. 17th International Conference on Engineering Design. Vol. 2. Palo Alto, CA, USA. Glasgow: 2009, S. 465-474.

Klocke, König (2008)

Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 1. Drehen, Fräsen, Bohren. 8 Aufl. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008.

Kniel (2001)

Kniel, K.: Produzieren mit One-Shot. Viel Licht, aber auch Schatten. In: Zucker- und Süßwaren Wirtschaft (07-08). 2001, S. 1-3.

Kolaric (2015)

Kolaric, I.: Einführung in das Geschäftsfeld Automotive am Fraunhofer IPA. In: Bargende, M.; Reuss, H.-C.; Wiedemann, J. (Hrsg.): 15. Internationales Stuttgarter Symposium. Automobil- und Motorentechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015.

Koller (1994)

Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte. 3., völlig Neubearb. und erw. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 1994.

Koller (1998)

Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 1998.

Leinemann (1974)

Leinemann, K.: Beschreibung von Konstruktionsobjekten für den Rechnereinsatz. In: Chemie Ingenieur Technik, 46 (10). 1974, S. 439.

Lemburg (2009)

Lemburg, J. P.: Methodik der schrittweisen Gestaltsynthese. 2009. Dissertation.

Lindemann (2007)

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationgerecht anwenden. 2., bearb. Aufl. VDI. Berlin: Springer 2007.

Lindemann (2009)

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationgerecht anwenden. 3., korr. Aufl. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 2009.

Lossack (2006)

Lossack, R.-S.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen für die rechnerunterstützte Konstruktion. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.

Mathias (2016)

Mathias, J.: Auf dem Weg zu robusten Lösungen. Modelle und Methoden zur Beherrschung von Unsicherheit in den Frühen Phasen der Produktentwicklung. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1, Nr. 435. Düsseldorf: VDI-Verlag 2016. Dissertation.

Matthiassen (1997)

Matthiassen, B.: Design for robustness and reliability. Improving the quality consciousness in engineering design. Lyngby: Department of Control and Engineering Design, DTU 1997.

Matthiesen (2002)

Matthiesen, S.: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Forschungsberichte Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH), Nr. 6. Karlsruhe: 2002. Dissertation.

Matthiesen, Ruckpaul (2012)

Matthiesen, S.; Ruckpaul, A.: New Insights on the Contact&Channel-Approach - Modelling of Systems with Several Logical States. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojetic, N. (Hrsg.): Proceedings DESIGN 2012. 12th International Design Conference. DESIGN 2012. Dubrovnik, Croatia: 2012, S. 1019-1028.

Matthiesen (2017)

Matthiesen, S.: Gut konstruieren kann nur, wer die Details versteht! In: Konstruktion, vol. 69 (7-8). 2017, S. 3.

Matthiesen et al. (2018)

Matthiesen, S.; Grauberger, P.; Hölz, K.; Nelius, T.; Bremer, F.; Wettstein, A.; Gessinger, A.; Pflegler, B.; Nowoseltschenko, K.; Voß, K.: Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung - Techniken zur Analyse und Synthese. Karlsruhe 2018.

Matthiesen (2019)

Matthiesen, S.: Prozesse und Methoden der Gestaltung. In: Bender, B.; Gericke, K. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden erfolgreicher Produktentwicklung. Berlin: Springer-Verlag 2019.

Meboldt (2008)

Meboldt, M.: Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung - als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM). 2008. Dissertation.

Meyer (2009)

Meyer, J.: Manufacturing processes: depositing of fillings. In: Talbot, G. (Hrsg.): Science and Technology of Enrobed and Filled Chocolate, Confectionery and Bakery Products. Boca Raton: CRC Press 2009, S. 427-439.

Müller et al. (2010)

Müller, B.; Kneissler, M.; Gramann, M.; Esly, N.; Daikeler, R.; Agner, I.: Kleiner, Flexibler, Intelligenter – Weiterentwickelte Komponenten für Doppelkupplungsgetriebe. 9. Schaeffler Kolloquium. Baden-Baden: 2010.

Oberender (2006)

Oberender, C.: Die Nutzungsphase und ihre Bedeutung für die Entwicklung umweltgerechter Produkte. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1, Nr. 385. Düsseldorf: VDI-Verlag 2006. Dissertation.

Pahl et al. (2007a)

Pahl, G.; Beitz, W.; Blessing, L.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Wallace, K.: Engineering Design. A Systematic Approach. London: Imprint: Springer 2007.

Pahl et al. (2007b)

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 2007.

Petek et al. (2009)

Petek, M.; Jungbluth, M.; Krampe, E.: Reinraumtechnik für die Medizintechnik. In: Wintermantel, E.; Ha, S.-W. (Hrsg.): Medizintechnik. Life Science Engineering ; Interdisziplinarität, Biokompatibilität, Technologien, Implantate, Diagnostik, Werkstoffe, Zertifizierung, Business. 5., überarb. und erw. Aufl. 2009, S. 725-763.

Petri (1961)

Petri, C. A.: Kommunikation mit Automaten. 1961. Dissertation.

Phadke (1986)

Phadke, M. S.: Design Optimization Case Studies. In: AT&T Technical Journal, 65 (2). 1986, S. 51-68.

Pichhardt (1998)

Pichhardt, K.: Lebensmittelmikrobiologie. Berlin, Heidelberg: Springer 1998.

Ponn, Lindemann (2008)

Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Optimierte Produkte - systematisch von Anforderungen zu Konzepten. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 2008.

Rath (2015)

Rath, K.: Energieeffizienz ganzheitlich betrachtet. Eine modellbasierte Entwicklungsmethodik zur gezielten Optimierung des Energieinputs von technischen Systemen. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1, Nr. 431. Düsseldorf: VDI-Verlag 2015.

Rochowicz, Ernst (2006)

Rochowicz, M.; Ernst, C.: Technische Sauberkeit als messbares Qualitätsmerkmal. In: JOT Journal für Oberflächentechnik, 46 (9). 2006, S. 60-63.

Rodenacker, Claussen (1973)

Rodenacker, W. G.; Claussen, U.: Regeln des methodischen Konstruierens I. Regeln 1-4. Mainz: Krausskopf 1973.

Roos (2018)

Roos, M.: Ein Beitrag zur einheitlichen Modellierung und durchgängigen Nutzung fertigungstechnologischen Wissens im Produktentwicklungsprozess. 2018. Dissertation.

Ropohl (2009)

Ropohl, G.: Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik. 3., überarb. Aufl. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe 2009.

Röse (2011)

Röse, A.: Parallelkinematische Mechanismen zum intrakorporalen Einsatz in der laparoskopischen Chirurgie. 2011. Dissertation.

Roth (2000)

Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Konstruktionslehre. 3. Aufl., erw. und neu gestaltet. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Nr. 1. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 2000.

Roth (2001)

Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Kataloge. 3. Aufl., mit wesentl. Erg. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Nr. 2. Berlin u. a.: Springer Verlag 2001.

Rude (1998)

Rude, S.: Wissensbasiertes Konstruieren. 1998. Habilitationsschrift.

Sauer (2006)

Sauer, T.: Ein Konzept zur Nutzung von Lösungsobjekten für die Produktentwicklung in Lern- und Anwendungssystemen. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1, Nr. 390. Düsseldorf: VDI-Verlag 2006. Dissertation.

Schmauz, Ernst (2012)

Schmauz, G.; Ernst, C.: Sauberraumsysteme. In: Gail, L.; Gommel, U.; Hortig, H.-P. (Hrsg.): Reinraumtechnik. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Heidelberg: Springer-Verlag 2012, S. 623-646.

Schott (1998)

Schott, H.: Informationsressourcen und Informationsmanagement für die Entwicklung umweltgerechter Produkte. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1, Nr. 297. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998. Dissertation.

Spurk, Aksel (2010)

Spurk, J. H.; Aksel, N.: Strömungslehre. Einführung in die Theorie der Strömungen. 8. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2010.

Stachowiak (1973)

Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Wien - New York: Springer Verlag 1973.

Stephan et al. (2013)

Stephan, P.; Schaber, K.; Stephan, K.; Mayinger, F.: Thermodynamik. Grundlagen und technische Anwendungen Band 1: Einstoffsysteme. 19., ergänzte Aufl. 2013. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg - s.l.: Springer Berlin Heidelberg 2013.

Suh (1998)

Suh, N. P.: Axiomatic Design Theory for Systems. In: Research in Engineering Design, 10 (4). 1998, S. 189-209.

Sutter (2000)

Sutter, H.: Bipolares Rohrschaft-Instrument. Patent-Nummer: DE 103 30 030 B4. 2000.

Thau (2013)

Thau, S. L.: Heuristiken zur Analyse und Synthese technischer Systeme mit dem C&C2-Ansatz auf Basis von Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld. Forschungsberichte IPEK, Nr. 66. 2013. Dissertation.

VDA (2010)

VDA: Technische Sauberkeit in der Montage Band 19 Teil 2. Umgebung, Logistik, Personal und Montageeinrichtungen. VDA-Verlag 2010.

VDI 2221 (1993)

VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Ausg. 1993-05. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 1993.

VDI 2222-1 (1997)

VDI 2222-1: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Ausg. 1997-06. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 1997.

VDI 2223 (2004)

VDI 2223: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Ausg. 2004-01. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 2004.

VDI 2083 (2013)

VDI 2083: Reinraumtechnik. Ausg. 2013. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). Beuth Verlag: Beuth Verlag 2013.

VDI 2221-2 (2018)

VDI 2221-2: Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse. Ausg. 2018. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). Berlin: Beuth 2018.

VDI 2221-1 (2018)

VDI 2221-1 Entwurf: Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung. Ausg. 2018. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). Berlin: Beuth 2018.

Wäldele (2012)

Wäldele, M.: Erarbeitung einer Theorie der Eigenschaften technischer Produkte. Ein Beitrag für die konventionelle und algorithmenbasierte Produktentwicklung. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1, Nr. 414. Düsseldorf: VDI-Verlag 2012. Dissertation.

Wallhäußer (1990)

Wallhäußer, K.-H.: Lebensmittel und Mikroorganismen. Frischware - Konservierungsmethoden - Verderb. Darmstadt: Steinkopff Verlag 1990.

Weber (2012)

Weber, C.: Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften - eine kritische Zwischenbilanz. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Proceedings of the 23rd Symposium on Design for X. DfX 2012. Bamberg/Erlangen, Deutschland: 2012, S. 25-62.

Weissmantel (1982)

Weissmantel, C.: Kleine Enzyklopädie. Struktur der Materie. 1. Auflage. Leipzig: Bibliographisches Institut 1982.

Wellmann (2017)

Wellmann, P.: Materialien der Elektronik und Energietechnik. Halbleiter, Graphen, funktionale Materialien. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg 2017.

WHO (2000)

WHO: The World Health Report 2000. Health Systems: Improving Performance. Geneva: WHO 2000.

Wickert, Defren (1999)

Wickert, K.; Defren, W.: Handbuch Maschinensicherheit. 2. Aufl. Jedermann-Verlag 1999.

Wildbrett (2006)

Wildbrett, G.: Reinigung und Desinfektion in der Lebensmittelindustrie. 2., überarb. u. aktual. Aufl. Hamburg: Behr 2006.

Will, Gebhardt (2011)

Will, D.; Gebhardt, N.: Hydraulik. Grundlagen, Komponenten, Schaltungen. 5., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2011.

Wintergerst (2015)

Wintergerst, E.: Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation durch Ermittlung der funktionsbestimmenden Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung. IPEK Forschungsberichte, Nr. 86. 2015. Dissertation.

Würtenberger (2018)

Würtenberger, J.: Ein Beitrag zur Identifikation und Beherrschung von Unsicherheit bei der Modellierung technischer Systeme. 2018. Dissertation.

ZVEI (2013)

ZVEI: Leitfaden: Technische Sauberkeit in der Elektrotechnik. Schmutz ist Materie am falschen Ort. Frankfurt am Main: ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V 2013.

Eigene Veröffentlichungen

2016

Beetz, J.-P.; Kloberdanz, H.: Modellbasierte Anforderungsermittlung durch systematische Prozessanalyse als Basis des Hygienic Designs. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Proceedings of the 27th Symposium Design for X. DfX 2016. Jesteburg, Deutschland: 2016, S. 207-218.

2017

Beetz, J.-P.; Kloberdanz, H.; Kirchner, E.: New Ways of Hygienic Design – A Methodical Approach. In: Maier, A.; Škec, S.; Kim, H.; Kokkolaras, M.; Oehmen, J.; Fadel, G.; Salustri, F.; Van der Loos, M. (Hrsg.): Proceedings of the 21th International Conference on Engineering Design. ICED17. Vancouver, Kanada: 2017, S. 81-90.

Beetz, J.-P.: Neue Dosiermaschine für die Produktion gefüllter Schokoladenprodukte. In: Ingenieur-Spiegel: Fachmagazin für Ingenieure (3). 2017, S. 6-8.

2018

Beetz, J.-P.; Schlemmer, P.; Kloberdanz, H.; Kirchner, E.: Using the New Working Space Model for the Development of Hygienic Products. In: Marjanović, D.; Štorga, M.; Škec, S.; Bojčetić, N.; Pavković, N. (Hrsg.): Proceedings of the 15th International Design Conference. DESIGN 2018. Dubrovnik, Kroatien. Zagreb: 2018, S. 985-996.

Betreute studentische Arbeiten

2015

Schmidt, P.: Konkretisierung eines innovativen Pumpenkonzepts im Bereich der Lebensmittelverarbeitung, Bachelor-Thesis, 2015.

Weihrauch, C.: Ermittlung von Stellhebeln zur ökologischen Verbesserung eines Waschtrockners, Studienarbeit, 2015.

Bücker, M.; Dietrich, I.; Krebs, F.; Schäfer, J.: Kategorisierung von Süßwaren-Gießmassen zur Entwicklung eines modularen Gießmaschinenkonzepts, Advanced Design Project, 2015.

Dao, D. D.; Friedrich, M.; Gohout, C.; Vorwerk-Handing, G.: Analyse und Verbesserung technischer Schwachstellen einer Lebensmittelpumpe mittels FMEA-Methode, Advanced Design Project, 2015.

Beyer, D.; Reichel, M.; Schirra, T.; Trarbach, L.: Optimierung und Ausarbeitung eines Pumpenentwurfs im Bereich der Lebensmittelverarbeitung, Advanced Design Project, 2015.

2016

Gohout, C.: Entwicklung einer Methode zur Ermittlung Hygiene betreffender Anforderungen, Master-Thesis, 2016.

Schleyer, M.: Integration von Ergonomie- und Hygieneanforderungen in die Konzeptentwicklung am Beispiel des Maschinenlayouts einer Lebensmittelgießmaschine, Master-Thesis, 2016.

Knolymayer, V.: Analyse und Einordnung bestehender Hilfsmittel zur Entwicklung hygienege-rechter Maschinen, Studienarbeit, 2016.

Bachmann, N.; Buhl, M.; Scheuermann, J. E.; Schüßler, B.: Konzeptentwicklung einer hygiene-gerechten Produktionsmaschine, Advanced Design Project, 2016.

2017

Schabedoth, P.: Systematische Umsetzung von Hygieneanforderungen in Gestalteigenschaften, Bachelor-Thesis, 2017.

Schlemmer, P.: Analyse von Konflikten und Potenzialen in der Produktentwicklung durch Ressourceneffizienz und Hygienic Design, Master-Thesis, 2017.

2018

Haaf, J.: Methodische Entwicklung einer Dosierpumpe unter Berücksichtigung von Hygienic Design, Bachelor-Thesis, 2018.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Jean-Paul Beetz
Geburtsdatum: 24.08.1989
Geburtsort: Schotten
Nationalität: Deutsch

Ausbildung und beruflicher Werdegang

06/2008 Abitur, Albert-Einstein-Schule, Schwalbach am Taunus
11/2008 – 12/2014 Studium an der Technischen Universität Darmstadt, Studiengang Mechanical and Process Engineering, Abschluss M.Sc.
01/2015 – 12/2018 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Darmstadt am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente pmd
12/2018 Promotionsprüfung zum Doktoringenieur an der Technischen Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau