

# **Entwicklung und Konstruktion einer mobilen Austrageinheit zum Pellettransport**

Diplomarbeit

von

Raphael Pock

**Technische Universität Graz**

Fakultät für Maschinenbau

Institut für Mechanik

Dipl. Ing. Mathias Mair

Graz, im Februar 2014

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz.....  
(date)

.....  
(signature)

## **Danksagung**

An dieser Stelle sei all jenen Personen gedankt, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung die Durchführung meiner Diplomarbeit ermöglicht haben.

Als Stellvertreter der TUGraz wurde meine Arbeit von Herrn DI Mair begleitet, welcher am Institut für Mechanik tätig ist und mir stets mit wertvollen Ratschlägen hinsichtlich technischer Belange, als auch in Verfahrensfragen zum gesamtheitlichen Thema einer Diplomarbeit beiseite stand. Mein Dank gilt Herrn Dr. Tuppinger, der als Betreuer seitens der Fa. KWB das Thema bereitgestellt hat und mich in die Unternehmensabläufe und -zuständigkeiten einführte. In diesem Zuge möchte ich auch den beteiligten Mitarbeitern der Fa. KWB danken, allen voran Herrn Voit und Herrn Knittelfelder.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie sowie Freunden, die mich durch die Studienzeit und darüber hinaus begleiten. An dieser Stelle sei Herr Wkm Panzi erwähnt, der mir speziell in der Ausarbeitungsphase mit Rat und Tat in praktischen Belangen Unterstützung leistete.

Ich gedenke in Stille meines Großvaters, welcher die Fertigstellung dieser Arbeit leider nicht mehr erleben durfte.

***Gebt mir einen Hebel, der lang genug und einen Angelpunkt,  
der stark genug ist, dann kann ich die Welt mit einer Hand bewegen.***

Archimedes

## **Kurzfassung**

Die vorliegende Arbeit thematisiert die Entwicklung und Konstruktion einer mobilen Austrageinheit für den Transport von Holzpellets vom Brennstofflagerraum zum Heizkessel, welche pneumatisch angetrieben ist. Die Entwicklung des technischen Gebildes geschieht auf Basis der VDI-Richtlinie 2222, die ein überschaubares Lösungsfeld und schließlich die optimale Lösung hervorbringt. Nach abgrenzen der Wirk- und Funktionsprinzipien wird ein erster Prototyp konstruiert und gebaut, der nach zahlreichen Tests den erforderlichen Verbesserungsbedarf aufzeigt. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wird ein zweiter Prototyp entwickelt, welcher in den verschiedenen Versuchen zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Den Abschluss der Arbeit bildet eine detaillierte Erläuterung sämtlicher Bauteile sowie Schlussfolgerungen zum objektiven Wert der gefundenen Lösung.

## **Abstract**

This work analyzes the development and design of a mobile discharge unit for the transportation of wooden pellets from the fuel storage room to the heating unit, which is pneumatically driven. The development of the technical structure is done on the basis of VDI guideline 2222, which produces a manageable solution field and finally the optimal solution. After delimiting the active and functional principles a first prototype is designed and constructed that shows the required improvement after numerous tests. Based on the findings, a second prototype is developed, which provides satisfactory results in the various tests. The completion of this work is a detailed description of all components and conclusions to the objective value of the solution found.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation .....	1
1.2	Ziele und Aufgabenstellung .....	1
1.3	Vorgehensweise .....	2
1.4	Aufbau der Arbeit.....	2
<b>2</b>	<b>DIE METHODISCHE KONSTRUKTIONSLEHRE .....</b>	<b>4</b>
2.1	Allgemeine Grundlagen .....	4
2.1.1	Planung der Produktaspekte.....	4
2.1.2	Konstruktionsmethodik.....	5
2.1.3	Informationsumsatz .....	7
2.2	Einführung.....	8
2.2.1	Technische Systeme .....	8
2.2.2	Funktionszusammenhang.....	9
2.2.3	Zusammenhang der Lösungs- bzw. Wirkprinzipien.....	10
2.2.4	Bauzusammenhang.....	10
2.2.5	Systemzusammenhang.....	11
2.3	Konstruktionsmethodik nach VDI 2222.....	12
2.3.1	Planen.....	13
2.3.2	Konzipieren.....	15
2.3.3	Entwerfen .....	16
2.3.4	Ausarbeiten .....	17
2.3.5	Exkurs Konstruktionsarten.....	18
2.4	Methoden der Lösungssuche und Lösungskombination.....	19
2.4.1	Allgemeine Methoden.....	19
2.4.2	Konventionelle Methoden.....	21
2.4.3	Intuitiv betonte Methoden.....	22
2.4.4	Diskursiv betonte Methoden .....	23
2.4.5	Methoden zur Lösungskombination .....	24
2.5	Methoden der Auswahl und Bewertung.....	25
2.5.1	Auswahlverfahren .....	26
2.5.2	Bewertungsverfahren.....	27

<b>3</b>	<b>UMFELD UND RAHMENBEREICH .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Allgemeines zum Schüttgut .....</b>	<b>31</b>
3.1.1	Biogene Brennstoffe.....	31
3.1.2	Eigenschaften von Holzpellets .....	33
3.1.3	Anwendung von Holzpellets .....	34
<b>3.2</b>	<b>Bekannte Systeme zum Austrag von Schüttgut.....</b>	<b>35</b>
3.2.1	Austraghilfen .....	35
3.2.2	Austraggeräte .....	36
3.2.3	Lagerung und Austrag von Holzpellets .....	42
<b>4</b>	<b>KONZEPTIONIERUNG DER AUSTRAGEINHEIT FÜR SCHÜTTGUT .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Planung und Anforderungsliste.....</b>	<b>45</b>
4.1.1	Randbedingungen zur Konzeptionierung .....	45
4.1.2	Vorgaben laut Produktplanung.....	46
4.1.3	Anforderungsliste.....	47
<b>4.2</b>	<b>Konzeption und Bewertung .....</b>	<b>50</b>
4.2.1	Auswahlverfahren.....	50
4.2.2	Lösungssuche für Teilfunktionen .....	52
4.2.3	Erarbeiten der Konzeptvarianten.....	56
4.2.4	Bewertung der Konzeptvarianten.....	58
<b>5</b>	<b>AUSARBEITUNG DER AUSTRAGEINHEIT FÜR SCHÜTTGUT .....</b>	<b>60</b>
<b>5.1</b>	<b>Grundlagen.....</b>	<b>60</b>
5.1.1	Pneumatische Förderanlagen im Heizungsschema.....	60
5.1.2	Vorversuche.....	62
5.1.3	Versuchsaufbau .....	64
5.1.4	Versuchsablauf.....	65
5.1.5	Funktionsweise und Voraussetzungen .....	67
<b>5.2</b>	<b>Prototyp I .....</b>	<b>70</b>
5.2.1	Überblick .....	70
5.2.2	Mehrwegdrehdurchführung.....	71
5.2.3	Antriebseinheit .....	75
5.2.4	Ausräumeinheit.....	77
5.2.5	Weitere Bauteile .....	79
5.2.6	Versuchsergebnisse.....	81
<b>5.3</b>	<b>Prototyp II .....</b>	<b>84</b>
5.3.1	Überblick und Bauteile .....	84
5.3.2	Versuchsergebnisse.....	85

<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>87</b>
<b>7</b>	<b>VERZEICHNIS .....</b>	<b>88</b>
7.1	Quellenverzeichnis .....	88
7.2	Abbildungsverzeichnis .....	89
7.3	Formelverzeichnis.....	91

# 1 Einleitung

Im Folgenden soll ausgeführt werden, welchen Rahmenbereich diese Diplomarbeit umfasst und von welcher Ausgangssituation gestartet wurde. Des Weiteren werden gewählte Vorgehensweisen zum Erreichen der definierten Ziele aufgezeigt.

## 1.1 Ausgangssituation

Grundlage der hier vorliegenden Diplomarbeit bildet eine zugehörige Ausschreibung des Institutes für Mechanik der TUGraz in Partnerschaft mit der Fa. KWB in St. Margarethen a. d. Raab.

Die Firma KWB - Kraft und Wärme aus Biomasse - ist ein führender Anbieter im Bereich der erneuerbaren Energien. Die Produktpalette umfasst Biomasseheizungen für Pellets, Hack- und Schüttgut inklusive Zubehör. Hierzu zählen beispielsweise diverse Bauarten von Brennstofffördersystemen, sowie Speicherlösungen. Seitens der Fa. KWB besteht der Wunsch nach einem flexiblen Fördersystem zur Entleerung von Brennstofflagerräumen. Besonders im wichtigen Marktsegment des Sanierungsbereichs lässt sich mit leicht adaptierbaren Systemen punkten, da diese an die schwer veränderbaren Rahmenbedingungen (Mauern, Kamine...) individuell, aber ohne viel Aufwand, angepasst werden können. Ein weiterer Grund für die Forderung nach flexiblen Entleerungssystemen ist der reduzierte Planungs- und Installationsaufwand. Je einfacher und flexibler ein System ist, desto weniger muss man planen und desto weniger aufwendig ist die Installation, was sich in geringeren Kosten für den Endkunden niederschlägt und ein wichtiges Verkaufsargument ist.

## 1.2 Ziele und Aufgabenstellung

Die Ausschreibung durch die Fa. KWB war vorerst sehr allgemein formuliert, sodass sich erst nach Erstellung eines Entwicklungsauftrages konkrete Grundzüge der Aufgabenstellung ergaben. Im Zuge der Arbeit gilt es ein flexibles System zu entwickeln, das die restlose Entleerung eines Brennstofflagerraumes gewährleistet. Dieser Ansatz ist in Form eines konkreten Produkts zu entwickeln und als Prototyp zu erproben. Die Arbeit kann auf zwei Kernbereiche heruntergebrochen werden: Einerseits einen theoretischen Teil, der sich durch das konsequente Einhalten eines entwicklungsmethodischen Ablaufs auszeichnet, sowie der praktischen Anfertigung und Erprobung von Bauteilen bzw. dem Gesamtsystem in der haus-eigenen Werkstatt.

Am Ende soll ein Entleerungssystem stehen, welches folgenden Kriterien genügt:

- Wartungs- und betreuungsarm
- Stromsparende, zuverlässige, sowie lärmarme Fördertechnik
- Bestmögliche Ausnutzung des Lagerraumvolumens
- Möglichst individuelle Anpassung an örtliche Gegebenheiten bei minimalem Aufwand für Planung und Installation
- Einfacher, kompakter und robuster Aufbau
- Wirtschaftlichkeit (Kostenvergleich mit ähnlichen Produkten von KWB)
- Kombination mit Saugförderung bzw. Schnecke (Übergabe) möglich

### **1.3 Vorgehensweise**

Um der Problemstellung habhaft zu werden ist es vorerst notwendig, sich Wissen rund um den Brennstoff an sich, sowie zugehörigen Anlagen und Systemen anzueignen. Hierbei wird der Rahmenbereich klar definiert, was eine effiziente Durchführung nachfolgender Schritte gewährleistet und eine solide Basis zur Bearbeitung darstellt. Zur Ausführung des theoretischen Teils (vgl. Abschnitt 2) wird aktuelle Fachliteratur herangezogen. Nachdem eine adäquate Anforderungsliste bzw. Pflichtenheft erstellt ist, werden Bewertungskriterien für eine Nutzwertanalyse erarbeitet, mit deren Hilfe der vielversprechendste Ansatz ausgewählt werden kann. Erst die Durchführung und Evaluierung verschiedener Versuche mit einzelnen Bauteilen, als auch der Gesamteinheit lässt Schlüsse zu und weist den weiteren Weg bezüglich Optimierung und Adaptierungen. Auf diesem Wege entsteht ein Prototyp, welcher den Anforderungen genügt und erkennbares Potential für Weiterentwicklung bietet. Aufgrund des Entwicklungsstandes sind Aussagen über die allgemeine Relevanz dieser Lösungsvariante möglich, hierauf lassen sich fundierte Entscheidungen bezüglich Weiterverfolgung auf Basis einer Kosten-Nutzen-Rechnung treffen.

### **1.4 Aufbau der Arbeit**

Um Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten, gliedert sich die vorliegende Ausarbeitung in sechs, aufeinander aufbauende Kapitel. Die Einleitung soll in kurzen Worten einen Überblick zu den Inhalten meiner Arbeit darstellen und eine Strukturierung erkennbar machen.

Im Kapitel Zwei wird auf die Grundlagen einer methodischen Konzeption eingegangen und die lehrbuchmäßige Herangehensweise zur Bewältigung einer technischen Problemstellung

erläutert. Die darin enthaltenen Vorgehensweisen und Denkansätze sollen, unter Berücksichtigung eines maximierten Lösungsfeldes ohne Einschränkungen durch kreativitätsbehindernde Barrieren, ein akkurates Voranschreiten im Konstruktionsprozess ermöglichen. Die Rechtfertigung für die Verfolgung eines methodischen Leitfadens ist durch den so entstehenden flexiblen und dokumentierbaren Arbeitsablauf gegeben.

Das dritte Kapitel stellt eine Einleitung zu biogenen Brennstoffen sowie zugehörigen Transport- und Umschlagverfahren dar.

Anwendungsergebnisse von Methoden aus Kapitel Zwei auf das vorgegebene Aufgabenfeld werden in Kapitel Vier thematisiert. Auf die verschiedenen Konzepte wird eingegangen, Vor- und Nachteile sollen verdeutlicht werden.

Kapitel Fünf beinhaltet die tatsächliche Umsetzung und gibt Aufschluss über die einzelnen Schritte der Weiterentwicklung des gewählten Konzeptes. Auf Grund fehlender Unterlagen und Erfahrungen zu dem Thema, war das ständige Durchlaufen eines Schleifenprozesses, zur Realisierung der Funktionalität gemäß den Erfordernissen, auch während der Fertigungsphasen, unabdingbar.

Das Sechste und letzte Kapitel stellt ein Resümee dar und bietet eine Agenda für Weiterentwicklungen die möglicherweise auf Basis dieser Arbeit geleistet werden.

## 2 Die methodische Konstruktionslehre

Dieser Abschnitt bietet einen Überblick zum theoretischen Hintergrund einer Produktentwicklung und geht im weiteren Verlauf vertiefend auf Elemente der Konstruktionsarbeit ein, welche sodann im Abschnitt Drei auf die konkrete Aufgabenstellung angewendet werden.

### 2.1 Allgemeine Grundlagen

Eine methodische Vorgehensweise, angewandt auf Produktentwicklung und Konstruktion, hat sich in sämtlichen Branchen durchgesetzt und bewährt. Dies soll im Sinne einer effizienten Arbeitsweise Anlass geben, die Handlungsanweisungen und Methoden besser kennen und verstehen zu lernen.

#### 2.1.1 Planung der Produktaspekte

Je nach Aufgabenstellung und damit verbundener Konstruktionsart (vgl. Abschnitt 2.3.5), ist die Planung folgender Aspekte in verschiedenem Umfang von Nöten. [10, S.200ff]

- Inhaltliche Planung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses
- Terminliche Planung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses
- Kostenplanung des Projekts bzw. des Produktes

Zur Beschreibung der inhaltlichen Planung dienen die branchen- und produktunabhängigen Vorgehensweisen einer Konstruktionsmethodik wie VDI 2222, auf die in den folgenden Abschnitten explizit eingegangen wird (vgl. Abschnitt 2.2 und Abschnitt 2.3). Auf Grund fehlender Mitarbeiter, sowie dem eingeschränkten Umfang einer Diplomarbeit entfällt der Aufwand für die Erstellung eines groß angelegten Zeitplanes. Die Kostenplanung beschränkt sich auf die Grobkalkulation der Herstellungskosten, bestehend aus Material- und Fertigungskosten. Der Vergleich mit bestehenden Austragungssystemen ergibt ein Feedback bezüglich verwendbarer Maschinenelemente und Zukaufteile, sowie den Fertigungsmöglichkeiten und Werkstoffen. Auf Grund des fehlenden Entwurfes zu Ende der Konzeptionsphase ist eine exakte Vorhersage der Kosten schwierig (vgl. Abschnitt 2.3.2). Primäres Ziel der Diplomarbeit ist aber nicht das Erreichen der Zielkosten, sondern die Beantwortung der Frage nach prinzipieller Umsetzbarkeit des gefundenen Lösungskonzepts bei Beachtung der Kosten.

### 2.1.2 Konstruktionsmethodik

Man versteht darunter ein strukturiertes Vorgehen nach klar definierten Handlungsanweisungen um die Entwicklung und Konstruktion technischer Systeme zu ermöglichen. Dies beinhaltet Vorgehenspläne zur Verknüpfung von Konstruktionsphasen und Arbeitsplänen, sowie Methoden und Strategien, welche an konkrete Problemstellungen anzupassen sind. Als Richtlinie für eine solche Methode dient beispielsweise VDI 2222. Die Arbeit des Entwicklers und Konstrukteurs bedarf auch einer gewissen Intuition und Kreativität. Keine Methodik fordert daher das sklavische Einhalten und Abarbeiten der vorgeschlagenen Arbeitsabfolge in Richtung des fertigen Produktes. [10, S.10]

Nach [10, S.11] zeichnet sich eine Konstruktionsmethodik durch folgende Punkte aus:

- Erleichtert das Finden optimaler Lösungen und erzeugt diese nicht zufällig.
- Branchenunabhängig, für jede konstruktive Tätigkeit anwendbar.
- Die Lösungen müssen auf verwandte Aufgaben übertragbar sein.
- Verwendet Erkenntnisse aus Denkpsychologie und Arbeitswissenschaft, soll die Arbeit erleichtern sowie Fehlentscheidungen vermeiden.

Weiter sei hervorgehoben, dass die Richtlinien bzw. die Vorgehenspläne betont iterativ abzuwickeln sind. Ein Überspringen oder Wiederholen verschiedener Arbeitsschritte stellt eine flexible Arbeitsweise dar und ist für die Anwendung solcher Pläne von großer Bedeutung. [10, S.21] Diese Art und Weise Denk- und Handlungsprozesse zu durchlaufen, spiegelt sich in der TOTE-Einheit nach Abbildung 2-1 wieder. Nach einer Prüfoperation (Test), welche die Ausgangssituation analysiert, folgt der eigentliche Veränderungsprozess (Operation).

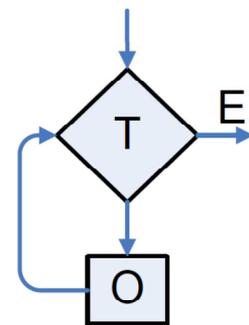


Abb. 2-1 TOTE - Einheit

Durch eine weitere Prüfoperation wird der neue Zustand geprüft und im Falle eines zufriedenstellenden Ergebnisses kann die Schleife verlassen werden. Diese Schleifen können auch verschaltet werden, was bei Denkprozessen nicht immer bewusst geschehen muss. [10, S.63] Die Umsetzung einer technischen Funktion geht immer mit wirtschaftlichen, sowie sicherheitstechnischen Aspekten einher. Die Anzahl denkbarer Lösungen wird dabei durch eine große Anzahl verschiedener Faktoren wie beispielsweise Stand der Technik, Ergonomie, Fertigungsmöglichkeiten, Montage, Instandhaltung etc. reduziert. All diese Merkmale wirken auf die Anforderungsliste ein, werden festgehalten und beeinflussen über den gesamten Entstehungsprozess die Arbeit des Entwicklers. Sie bilden einen roten Faden, der sich als Leitlinie durch das Projekt zieht. Die Tätigkeit des Entwicklers ist durch

den fortwährenden Vorgang des Problemlösens gekennzeichnet. Die im Entwicklungsauftrag festgehaltene Aufgabenstellung der Diplomarbeit erfüllt wichtige Merkmale eines Problems: Komplexität und Unbestimmtheit. Jedes Problem lässt sich jedoch auf einzelne Aufgaben herunter brechen, für deren Bewältigung Mittel und Methoden eindeutig festgelegt sind. Zwischen Aufgabe und Problem besteht eine Wechselbeziehung, die Betrachtung und Aufspaltung des einen kann ein Hervortreten des anderen mit sich ziehen. [10, S.57ff] Ein guter Problemlöser zeichnet sich nach [10, S.64ff] wie folgt aus:

- Intelligenz und Kreativität; ungerichtete Erzeugung von Ideen und Varianten kann aber auch hinderlich sein. Ein geordnetes fachliches Wissen ist unumgänglich.
- Entscheidungsverhalten; ein Kompromiss aus Konkretheit und Abstraktion ist jederzeit zu finden.
- Auch bei Unbestimmtheiten, z.B.: einer unscharfen Problemformulierung, ist ein Handeln möglich.
- Eine flexible Vorgehensweise über die gesamte Tätigkeit hinweg.

Diese, stark persönlichkeitsgeprägten Attribute, können durch Befolgen einer wohldurchdachten Methodik ergänzt und etwaige Defizite so ausgeglichen werden. Eine gründliche Zielformulierung am Anfang der Tätigkeiten, einhergehend mit der Klarstellung von Randbedingungen, ist unumgänglich. In einer konzeptionellen Phase (vgl. Abschnitt 2.3.2) soll das vielversprechendste Lösungskonzept gefunden und während der Entwurfsphase (vgl. Abschnitt 2.3.3) in seiner Gestalt konkretisiert werden. Mit angemessenen Konkretisierungsgrad sollen in einem, zuerst divergenten dann konvergenten Lösungsfeld, eine überschaubare Anzahl von Varianten gefunden werden. Ein Wechsel der Betrachtungsweise, sowie ständige Reflexion und Beurteilung der eigenen Leistung, ohne zu sehr auf die persönliche Präferenzen zu achten, stehen mit den Kennzeichen einer guten Konstruktionsmethodik im Einklang. [10, S.64ff] Das Auflösen von eigenen Vorurteilen ermöglicht erst eine breit angelegte Suche nach Lösungen und soll Denkfehler vermeiden.

Die Operationalisierung der Arbeitsschritte durch Befolgen einer Konstruktionsmethodik soll eine zu sehr intuitiv geprägte Arbeitsweise, welche sich wie folgt ausdrückt, begrenzen.

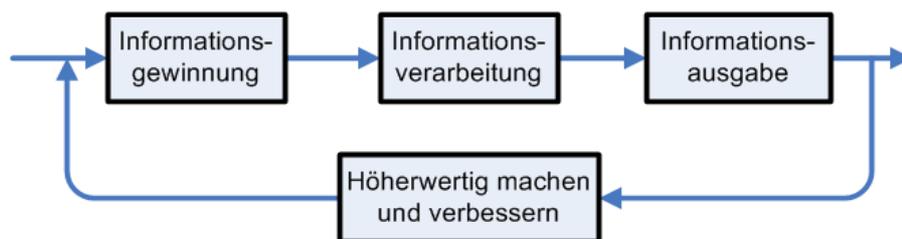
[10, S.69ff]

- Es liegt dem Menschen inne, auf Grund einer fachlichen Fixierung, Lösungen nur innerhalb seines Horizontes wahrzunehmen.
- Das Ergebnis variiert somit stark nach den Ausprägungen des Bearbeiters.
- Durch Intuition ist die Lösung vom richtigen Einfall abhängig, dieser kann jedoch nicht erzwungen werden und geschieht eher zufällig.

Diese Gründe sollten genügen, ein bewusstes und weniger intuitives, als diskursiv bezeichnetes Vorgehen anzustreben. Keineswegs soll die Intuition vernachlässigt werden, vielmehr soll die Gesamtaufgabe strukturiert werden und die Lösung kleiner Teilaufgaben und Probleme kann bzw. soll dann intuitiv erfolgen. [10, S.69ff] Das gesamte Vorgehen kann als generierende Lösungssuche bezeichnet werden, bei der, im Gegensatz zur korrigierenden Lösungssuche, die Erzeugung von denkbaren Lösungen und eine gerichtete Auswahl stattfindet. Im Falle einer korrigierenden Lösungssuche wird von einer bestehenden Idee fortgeschritten. [10, S.73]

### 2.1.3 Informationsumsatz

Es folgt ein Exkurs, um den grundlegenden Prozess der Informationsbeschaffung und -verarbeitung zu erläutern. Bei der Bearbeitung eines Problems besteht ein hoher Informationsbedarf, welcher ständig im Wandel begriffen ist. Diesen Informationsumsatz stellt Abbildung 2-2 dar.



**Abb. 2-2 Informationsumsatz mit Iterationsschleife**

Informationsgewinnung ist für das Lösen einer Aufgabe von großer Bedeutung und kann, unter anderem, wie folgt bewerkstelligt werden. Alle nachstehend angeführten Punkte sind auszugsweise entnommen und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. [10, S.67ff]

- Marktanalyse, Patentrecherche, Fachliteratur
- Durch eine konkretisierte Aufgabenstellung
- Berechnungen, Versuche, Analogien
- Aus Methoden der Lösungssuche (vgl. Abschnitt 2.4)
- Forschungsergebnisse

Informationsverarbeitung geschieht durch:

- Analyse und Synthese (vgl. Abschnitt 2.4.1)
- Ausarbeiten von Lösungskonzepten (vgl. Abschnitt 2.3.2)
- Berechnen, Experimentieren

- Durcharbeiten und Korrigieren v. Skizzen u. Zeichnungen
- Beurteilen von Lösungen (vgl. Abschnitt 2.5.2)

Schließlich folgt dem die Informationsausgabe die sich wie folgt ausdrückt:

- Festlegung durch konkrete Zeichnungen, Tabellen, Berichte und Anweisungen (vgl. Abschnitt 2.3.4 )
- Erstellung von Anweisungen, Bestellungen und Arbeitsplänen

Die notwendigen Informationen sind meist von unterschiedlichster Art und Inhalt. Ein Durchlaufen der Iterationschleife soll helfen, die Information auf ein höheres Niveau zu bringen und sich so einer Lösung anzunähern. [10, S.67ff] Die Iteration währt andauernd, bis lösungsrelevante Erkenntnisse auf Grund der höherwertigen Information vorliegen. In diesem Ablauf spiegelt sich die eingangs erwähnte TOTE-Schleife wieder. Beim Durchlaufen der Konstruktionsmethodik und der zugrundeliegenden Handlungsempfehlung treten Iterationsschleifen in und zwischen den Arbeitsschritten wiederkehrend auf. Grund hierfür sind komplexe Zusammenhänge und notwendige Information aus eigentlich nachgelagerten Schritten. Die in Abbildung 2-6 angebrachten Pfeile unterstreichen den iterativen Charakter einer Methodik wie VDI 2222, wengleich die Werkzeuge des methodischen Vorgehens die Ausweitung dieser Schleifen im Sinne effektiven Arbeitens zu begrenzen versuchen. [10, S.189ff]

## **2.2 Einführung**

Im Folgenden werden grundlegende Begriffe und Zusammenhänge der Konstruktionsmethodik nach VDI 2222 an Hand von Abbildung 2-6 erläutert.

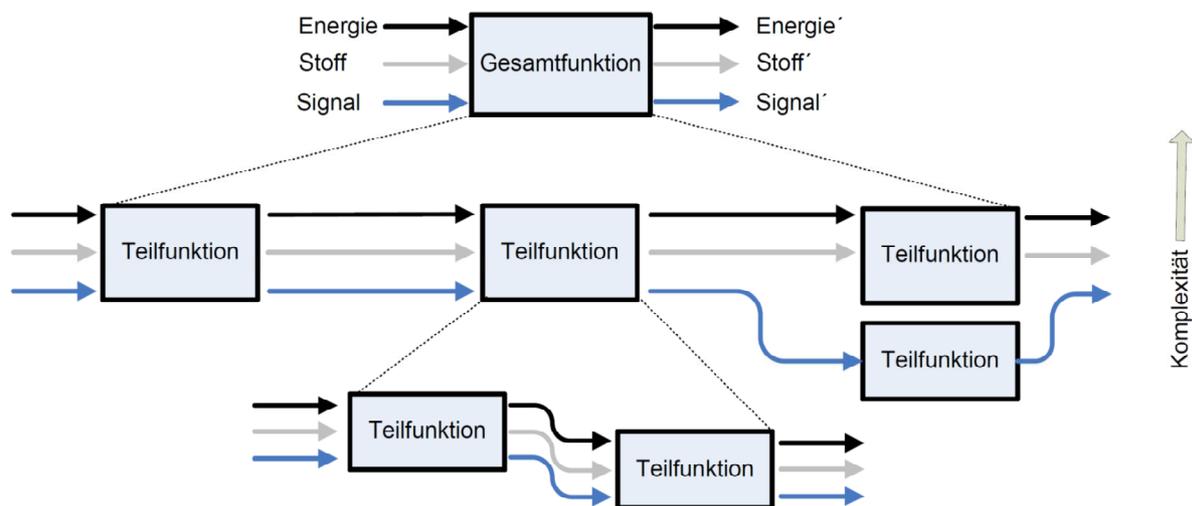
### **2.2.1 Technische Systeme**

Die Nomenklatur technischer Gebilde ist nicht einheitlich und eine exakte Einteilung selten möglich. Ein Ansatz besteht darin, Energieumsetzende als Maschinen, Stoffumsetzende als Apparate und Signalumsetzende als Geräte zu bezeichnen. Neben diesen gängigen Definitionen lässt sich ein technisches Gebilde auch als System darstellen, welches über die Systemgrenze hinweg durch Eingangs- und Ausgangsgrößen mit seiner Umgebung in Verbindung steht [10, S.40]. Es erweist sich als zweckmäßig, das System an Hand von Funktionen zu definieren und so ein abstrahiertes Modell zu schaffen [10, S.41]. Nach [10] versteht man unter einer Funktion den gewollten Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen [10, S.783]. Das System lässt sich vorerst als Blackbox cha-

rakterisieren, die sich durch den Umsatz, also das Leiten und Verändern, von den drei Größen Energie, Stoff und Signal auszeichnet [10, S.42]. Die Funktion ist bekannt, eine passende Lösung, um den gewünschten Umsatz von Energie, Stoff und Signal zu gewährleisten, gilt es noch zu finden.

## 2.2.2 Funktionszusammenhang

Die Gesamtfunktion eines technischen Systems, welche einer präzisen Formulierung der Aufgabenstellung entstammt, lässt sich in Teilfunktionen nach Abbildung 2-3 aufspalten. Die Verknüpfung dieser Subfunktionen untereinander ist variabel, muss allerdings verträglich sein und der Gesamtfunktion genügen. Eine sinnvolle Verknüpfung der Teilfunktionen nennt man Funktionsstruktur. Auf Grund der Variabilität beim Aufstellen der Funktionsstruktur ergeben sich meist vielerlei plausible Möglichkeiten, sogenannte Varianten.



**Abb. 2-3 Funktionsstruktur durch Aufgliedern einer Gesamtfunktion in Teilfunktionen**

Das Abstraktionsniveau steigt mit dem Grad der Aufgliederung, wohingegen die Komplexität sinkt. Es gilt einen Kompromiss zwischen Verallgemeinerung und Anschaulichkeit zu finden, die Verwendung allgemein anwendbarer Funktionen kann auf Grund fehlender Anschaulichkeit die Lösungssuche behindern. Diese allgemein anwendbaren Funktionen bedienen sich der Symbolik, eine einfachere Form der Beschreibung ist die Angabe mit einer Kombination aus Haupt- und Zeitwort, z.B.: "Drehmoment leiten". [10, S.44ff] Das Erstellen einer Funktionsstruktur erleichtert die Lösungsfindung durch reduzierte Komplexität auf Grund getrennter Erarbeitung der Lösungen zu den Teilfunktionen [10, S.51].

2.2.3 Zusammenhang der Lösungs- bzw. Wirkprinzipien

Im Funktionszusammenhang wurden das System und seine Teilfunktionen, verbunden durch Flüsse von Energie, Stoffen und Signalen, als schwarze Kästen dargestellt. Über deren Inhalt und vielmehr deren Umsetzung wurde noch hinweggesehen. Im nächsten Schritt sucht man nach entsprechenden Lösungs- bzw. Wirkprinzipien zum Erfüllen der Teilfunktionen. Erst die Kombination aus physikalischen Effekt, sowie geometrischen und stofflichen Eigenschaften bestimmt ein vollständiges Lösungs- bzw. Wirkprinzip. Zur Vergegenwärtigung diene Abbildung 2-4. [10, S.52]

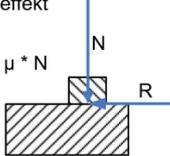
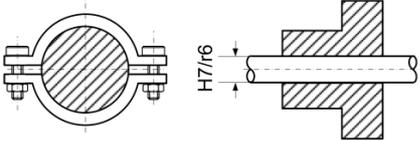
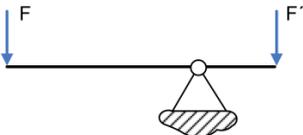
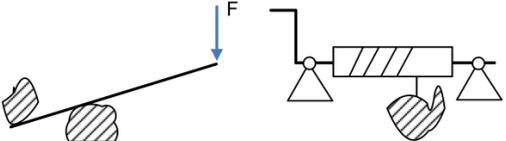
Teilfunktion	Physikalische Effekte (Lösungsneutral)	Wirkprinzipien für eine Teilfunktion (physikal. Effekte + geometrische und stoffliche Merkmale)
	<p>Reibungseffekt</p> $R = \mu \cdot N$ 	
	<p>Hebeleffekt</p> 	

Abb. 2-4 Erfüllung von Teilfunktionen durch Wirkprinzipien

Hieraus wird ersichtlich, dass zur Festlegung der Wirkprinzipien bereits Vorstellungen über Werkstoffeigenschaften und dergleichen vorhanden sein müssen. Bei dieser stark abstrahierten Darstellungsform wird auch deutlich, dass ein Mindestmaß an Erfahrung notwendig ist und schrittweises Verfolgen einer Methodik ohne fachliches Wissen nicht zum Erfolg oder nur zu eingeschränkten Lösungen führen kann. Werden die Wirkprinzipien, welche die jeweilige Teilfunktion erfüllen, kombiniert, spricht man von einer Prinzipkombination oder auch Wirkstruktur. Die verschiedenen denkbaren Varianten der Prinzipkombination erfüllen die Gesamtfunktion im Sinne der Aufgabenstellung und führen nach überschlägiger Rechnung und/oder Geometrieuntersuchung zu einer prinzipiellen Lösung.[10, S.54] Im Zusammenhang mit dieser Arbeit wird auf weitere Begriffsdefinitionen, sofern möglich, verzichtet. Dies soll die Übersichtlichkeit und Lesbarkeit fördern.

2.2.4 Bauzusammenhang

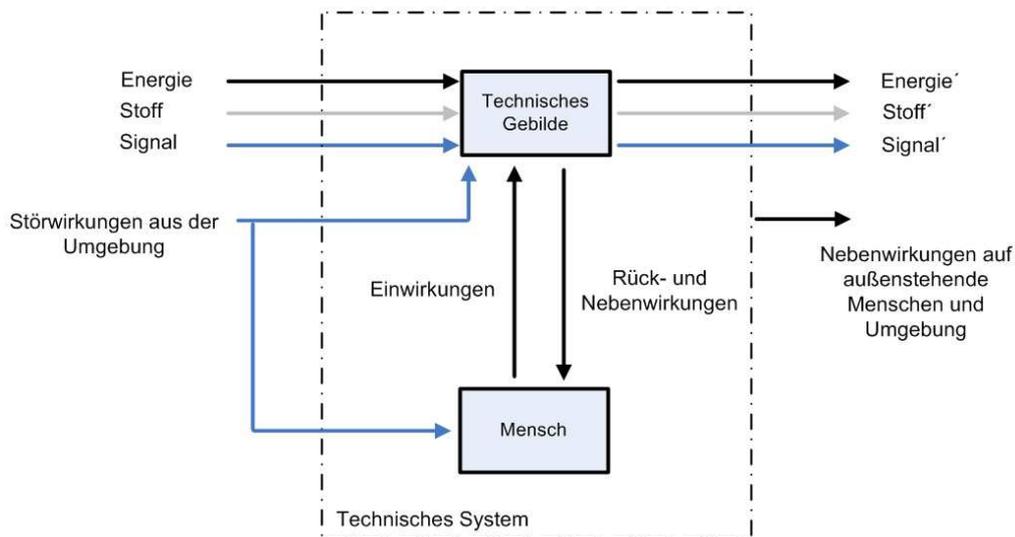
Weiterführende Konkretisierung führt auf die Baustruktur, die Bauteile des technischen Gebildes beinhaltet. Bedingungen, welche beispielsweise aus Fertigungs- oder Montagevorga-

ben stammen, sind hier berücksichtigt. Diese realen Elemente entsprechen dem Funktionszusammenhang, der Wirkstruktur und Anforderungen des Systemzusammenhanges.

[10, S.56]

### 2.2.5 Systemzusammenhang

Ein technisches Gebilde existiert nicht des Eigzweckes willen, sondern steht in Zusammenhang mit dem Menschen. Der Systemzusammenhang beschreibt die Wirkungen innerhalb des Systems aus Mensch und Gebilde, aber auch über die Systemgrenze hinweg. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 2-5 festgehalten. Der Mensch befindet sich hier innerhalb der Systemgrenze, über welche die oben genannten Flüsse aus Energie, Stoff und Signal fließen. [10, S.56]



**Abb. 2-5 Systemzusammenhang**

In nachfolgender Tabelle sind die einzelnen Elemente und Zuordnungen zusammengefasst.

Zusammenhang	Funktionszusammenhang	Zusammenhang der Wirk- bzw. Lösungsprinzipien	Bauzusammenhang	Systemzusammenhang
Elemente	Funktionen	Wirkprinzipien	Bauteile Verbindungen Baugruppen	Technisches Gebilde Mensch Umgebung
Struktur	Funktionsstruktur	Wirkstruktur	Baustruktur	Systemstruktur

**Abb. 2-6 Zusammenhänge der Strukturen eines technischen Systems**

### 2.3 Konstruktionsmethodik nach VDI 2222

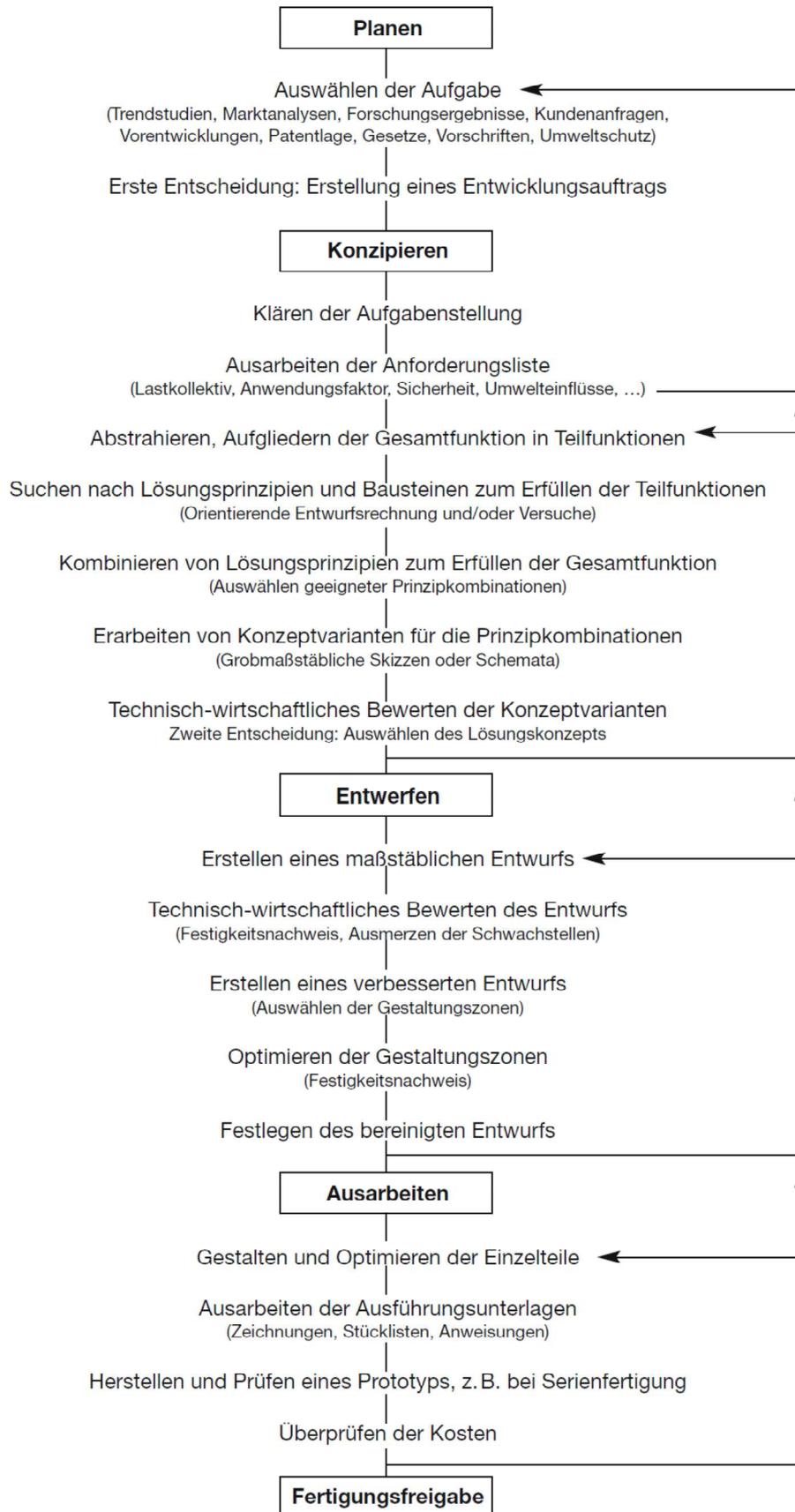


Abb. 2-7 VDI 2222 mit den einzelnen Phasen einer Konstruktion [9, S.5]

In Abbildung 2-7 ist der Aufbau einer Konstruktionsmethodik nach VDI 2222 dargestellt. Sie beinhaltet operative Handlungsempfehlungen zur Lösung eines technischen Problems. Am Ende soll ein branchenunabhängiges technisches Produkt entwickelt sein, die Empfehlung ist daher allgemein gehalten und Anpassungen an die jeweilige Problemlage bzw. den Produktbereich sind zumeist notwendig. Durch Verzicht auf derartige Hilfsmittel und den Methodeneinsatz läuft man Gefahr, unstrukturiert zu entwickeln, einer chaotischen Vorgehensweise zu erliegen. [10, S.189ff]

Im Folgenden soll in grundlegenden Zügen auf die einzelnen Phasen: Planen - Konzipieren - Entwerfen - Ausarbeiten aus Abbildung 2-6 eingegangen werden.

### 2.3.1 Planen

Wirtschaftlich orientierte Unternehmen trachten nach Gewinn, welcher sich durch den Absatz erfolgreicher Produkte mehr [10, S.95]. Ein solches Produkt entspricht weitestgehend den Wünschen und Bedürfnissen der Kunden. Daher ist eine methodische Produktplanung zur nachhaltigen Sicherung des Unternehmenserfolges empfehlenswert, sofern man sich nicht auf den richtigen Einfall verlassen möchte [10, S.103]. Die Ausmaße dieser Planung werden selbstverständlich stark variieren, so kann sich dieser Vorgang innerhalb eines Kleinstunternehmens auf intuitive Methoden (vgl. Abschnitt 2.4.3), z.B.: Gespräche beschränken.

Die bedeutendste Tätigkeit der Produktplanung ist das Auffinden von Produktideen nach vorangegangener Situationsanalyse. Auf diesem Wege sollen Einflüsse und Impulse aus dem Markt, dem Umfeld und dem eigenen Unternehmen erfasst und gesammelt werden. Dies kann z.B.: durch Untersuchungen, Trendstudien und Informationsbeschaffung zu Konkurrenzprodukten geschehen. Um Handlungsoptionen zu erkennen muss die Leistungsfähigkeit des Unternehmens abgewogen und die Marktstellung von eigenen Produkten hinsichtlich derer Stärken und Schwächen erfasst werden. Einhergehend sind Kapazitäten verschiedener Abteilungen wie F&E und Fertigung, sowie Investitionsumfänge abzuklären. Während dieser Situationsanalyse ist auch der Lebenszyklus von bestehenden Produkten nach Abbildung 2-8 von großem Interesse. [10, S.104ff] Die Darstellung beschreibt die typischen Verläufe der Kenngrößen Gewinn und Umsatz über der Zeit [10, S.97]. Im Zusammenhang mit der Planungsphase soll der Abbildung folgende Kernaussage entnommen werden: Das Unternehmen ist in der Sättigungsphase zur Entscheidung angehalten, das Produkt zu aktualisieren und/oder durch ein Neues zu ersetzen. Weist eine etablierte Technologie Entwicklungspotential auf, können Investitionen getätigt werden, andernfalls kommt eine Substitution in Frage. [10, S.104ff] Ist die Situationsanalyse abgeschlossen, müssen Suchstrategien zum Auffinden von Produktideen angewandt werden. Diese können beispielswei-

se die Suche nach Nischen oder Lücken im Marktangebot beinhalten oder auf die Prognostizierung von Trends abzielen. Trends, also erfassbare Tendenzen, geben Information über das Konsumverhalten der Käufer wieder und helfen das Potential neuer Technologien zu erkennen. [10, S.110ff]

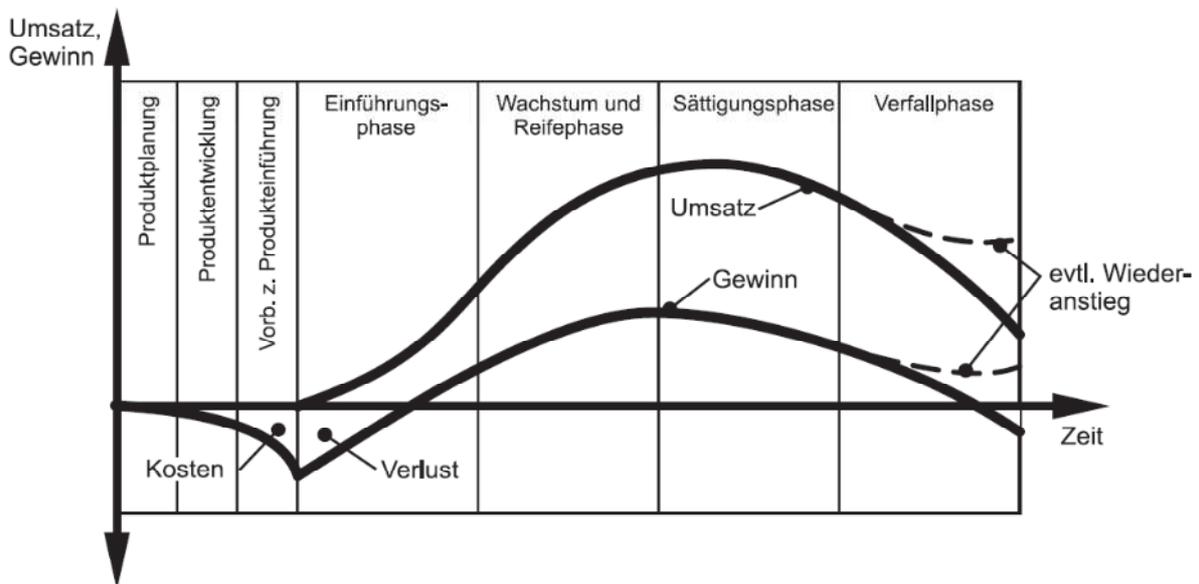


Abb. 2-8 Lebenszyklus eines Produkts [10, S.98]

Verschiedenste Methoden, wie das Abhalten von Workshops, sollen die Findung von Produktideen vorantreiben. Weiters können durch Extrapolation des Kundennutzens, auf Grund von Trends, zukünftige Anforderungen formuliert und auf das Produkt übertragen werden. Sieht man sich nicht in der Lage die neuen Leistungsspezifikationen umzusetzen, ist die Technologie zu adaptieren oder zu substituieren. Als Beispiel diene die Forderung nach Verbrauchsreduktion in Kraftfahrzeugen. Ist dieser mit bekannter Technologie und Bauteilen nicht nachzukommen, müssen andere Wege der Umsetzung eingeschlagen werden. Auch die Variation gewisser Parameter innerhalb der Entwicklungsmethodik eines bereits vorhandenen Produkts, etwa der Funktionsstruktur, kann Produktideen generieren. [10, S.110ff]

Nach Anwendung der Suchstrategien folgt die Selektion der gefundenen Produktideen. Sie werden hinsichtlich der erwarteten Akzeptanz am Markt und durch technisch-wirtschaftliche Bewertung ausgewählt oder verworfen. Die in Betracht gezogenen Ideen müssen auch den Unternehmenszielen und -stärken genügen. [10, S.117ff]

Die ausgewählten Produktideen werden nach weiterer Konkretisierung in einem Produktvorschlag festgehalten. In diesem finden sich Angaben zu den gewollten Funktionen und Anforderungen an das Produkt sowie ein Kostenziel. Zur Einhaltung eines Planungshorizontes wird ein genereller Umsetzungsplan erstellt, der, neben kurzfristig umsetzbaren Produktvorschlägen, auch übergeordnete Ziele und Maßnahmen für größere Zeitintervalle beinhaltet.

An die Entwicklungs- bzw. Konstruktionsabteilung ergehen die kurzfristigen Produktvorschläge in Form eines Entwicklungsauftrages. Hier endet die Planungsphase und mit der Klärung der Aufgabenstellung beginnt die Konzeptionsphase. [10, S.119ff]

### 2.3.2 Konzipieren

Aufgabenstellungen können sich der Konstruktionsabteilung in folgender Weise zeigen: [10, S.213]

- Als Entwicklungsauftrag aus externer oder interner Produktplanung
- Anregungen aus dem internen Umfeld des Unternehmens
- Kundenauftrag

Für Letzteren ist das Lastenheft, in dem die Forderungen an den Auftragnehmer festgehalten sind, bereits erstellt und es kann nach Termin- und Kostenplanung mit der Phase des Konzipierens begonnen werden. Die beiden ersteren sind in einem Zug zu nennen, da interne Anregungen, wie z.B.: Verbesserungsvorschläge und Kritik, auch einer Art Produktplanung entsprechen.

Nach Abbildung 2-7 geht die Anforderungsliste aus der Klärung der Aufgabenstellung hervor. Dies geschieht in dem die lösungs- und gestaltbeeinflussenden Produktspezifikationen erkannt und in quantitativen Angaben formuliert werden [10, S.213]. Die so gewonnene Liste setzt sich aus Forderungen und Wünschen zusammen, wobei die Erfüllung ersterer eine akzeptable Lösung ausmacht. Wünsche können, falls der entstehende Mehraufwand berechtigt ist, ebenfalls berücksichtigt werden. Eine ständig aktualisierte Anforderungsliste enthält auch Hinweise zur Durchführung und bietet eine Arbeitsunterlage, die den Grad der Aufgabenerfüllung dokumentiert. Sie ist daher in keinem Fall als statisch zu betrachten, vielmehr unterliegt die Liste einem steten Wandel, im Zuge dessen Änderungen und Ergänzungen nachgetragen werden. Anforderungen können wie folgt gegliedert werden: [10, S.215ff]

- Grundlegende Anforderungen; diese sind implizit, werden vom Kunden nicht ausgesprochen, sind aber für den Erfolg des Produkts entscheidend.
- Technische Anforderungen; sie werden explizit formuliert, z.B.: Leistung eines Motors.
- Attraktivitätsanforderungen; sie dienen der Differenzierung von Produkten von Mitbewerbern, z.B.: umfangreichere Farbpalette bei PKWs.

Zusammenfassend empfiehlt sich folgender Ablauf zur Erstellung der Liste: [10, S.222]

- Anforderungen sammeln und ordnen;
- Anforderungsliste an beteiligte Abteilungen weiterleiten;
- Einwände und Ergänzungen ständig einarbeiten und aktualisieren;

Auf die Erstellung der Anforderungsliste folgt nach Abbildung 2-7 das Aufstellen der Funktionsstruktur (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die Abstraktion (vgl. Abschnitt 2.4.1) ist hier ein wesentliches Werkzeug, das die Zerlegung in Teilfunktionen ermöglichen soll. Die Erfüllung dieser Teilfunktionen kann durch das Auffinden von Lösungs- bzw. Wirkprinzipien oder die Anwendung bereits bekannter Lösungen geschehen. Nach deren Kombination ergeben sich die Prinzipkombinationen, welche auch als Wirkstrukturen bezeichnet werden. Die Erstellung der Prinzipkombinationen erfordert oftmals die Hinzunahme weiterer Aspekte, wie zum Beispiel Werkstoffwahl, einer überschlägigen Auslegung oder technologischer Einschränkungen. Die möglichen Varianten der Prinzipkombinationen werden ausgewählt und münden in der Bewertung der prinzipiellen Lösung bzw. des Lösungskonzeptes. Der Umfang und die Erscheinungsform der Lösung können stark variieren. Grundsätzlich vermindert das penible Abarbeiten der, für die Konzipierung vorgeschlagenen Schritte, die Wahrscheinlichkeit eines Fehlschlages in nachfolgenden Projektphasen. In diesen späteren Phasen können Mängel des Lösungskonzeptes kaum, oder nur unter großer Anstrengung, behoben werden. Ein Bewertungsverfahren mit eigens definierten Bewertungskriterien bildet den Abschluss der Konzeptionsphase. [10, S.195ff]

### 2.3.3 Entwerfen

In diesem Teil der Konstruktionsarbeit soll die Baustuktur (vgl. Abschnitt 2.2.4) unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Belange entworfen und so die quantitative Umsetzung der Lösung generiert werden. Maßstäbliche Entwürfe sind zumeist notwendig um der Vor- und Nachteile einer Lösung einsichtig zu werden. Das Bewerten, Optimieren und Adaptieren eines Entwurfs entspricht der bereits dokumentierten iterativen Herangehensweise und erzeugt höherwertige Information. Es ist durchaus üblich, Schwachstellen einer Lösung oder Gestaltungszone durch Übernahme der Teillösungen aus anderen Lösungskonzepten auszumerzen. Der bereinigte Entwurf enthält beispielsweise die Sicherstellung von Funktionsweise, geometrischer Verträglichkeit und soll eine kostendeckende Lösung garantieren. [10, S.195ff] Die Grundregeln zur Gestaltung eines technischen Gebildes lauten: Eindeutig, einfach und sicher. Eindeutigkeit soll eine zuverlässige Vorhersage des Verhaltens ermöglichen und groß angelegte Untersuchungen ersparen. Durch geringere Teilezahl und

einfachere Fertigungsverfahren werden wirtschaftliche Lösungen möglich, dies entspricht der Einfachheit. Zuverlässigkeit, Unfallschutz und Umweltschutz sind der Forderung nach Sicherheit zuzuschreiben. Die Grundregeln sind zwingend einzuhalten, dies steigert die Chancen einer erfolgreichen Umsetzung maßgeblich. In [10] werden eine Reihe von Hauptmerkmalen vorgeschlagen, auf die diese Grundregeln anzuwenden sind. Hierzu zählen beispielsweise die Wirkprinzipien, Auslegung, Ergonomie, Fertigung, Gebrauch und Kosten.

[10, S.312ff] Am Beispiel der Auslegung soll die Anwendung der drei Grundregeln demonstriert werden:

- Eindeutig: Betriebszustände müssen bekannt und klar definiert sein, Beeinträchtigungen der Funktion während des Betriebes sind nicht zugelassen. Das Vermeiden von Doppelpassungen zählt hierzu [10, S.317].
- Einfachheit: Durch die Wahl einfacher geometrischer Formen werden die Objekte einer Beurteilung mit mathematischen Methoden, beispielsweise der Festigkeitsberechnung, einfacher zugänglich [10, S.322].
- Sicherheit: Bei der Ausnutzung des Werkstoffs hinsichtlich Festigkeit und Verformung müssen die vorgegebenen Sicherheitswerte eingehalten werden [10, S.347].

Folgende Gestaltungsrichtlinien sind einzuhalten: Ausdehnungsgerecht, kriech- und relaxationsgerecht, korrosionsgerecht, verschleißgerecht, ergonomiegerecht, fertigungsgerecht, montagegerecht, normengerecht, instandhaltungsgerecht etc. [10, S.393ff]

#### 2.3.4 Ausarbeiten

Die Baustruktur wird endgültig festgelegt durch

- Vorschriften für Form, Bemessung und Herstellung
- Werkstoffe und Oberflächen der Einzelteile
- Erstellung der notwendigen Unterlagen inkl. endgültiger Kosten

Die Funktionstüchtigkeit und die Produktkosten werden hier maßgeblich beeinflusst was Grund gibt, in dieser Phase große Sorgfalt walten zu lassen. Die Optimierung geht nach fertigungs- und kostengünstigen Gesichtspunkten von statten, dabei muss auf geltende Normen Rücksicht genommen werden. Die Verwendung von unternehmensinternen Gleichteilen, sowie standardisierter Zukaufteile ermöglicht ein wirtschaftliches Produkt. [10, S.197ff]

Mit dem, nach Abbildung 2-7 vorgesehenen Prototypenbau wurde bereits in der Konzeptphase begonnen, um grundsätzliche Fragen zu klären. Ein, durch bewußtes Vorgehen ge-

kennzeichneter Produktentwicklungsprozess verleiht Sicherheit nichts Wesentliches zu übersehen und unterstützt effektives Arbeiten.

2.3.5 Exkurs Konstruktionsarten

Grundsätzlich lassen sich Konstruktionsarten mannigfaltig unterscheiden, die Grenzen sind fließend und strikte Trennung ist oft schwierig. Teilweise fehlt in der Literatur eine durchgängige Verwendung der Begriffe. Abbildung 2-9 zeigt die Zuordnung der Konstruktionsarten zu den Konstruktionsphasen.

Konstruktionsarten		Konstruktionsphasen			
		Konzipieren		Entwerfen	Ausarbeiten
Gruppenbegriffe	gebräuchliche Begriffe der Praxis	Funktionsfindung	Prinzip-erarbeitung	Gestaltung	Detailierung
Neukonstruktion	Neukonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			
	Entwicklungskonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			
	Angebotskonstruktion	[Hatched bar]	[Hatched bar]		
Anpassungskonstruktion	Anpassungskonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			
	Angebotskonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			
	Fertigungskonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			
	Änderungskonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			
Variantenkonstruktion	Variantenkonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			
Konstruktion mit festem Prinzip	Prinzipkonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			

Abb. 2-9 Zuordnung der Konstruktionsarten zu den Konstruktionsphasen [9, S.12]

Es ist erkennbar, dass nicht alle Konstruktionsarten notwendigerweise sämtliche Konstruktionsphasen durchlaufen, eine Prinzipkonstruktion hat beispielsweise den geringsten Anteil inne [9, S.11]. Es wäre falsch, auf Grund der Anzahl notwendiger Phasen direkt den Arbeitsaufwand abzuleiten, die Umfänge variieren, wie die Individualität jedes einzelnen Projektes an sich. Nachstehend finden sich Erläuterungen zu den Gruppenbegriffen aus Abbildung 2-8. Auf eine weitere Unterteilung wird hier verzichtet, zumal ein dezidiertes Einordnen meist nicht möglich ist und weitere Ausführungen im Rahmen dieser Arbeit nicht zielführend wären. Wie bereits erwähnt, ist eine exakte Definition der aufgeführten Konstruktionsarten oftmals nicht möglich oder nötig. Der vorliegende Entwicklungsauftrag zur Diplomarbeit erfüllte allerdings eindeutig die Kriterien einer Neukonstruktion und umfasst damit sämtliche Schritte der Konstruktionsphase.

### 1. Die Neukonstruktion

Sie zeichnet sich durch Anwendung neuer Lösungsprinzipien auf, bis dato bekannte oder unbekannte Aufgaben und Probleme aus. Auch das Betreten von technischem Neuland und damit verbundener Verzicht auf bekannte Prinzipien und Technologien, wird als Neukonstruktion bezeichnet. Sie umfasst sämtliche Konstruktionsphasen und erfordert umfassende Aufgabenklärung, sowie Einbeziehung interdisziplinärer Grundlagen. [10, S.4]

### 2. Die Anpassungskonstruktion

Diese Form geht von einer bestehenden Gesamtfunktion aus, die durch neue Lösungsprinzipien adaptiert bzw. erweitert wird. Die Funktionsfindung kann somit komplett entfallen, siehe Abbildung 2-8. [9, S.11] Diese Form der Konstruktion bedient Fragen und geänderte Anforderungen rund um Geometrie, Festigkeit, Werkstofftechnik etc. [10, S.4]

### 3. Variantenkonstruktion und Konstruktion mit festem Prinzip

Nach [10] sind Variantenkonstruktion und Konstruktion mit festem Prinzip ident, [9] unterscheidet hier wie folgt: Die Variantenkonstruktion beinhaltet ein vorgegebenes Konzept mit der Forderung nach Gestaltsänderung, wobei die Phasen "Entwerfen und Ausarbeiten" durchlaufen werden. Bei der Konstruktion mit festem Prinzip liegen Konzept und Gestalt fest, die Dimensionierung der Einzelteile steht hier im Vordergrund. Somit ist lediglich die Ausarbeitungsphase durchzuführen. [9, S.11]

## **2.4 Methoden der Lösungssuche und Lösungskombination**

Dieser Abschnitt umfasst Methoden, die als Grundlagen strukturierter Arbeit angesehen sind und unterstützend zur Lösungssuche beitragen. Durch den Einsatz dieser Werkzeuge, welche auf alle Phasen des Konstruktionsprozesses anwendbar sind, lässt sich die Diversität der Lösungsvarianten hochgradig steigern. [10, S.121ff] Mittels Kombinationsmethoden (vgl. Abschnitt 2.4.5) bzw. Auswahl- und Bewertungsmethoden (vgl. Abschnitt 2.5) wird dann eine Konvergenz erzeugt, die unnütze Varianten ausscheidet.

### 2.4.1 Allgemeine Methoden

#### 1. Die Analyse

Durch Aufgliederung und Untersuchung eines Zusammenhangs sollen Information zu einzelnen Elementen, als auch zu Verknüpfungen unter ihnen, gewonnen werden. Aus der erhaltenen Information resultiert eine Erkenntnis. Bei der Problemanalyse, die mit zu den wichtigsten Punkten des methodischen Arbeitens zählt, muss das Wesentliche vom Unbedeutenden

getrennt und in bestehendes Wissen eingearbeitet werden. Analysen können Gemeinsamkeiten verschiedenartiger Systeme, beispielsweise an Hand von Analogiebetrachtungen, aufzeigen und damit zur Lösungsfindung beitragen. Eine Schwachstellenanalyse will eben diese aufdecken und bei der Beseitigung werden oftmals Anregungen zu besseren Lösungen gefunden. Das Auffinden dieser Schwachstellen erfolgt mittels Auswahl- und Bewertungsverfahren (vgl. Abschnitt 2.5). [10, S.74ff]

## 2. Die Abstraktion

Die Analyse ermöglicht das Erkennen von Merkmalen, die nach einer Abstraktion den übergeordneten Zusammenhang erkennen lassen. So lässt sich einerseits die Komplexität reduzieren, andererseits entsteht ein Gedankengebäude in das neue Information leichter eingeordnet und auch wieder abgerufen werden kann. Sind prinzipielle Merkmale gedanklich erfasst, kann nach neuen Lösungen, welche diesen Merkmalen genügen, gesucht werden. Die Abstraktion erlaubt es, allgemeingültige Lösungen zu finden, die von Zufälligkeiten der Entstehung oder Anwendung befreit sind. [10, S.74ff]

## 3. Methode des Vorwärtsschreitens bzw. Rückwärtsschreitens

Das Vorwärtsschreiten beschreibt ein zunächst ungeordnetes Divergieren der Gedanken, das von einem ersten Lösungsansatz ausgeht. Durch die Berücksichtigung sogenannter ordnender Gesichtspunkte (vgl. Abschnitt 2.4.4) wird der Denkprozess unterstützt und gelenkt. Im Gegensatz dazu werden beim Rückwärtsschreiten von einem feststehenden Entwicklungsziel ausgehend, alle möglichen Wege betrachtet, die zu diesem Ziel führen könnten. Die Methode erscheint zweckmäßig, da nur Gedanken verfolgt werden, die zum Ziel führen. [10, S.74ff]

## 4. Die Synthese

Sie beschreibt grundsätzlich die Verknüpfung von Einzelheiten zu einer Einheit, in der sich eine neue Ordnung zeigt. Zuvor separierte Elemente werden so zu neuen Lösungen in einem Gesamtsystem synthetisiert. Im Zusammenhang mit der Synthese ist auch der Begriff des Systemdenkens zu nennen. Es soll dafür Sorge tragen, dass im Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte das Ziel, also die Lösung der Gesamtaufgabe, nicht aus den Augen verloren wird. Zur Vergegenwärtigung diene ein Gedankenexperiment, bei dem einzeln optimierte Baugruppen kombiniert werden. Die Verknüpfung dieser Subsysteme muss keineswegs auch der optimalen Gesamtlösung entsprechen! Zur Abschätzung des Wertes einer Lösung müssen richtige Bewertungskriterien (vgl. Abschnitt 2.5.2) definiert werden, was nur bei ganzheitlicher Betrachtung und der Berücksichtigung aller Aspekte, die sich aus dem Problem an sich und den Randbedingungen ergeben, möglich ist. [10, S.74ff]

### 5. Methode des gezielten Fragens

Fragen können in einem Dialog mit einer oder mehreren Personen, oder an sich selbst gestellt und beantwortet werden. Die Verwendung eines Fragenkataloges betont ein diskursives Vorgehen und regt zu neuen Denkprozessen an. Es steht außer Frage, dass der Austausch mit Personen, welche über lösungsrelevante Kenntnisse verfügen, zu den wichtigsten methodischen Hilfsmitteln zählt. [10, S.74ff]

### 6. Methode der Faktorisierung

Ein übergeordneter und umfangreicher Zusammenhang bzw. ein ebensolches System wird auf einzelne Faktoren heruntergebrochen um eine Entflechtung zu ermöglichen. Die Bestandteile werden separat betrachtet und gelöst, ohne dabei den Blick auf die Gesamtheit zu verlieren. Die Bedeutungen der Teilprobleme treten hervor und können so leichter priorisiert werden. In der Konstruktionslehre stellt dies eine der fundamentalsten Methoden dar.

[10, S.74ff]

### 7. Methode des Systematisierens

Durch die Erstellung und Erweiterung einer Ordnung fällt es leichter zu brauchbaren Lösungen zu gelangen. Sind kennzeichnende Merkmale oder auch ordnende Gesichtspunkte zur Verwendung eines Schemas (vgl. Abschnitt 2.4.4) gefunden, kann durch systematische Variation ein Füllhorn an Lösungen erarbeitet werden. [10, S.74ff]

### 8. Arbeitsteilung und Zusammenarbeit

Die Notwendigkeit der Arbeitsteilung bei der Bewältigung umfangreicher Aufgaben, stellt eine grundlegende Erkenntnis dar. Die methodischen Richtlinien sollen helfen, sich in der Lösungssuche gegenseitig zu unterstützen und fordern auch die Schaffung klarer Zuständigkeiten. Bei der Abarbeitung des Entwicklungsauftrages kommt dieser Methode weniger Bedeutung zu, da die meisten Arbeitsschritte allein vom Diplomanden ausgeführt werden. Dieser Sachverhalt erlaubt die Frage nach Sinnhaftigkeit in Bezug auf das Erreichen einer zufriedenstellenden Lösung unter Anbetracht der Ermangelung von am Projekt beteiligten Personen. [10, S.74ff]

## 2.4.2 Konventionelle Methoden

### 1. Kollektionsverfahren

Das Auswerten von Informationen rund um den Stand der Technik ist unverzichtbar bei der Lösung technischer Probleme. Daraus gewonnene Inhalte werden gesammelt und gespeichert. Zu diesen Verfahren zählen: [10, S.122ff]

- Literatur- und Patentrecherche;
- Auswertung von Berichten, Messen und Ausstellungen;
- Analyse von Katalogen und Konkurrenzprodukten.

## 2. Bionik

Versteht sich als Umlegung von der Natur nachempfundenen Lösungsprinzipien auf technische Systeme. Natürliche Strukturen und Vorgänge können sich so in künstlichen Gebilden wiederfinden. Ein Beispiel hierfür ist die wabenförmige Konstruktion von Leichtbauelementen die einer Bienenwabe nachempfunden sind. [10, S.122ff]

## 3. Analyse bekannter technischer Systeme

Physikalisch existente Produkte werden analysiert und nach Zusammenhängen durchsucht. Das Produkt wird gedanklich und auch stofflich soweit zerlegt, bis Wirkprinzipien und physikalische Effekte erkennbar werden. Daraus lassen sich Anstöße zu neuen Lösungen finden, oder das Vorgefundene wird einfach übernommen. Dies kann an Hand von eigenen oder auch fremden Produkten geschehen. Die Gefahr eines eingeschränkten Lösungsfeldes darf dabei nicht vernachlässigt werden. [10, S.122ff] Diese Methode zählt zu den wichtigsten Hilfsmitteln, jedoch sollte man sich, z.B.: in Hinsicht auf Patentlage, nicht zu sehr an fremden Produkten orientieren.

## 4. Messungen und Modellversuche

Diese empirisch geprägte Gruppe von Methoden kann wertvolle Informationen für die Arbeit des Entwicklers bringen. [10, S.122ff] Modellversuche oder auch Prototypenbau kann insbesondere dann von Vorteil sein, wenn die aufwandgerechte Lösung durch eine zu große Anzahl abhängiger Einflüsse nicht greifbar scheint. Strömungsversuche in nachgebauten Flussläufen dienen an dieser Stelle der Illustration.

### 2.4.3 Intuitiv betonte Methoden

Wie bereits erwähnt, ist die Intuition wichtig zur Lösung von Problemen, jedoch birgt eine solch geprägte Arbeitsweise auch Gefahren, da man mehr oder weniger vom Zufall abhängig ist. Eine solide Konstruktionsmethodik unterbindet intuitives Vorgehen keineswegs, kann es aber unterstützen. Ohne im Weiteren darauf einzugehen seien erwähnt: [10, S.127ff]

- Straff geführte Diskussionen mit allgemeinen Methoden aus Abschnitt 2.4.1;
- Brainstorming;
- Galeriemethode.

2.4.4 Diskursiv betonte Methoden

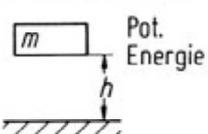
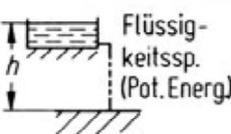
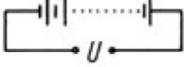
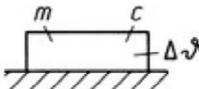
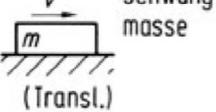
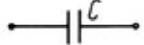
Diese fördern ein schrittweises Vorgehen, das im vollen Bewusstsein des Konstrukteurs geschieht. Intuitive Methoden empfehlen sich hingegen für kleinere Teilaufgaben, die im Rahmen der Entwicklung zu erledigen sind. Die Untersuchung eines physikalischen Zusammenhangs bildet eine diskursive Methode. Aus der, den Zusammenhang beschreibenden Gleichung, werden durch Variation der beteiligten Variablen neue Wirkprinzipien gewonnen. Auch die Verwendung von Katalogen jedweden Typs stellt eine solche Methode dar. Sie enthalten Informationen verschiedensten Inhalts und Konkretisierungsgrades, das Spektrum reicht von der Auflistung physikalischer Effekte bis hin zu Norm- und Zukaufteilen.

[10, S.142ff]

Ordnungsschemata

Mit jeder akkuraten Arbeitsweise gehen Systematisierung und geordnete Darstellung einher. Werden Informationen in ein derartiges Schema integriert, forciert dies einerseits die Suche nach Lösungen, andererseits werden auch Merkmale und Verknüpfungsmöglichkeiten leichter erkannt. Ordnungsschemata erscheinen als Tabellen, deren Zeilen und Spalten gewisse Parameter zugeordnet sind. Sogenannte ordnende Gesichtspunkte fassen die Parameter zusammen. Zum Verständnis dient Abbildung 2-10.

Abb. 2-10 Ordnungsschemata: Wirkprinzipien zum Erfüllen der Funktion "Energie speichern" bei Variati-

Energieart Wirkprinzip	mechanisch	hydraulisch pneumatisch	elektrisch	thermisch
1	 Pot. Energie	 Flüssigkeitssp. (Pot. Energ)	 Batterie U	 Masse Masse
2	 Schwungmasse (Transl.)	Strömende Flüssigkeit	 Kondensator (elektr. Feld) C	Aufgeheizte Flüssigkeit
3	 Schwungrad (Rot.)			Überhitzter Dampf

on der Energieart [10, S.150]

Hier wurde auf die Zeilenparameter verzichtet und stattdessen eine laufende Nummerierung vorgenommen. Je nach Aufgabe bzw. Problem kann dies durchaus sinnvoll und zweckmäßig sein. Ordner Gesichtspunkt der Spalten ist hier die Energieart, die Parameter ergeben

sich aus kennzeichnenden Merkmalen deren Festlegung sich bei fehlender Erfahrung als schwierig herausstellen kann. Ordnungsschemata stellen insbesondere als Kombinationshilfe für Gesamtlösungen aus Teillösungen ein wertvolles Werkzeug dar, können aber für beliebige Phasen der Lösungssuche eingesetzt werden. Weitere Beispiele für ordnende Gesichtspunkte können beispielsweise sein: Physikalische Effekte, Erscheinungsformen und Stoffeigenschaften oder Wirkgeometrie. Das Schema ist schrittweise aufzubauen und zu vervollständigen. Nach der Definition der Parameter und ordnender Gesichtspunkte können Auswahlverfahren (vgl. Abschnitt 2.5.1) darauf angewendet werden. [10, S.145ff]

### 2.4.5 Methoden zur Lösungskombination

Wie bereits mehrfach erwähnt wurde, ist es zweckmäßig, Probleme und Aufgaben zu faktorisieren, also in Teile zu gliedern zu denen Lösungen auffindbar sind. Gedanklich können sich bereits während der Lösungssuche vermeintlich günstige Kombinationen ergeben haben. Um auch hier die intuitive Arbeitsweise mit diskursiven Methoden zu stützen, haben sich spezielle Methoden zur Synthese der Teillösungen entwickelt. Problematisch kann sich die Kombination hinsichtlich der Verträglichkeit der einzelnen Elemente zeigen. Geometrische und stoffliche Merkmale müssen verträglich sein und der Energie-, Stoff- und Signalfloss muss störungsfrei ablaufen. Mit Anwendung der Lösungskombinatorik ergibt sich oftmals eine große Anzahl theoretischer Möglichkeiten. Die Auswahl technisch und wirtschaftlich vertretbarer Varianten erfolgt mittels Auswahl- und Bewertungsverfahren. [10, S.156ff]

#### Systematische Kombination

Ordnungsschemata erleichtern die Kombination erheblich. Als besonders hilfreich hat sich dabei der morphologische Kasten herausgestellt, siehe Abbildung 2-11.

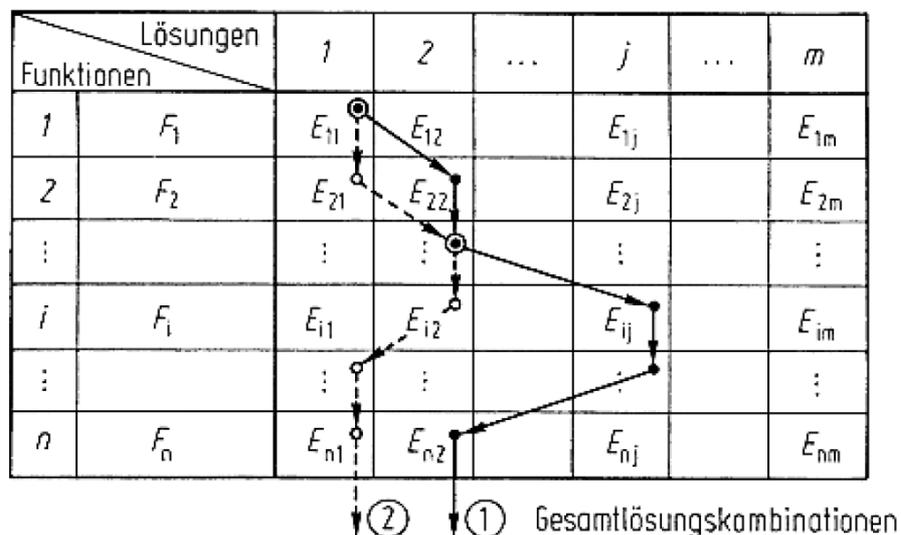


Abb. 2-11 Kombination anhand des morphologischen Kastens [10, S.159ff]

In den Zeilen werden Teilfunktionen und dazugehörige Lösungen eingetragen. Aus der Kombination von jeweils einer Lösung aus einer Zeile mit Lösungen der anderen Funktionen ergibt sich die Gesamtlösung. Werden beispielsweise Wirkprinzipien als Lösungen eingetragen, entspricht die Gesamtlösung einer Prinzipkombination. Die Anzahl möglicher Kombinationsvarianten ergibt sich aus dem Zusammenhang

$$N := m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot \dots \cdot m_n = \prod_{i=1}^n m_i \quad (2-1)$$

Das Feld theoretisch möglicher Kombinationen wird dabei durch die vorgegebene Verträglichkeit der verschiedenen Teillösungen beschränkt. Das Erkennen der Verträglichkeiten lässt sich durch kleine Kunstgriffe erleichtern. So sollte die Reihenfolge der Teilfunktionen in der Kopfspalte jener aus der Funktionsstruktur entsprechen, wobei die Lösungen in den darunterliegenden Spalten durch zusätzliche Spaltenparameter geordnet werden können. Einfache Prinzipskizzen und Merkmale in den Lösungskästchen fördern die Übersichtlichkeit. Der morphologische Kasten ist auf alle Phasen des Konstruktionsprozesses anwendbar und stellt somit ein wichtiges Werkzeug dar. Folgende Richtlinien erleichtern die Arbeit mit dem Schema: [10, S.159ff]

- Verträglichkeiten prüfen und nur Varianten verfolgen, die der Anforderungsliste entsprechen und zulässigen Aufwand mit sich bringen.
- Vielversprechende Kombinationen verfolgen und mit anderen vergleichen.

Die Lösungskombination kann auch mit Hilfe mathematischer Methoden geschehen. Hierfür müssen aber quantitative Daten vorliegen, was bei dem niedrigen Konkretisierungsgrad in der Konzeptphase selten der Fall ist. [10, S.159ff]

## 2.5 Methoden der Auswahl und Bewertung

Durch die Lösungskombination ergibt sich meist eine große Zahl theoretisch denkbarer Lösungen. Man sollte daher danach trachten, die Zahl praktisch und wirtschaftlich unzulänglicher Kombinationen möglichst früh einzuschränken. Die Gefahr, geeignete Wirkprinzipien oder Lösungen zu übersehen, ist vorhanden, kann aber durch passende Auswahlverfahren reduziert werden. Durch diese Methoden werden ungeeignete Kombinationen oder Lösungen ausgeschlossen und offenbar Bessere bevorzugt. Die weitaus umfangreicheren Bewertungsmethoden werden ebenso besprochen. Sie dienen der Beurteilung technischer sowie nichttechnischer Systeme und können in allen Phasen des Konstruktionsprozesses eingesetzt werden. [10, S.162ff]

2.5.1 Auswahlverfahren

Hierzu zählt die Auswahlliste, welche eine gute Dokumentation für das Ausscheiden diverser Lösungen an Hand einfacher Kriterien bietet. Lösungen die ein Auswahlverfahren passieren und damit

- die Anforderungen gemäß Lastenheft erfüllen,
- zulässigen Aufwand und generelle Realisierungsmöglichkeit erwarten lassen,
- mit der Aufgabe verträglich sind,

werden weiter konkretisiert und schließlich einer Bewertung unterzogen.

Abbildung 2-12 zeigt eine derartige Auswahlliste. [10, S.162ff]

TH Darmstadt MuK		AUSWAHLLISTE für Geber für Tankinhaltsmeßgerät							Blatt: 1 Seite:		
Lösungsvariante (Lv) eintragen:	Lösungsvarianten (Lv) nach <b>AUSWAHLKRITERIEN</b> beurteilen : (+) ja (-) nein (?) Informationsmangel (!) Anforderungsliste überprüfen							<b>ENTSCHEIDEN</b> Lösungsvarianten (Lv) kennzeichnen : (+) Lösung weiter verfolgen (-) Lösung scheidet aus (?) Information beschaffen (Lösung erneut beurteilen) (!) Anforderungsliste auf Änderung prüfen			
	Verträglichkeit gegeben							Entscheidung			
	Forderungen der Anforderungsliste erfüllt										
	Grundsätzlich realisierbar										
	Aufwand zulässig										
	Unmittelbare Sicherheitstechnik gegeben										
	Im eigenen Bereich bevorzugt										
	Bemerkungen (Hinweise, Begründungen)										
	Lv	A	B	C	D	E	F		G		
	1	1	+	+	+	?				Anzahl der Meßstellen	
2	2	+	-						Unterbringung der Hasse		
3	3	-						Radioaktivität			

Abb. 2-12 Auswahlliste [10, S.163]

Es werden die Lösungsvarianten, Kriterien und Entscheidungen eingetragen. Die Auswahlkriterien sind meist mit Ja-Nein-Entscheidungen zu beantworten, wobei eine quantitative Untersuchung notwendig sein kann. Wird auf Grund eines voranstehenden Kriteriums ausgeschlossen, werden die nachstehenden nicht weiter verfolgt bzw. beurteilt. Vorerst werden nur jene Lösungsvarianten weiterverfolgt, die alle Kriterien erfüllen. Es wird ersichtlich, dass die Anordnung der Kriterien daher eine wichtige Rolle erfüllt. [10, S.162ff]

Ist die Anzahl möglicher Lösungen zu gering, ist ein Auswahlverfahren nicht zwingend notwendig. Bei großer Anzahl von Lösungen kann es aber eine Zeitersparnis in Bezug auf die wesentlich aufwendigeren Bewertungsmethoden bringen. Diese sind ohnehin im weiteren Voranschreiten des Konstruktionsprozesses vorzunehmen.

## 2.5.2 Bewertungsverfahren

Diese werden nach Abschluss von bedeutenden Arbeitsschritten angewandt, um die Wertigkeit der Lösungen abzuwägen. Durch die Wahl und Anwendung entsprechend quantifizierbarer Bewertungskriterien kann eine Beurteilung nach technischen, wirtschaftlichen und sonstig interessanten Kriterien erfolgen. So können grundlegende Entscheidungen am Ende einer Phase im Konstruktionsprozess fundiert getroffen und dokumentiert werden. Die Bewertung soll sämtliche Einflüsse und Eigenschaften, welche die Wertigkeit oder auch den Nutzen der einzelnen Lösung ausmacht, im richtigen Verhältnis berücksichtigen. Es darf zu keiner Überbewertung von Teilaspekten kommen. Die Methode muss im Stande sein, auch qualitative Merkmale darzustellen, um dem niedrigen Informationsstand in frühen Phasen gerecht zu werden und auch hier ein aussagesicheres Bewertungsergebnis zu gewährleisten.

[10, S.166ff]

### 1. Die Bewertungskriterien

Aus den Forderungen gemäß der Anforderungsliste lassen sich neben der Funktionsstruktur auch Zielvorstellungen gewinnen, welche in einem Zielsystem festgehalten werden. Die Ziele können hinsichtlich ihres Inhaltes, aber auch in ihrer Bedeutung, variieren und sollten folgenden Forderungen genügen: [10, S.166ff]

- Umfassendes Verständnis der Anforderungen um Ziele ganzheitlich zu erfassen;
- Unabhängigkeit der Ziele untereinander;
- Der Grad in dem ein System dem Ziel genügt, soll mit vertretbarem Aufwand zumindest qualitativ erfassbar sein.

Aus den Zielen höchster Stufe des Zielsystems folgen direkt die Bewertungskriterien. In Abbildung 2-13 ist ein solches Zielsystem dargestellt. Die Abszisse enthält unterschiedliche Zielbereiche, beispielsweise getrennt nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Eine weitere Trennung könnte nach der Bedeutung erfolgen, also nach Haupt- und Nebenzielen. Auf der Ordinate finden sich hierarchisch gelistete Zielstufen deren Komplexität mit steigender Verzweigung abnimmt. Ziele einer Stufe sollten nicht miteinander verbunden sein, um die geforderte Unabhängigkeit zu gewährleisten. [10, S.166ff]

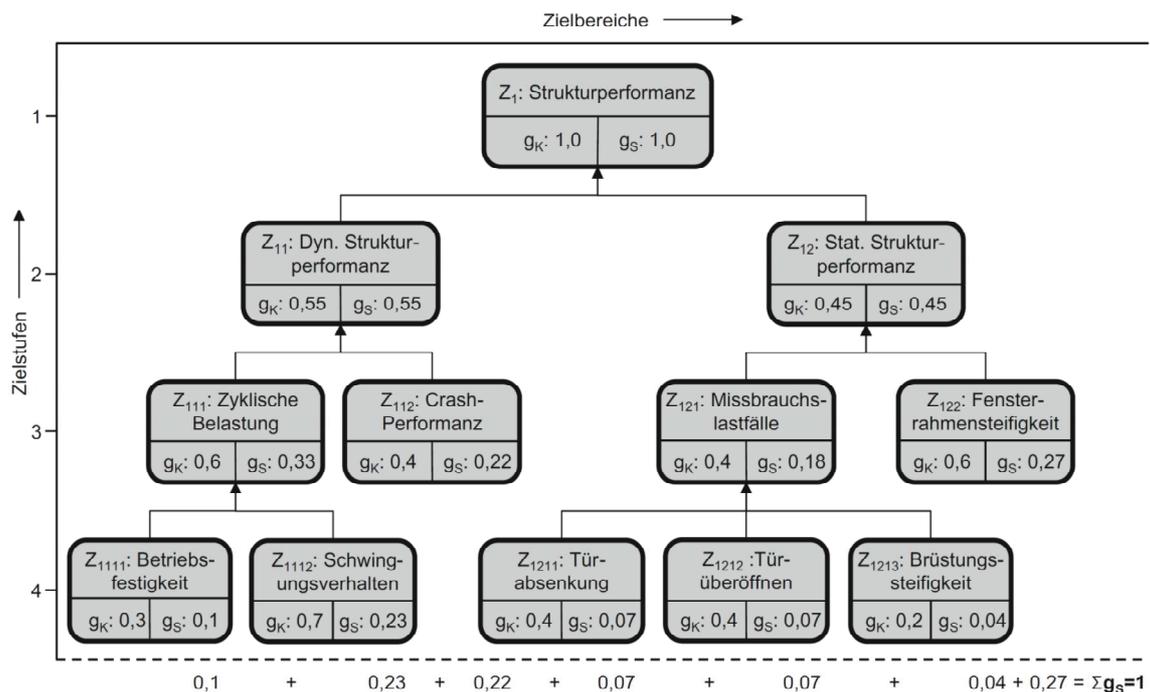


Abb. 2-13 Zielsystem [11, S.391]

## 2. Gewichtung der Bewertungskriterien

Um den Einfluss, also das Gewicht des Kriteriums für den Gesamtwert der Lösung zu eruiieren, werden Gewichtungsfaktoren ermittelt. Abbildung 2-12 soll die Erstellung dieser Faktoren aufzeigen. Sie beginnt bei der niedrigsten Zielstufe, wo Knotengewichtung  $g_{ki}$  und Stufengewichtung  $g_{si}$  nach Definition Eins gesetzt werden. Die Summe der Knotengewichtungen  $g_{ki}$  von höheren Stufen muss, in Bezug auf das darunterliegende Ziel, wiederum Eins ergeben. Die Stufengewichtungen  $g_{si}$  ergeben aus der Multiplikation der jeweiligen Knotengewichtung mit den Knotengewichtungen der niedrigeren Stufen. Die Quersumme von Stufengewichtungen  $g_{si}$  über eine gesamte Zeile muss auch Eins ergeben. Zum Beispiel: Das Ziel  $Z_{112}$  hat in Bezug auf das übergeordnete Ziel  $Z_{11}$  die Knotengewichtung 0,4. Die "restliche" Knotengewichtung von 0,6 fällt damit dem Ziel  $Z_{111}$  zu. Die Stufengewichtung von  $Z_{112}$  ergibt sich daher zu  $0,4 * 0,55 * 1,0 = 0,22$ . Dieses Verfahren erlaubt sowohl Gewichtung der Ziele gegenüber Zielen aus anderen Stufen, als auch Gewichtung der Ziele untereinander. [11, S.391ff]

## 3. Eigenschaftsgrößen und Wertvorstellungen

Um eine Bewertung erst zu erlauben, müssen den Bewertungskriterien sogenannte Eigenschaftsgrößen, diese können Zahlenwerte oder verbale Formulierungen sein, zugeordnet werden. In Abbildung 2-14 sind solche Eigenschaftsgrößen dargestellt. Beispielsweise könnte einem hypothetischen Bewertungskriterium "leichte Bauart" als Eigenschaftsgröße "Leis-

tungsgewicht" dienen. Die möglichen Leistungsgewichte der Lösungsvarianten lassen sich als Zahlenwerte darstellen und können somit tabelliert werden. Zur Verdeutlichung verbaler Beschreibung dient die Spalte der Eigenschaftsgröße "Einfachheit der Gussteile", welche von einem Bewertungskriterium "einfache Fertigung" stammt. [10, S.170ff] Die Bewertungskriterien "Betriebsfestigkeit" und "Schwingungsfestigkeit" mit den zugeordneten Eigenschaftsgrößen "Ertragbare Lastspiele" und "Erste Eigenfrequenz" entsprechen den Zielen  $Z_{1111}$  bzw.  $Z_{1112}$  aus Abbildung 2-13.

Bewertungskriterium				
Eigenschaftsgrößen				
Werteskala	Leistungsgewicht	Einfachheit der Gussteile	Ertragbare Lastspiele	Erste Eigenfrequenz
Punkte $w_i$ [-]	[kg/kW]		[-]	[Hz]
0	3,5	extrem	10.000	88,0
1	3,3	kompliziert	100.000	100,0
2	3,1		200.000	120,0
3	2,9	mittel	300.000	125,0
4	2,7		400.000	128,0
5	2,5	einfach	500.000	135,0
6	2,3		600.000	140,0
7	2,1	extrem einfach	700.000	148,0
8	1,9		800.000	158,0
9	1,7		900.000	170,0
10	1,5		1.000.000	200,0

Abb. 2-14 Eigenschaftsgrößen und Wertvorstellungen

Nun folgt der eigentliche Schritt der Bewertung, die Beurteilung nach Wertvorstellungen in der Werteskala. Man spricht von einem Subjektivschritt, da die Punktevergabe stark von der jeweiligen Person abhängt, welche die Beurteilung durchführt. Die Nutzwertanalyse empfiehlt eine Skala von  $w_i = 0$  Punkten für eine unbrauchbare Lösung, bis hin zu  $w_i = 10$  Punkten für die ideale Lösung mit entsprechenden Abstufungen dazwischen. Die Wertfunktion gibt den Zusammenhang zwischen Anzahl der Punkte  $w_i$  und der Eigenschaftsgröße wieder, wobei der Verlauf meist angenommen wird. Im Falle von Abbil-

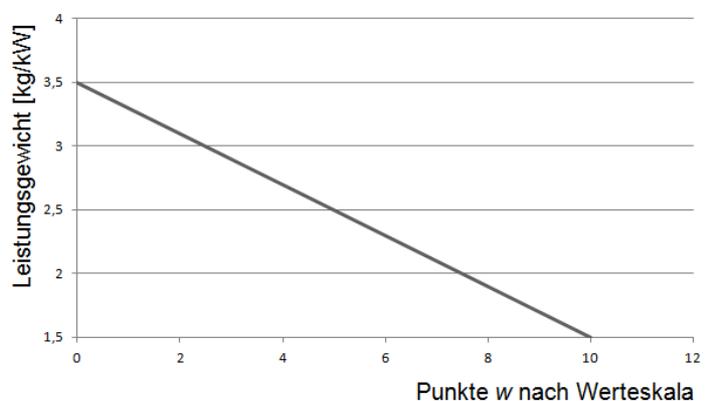


Abb. 2-15 Wertfunktion

dung 2-15 ist die Darstellung dieser Funktion in einfacher linearer Form möglich. Die Wertefunktion setzt sich hierbei aus dem Leistungsgewicht über der Punkteskala mit Zahlen aus Abbildung 2-14 zusammen. Nicht immer ist eine derart exakte Zuordnung der Eigenschaftsgrößen zu den Wertvorstellungen möglich und darüber hinaus können die Funktionen beliebige Gestalt annehmen. [10, S.170ff]

#### 4. Wert einer Lösungsvariante

Mit der Stufengewichtung  $g_{si}$  und den Punktevergaben nach der Wertskala  $w_i$  liegen nun zur Bewertung einer Lösung bereits zwei wichtige Kennzahlen vor. Der gewichtete Gesamtwert

$$G_w := \sum_{i=1}^n (g_{si} \cdot w_i) \quad (2-2)$$

einer Lösung ergibt sich durch Summieren der Produkte aus Stufengewichtung der einzelnen Bewertungskriterien bzw. Zielen  $g_{si}$  mit den zugehörigen Werten  $w_i$ . [10, S.174ff] Durch den Gesamtwert  $G_w$  einer jeden Lösungsvariante sind diese relativ miteinander vergleichbar. Für eine Aussage über die absolute Wertigkeit der Lösung ist ein Vergleich mit der Ideallösung

$$G_{wa} := \frac{\sum_{i=1}^n (g_{si} \cdot w_i)}{w_{max} \cdot \sum_{i=1}^n g_{si}} \quad (2-3)$$

erforderlich. [10, S.174ff]

### 3 Umfeld und Rahmenbereich

Die folgenden Abschnitte des Kapitels 3 stellen eine Einführung zur Thematik der biogenen Brennstoffe und zugehörigen Technologien dar. Dies wird der eigentlichen Konzeptphase vorangestellt und bildet einen Kontext zu technischen Anwendungen.

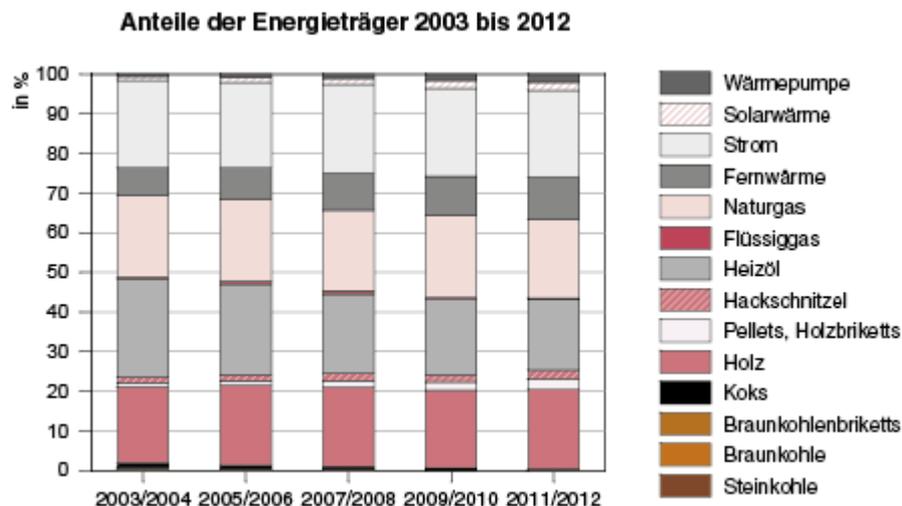
#### 3.1 Allgemeines zum Schüttgut

##### 3.1.1 Biogene Brennstoffe

Der Begriff Biomasse umfasst alle organischen, also auf Kohlenstoff basierenden, Substanzen in einem Lebensraum. Der zur energetischen Nutzung verwendbare Anteil dieser Substanzen wird als biogener Brennstoff bezeichnet. Die Energiebereitstellung aus regenerativen Energieträgern, allen voran aus biogenen Brennstoffen, nimmt stark in ihrer Bedeutung zu. [3, S.16ff] Fossile Brennstoffe sind, gemessen am menschlichen Zeithorizont, kaum als regenerativ zu betrachten und grenzen sich somit von der Biomasse bzw. den biogenen Brennstoffen ab. Über 75% der weltweit bereitgestellten regenerativen Energie ist auf die Umwandlung aus Biomasse zurückzuführen. Volatilität und politisch bedingte Schwankungen in der Versorgungssicherheit bezüglich fossiler Brennstoffe sind mit die Gründe zur ständigen Zunahme der erneuerbaren Energieträger. Nicht zuletzt die Notwendigkeit des ressourcenschonenden Umgangs mit den althergebrachten Brennstoffen wie Gas, Kohle und Öl lässt auf ein generelles Umdenken in der Energiebereitstellung hoffen. [3, S.2] Zusätzlichen Anreiz bilden eine stabile Preisentwicklung und das umweltschonende Image der Biomasse. Zur Herstellung von Pellets sind biogene Festbrennstoffe von Interesse, welche sich wie folgt kategorisieren lassen: [3, S.16ff]

- Holzartige Biomasse z.B.: Stammholz oder Industrierestholz
- Halmartige Biomasse z.B.: Blumen, Gräser und Getreide
- Biomasse von Früchten z.B.: Olivenpresskuchen

Gegenüber Scheitholz, als klassischen biogenen Festbrennstoff, haben Pellets und Hack-schnitzel den Vorteil, in automatisierten Feuerungsanlagen einsetzbar zu sein. Holzpellets werden neben der Verbrennung in Einzelfeuerstätten und Zentralheizungen auch zur Zu-feuerung in Großanlagen, beispielsweise Kohlekraftwerken, verwendet.



Q: STATISTIK AUSTRIA, Energiestatistik, MZ Energieeinsatz der Haushalte. Erstellt am 28.06.2013.

**Abb. 3-1 Energieträger [14]**

Abbildung 3-1 zeigt die Anteile verschiedener Energieträger am Gesamtenergieeinsatz der Haushalte, wobei eine stete Zunahme des Pelletkontingentes zu erkennen ist. In den Jahren 2007/2008 wurde in den Listen der Statistik Austria erstmals zwischen Pellets und Holzbriketts unterschieden. Damals lag der Anteil bei rund 170 000t Pellets, die zur Energieerzeugung in Österreichs Haushalten verwendet wurden. 2011/2012 betrug der Anteil bereits rund 300 000t Pellets. [14]

Die Bezeichnung Pellets stammt aus dem Herstellungsverfahren, der Pelletierung. Material, welches diesen Prozess durchlaufen hat, zeichnet sich durch

- erhöhte Dichte und gute Homogenität
- reduzierte Staubbildung bei Umschlag- und Transportprozessen
- günstige Fließ- und Dosiereigenschaften

aus und ermöglicht einen vergleichsweise leichteren Umgang als z.B. sperriges Scheitholz. Beim Pressen unter Hilfsmittelzugabe in einer Lochmatrize erhalten die Presslinge ihre runde Form, siehe Abbildung 3-2. Die Pelletierung in Kollergangpressen ist häufig anzutreffen und zeichnet sich durch mehrere drehbare Kollerrollen, welche auf gekreuzten Achsen montiert sind, aus. Diese Achsen haben eine vertikale Drehachse in der Mitte über die der Antrieb erfolgt. Beim Überrollen durch die Koller wird die, von oben aufgebene, Biomasse in die Bohrungen der Matrize gepresst. Ein Abschermesser am Ende der Presskanalbohrung erlaubt die Erzeugung verschiedener Längen. [5, S.271ff] Die verwendeten Zugaben erhöhen die Abriebfestigkeit und/oder können auch als Bindemittel dienen. Normen begrenzen die

erlaubte Menge an Presshilfsmitteln und geben Grenzwerte für Bestandteile wie Wasser und Schwefel an. So zeigen sich Pellets als einheitlicher Brennstoff mit konstanter Qualität. [12]

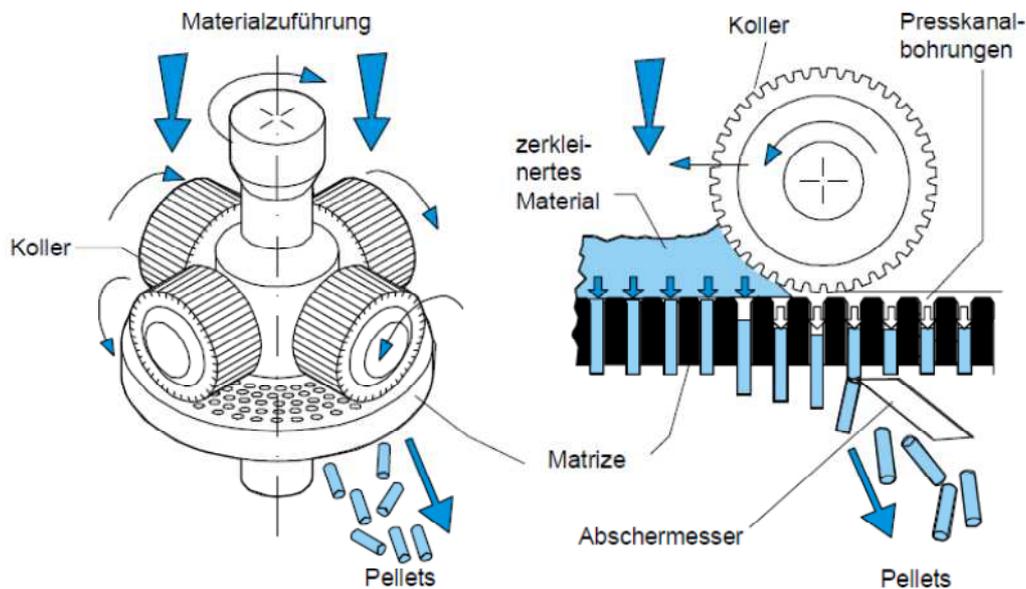


Abb. 3-2 Kollergangpresse [5, S.272]

Nach Auslieferung werden die Pellets in verschiedenst gestalteten Behältern gelagert und mittels Austragungen zur Feuerung befördert.

### 3.1.2 Eigenschaften von Holzpellets

Pellets gehören zur Gruppe der Schüttgüter, bestehen überwiegend aus verschiedenen Hölzern und weisen eine Schüttgutedichte  $\rho_b$  von rund  $650 \text{ kg/m}^3$  auf. Dieser Wert liegt bereits in der unteren Schwankungsbreite der Schüttgutedichte von Braunkohle [3, S.45]. Die Feststoffdichte  $\rho_s$  kann durch das Pelletieren gegenüber dem Ausgangsmaterial von rund  $400 - 1000 \text{ kg/m}^3$  auf etwa  $1120 \text{ kg/m}^3$  erhöht werden. [12] Nach Umformung von

$$\rho_b := (1 - \varepsilon) \cdot \rho_s + \varepsilon \cdot \rho_f \quad (3-1)$$

ergibt sich daraus eine Porosität  $\varepsilon$  von 0.42, die Dichte der Luft in den Zwischen- und Hohlräumen  $\rho_f$  wurde hierbei mit  $1.2 \text{ kg/m}^3$  angenommen. Nach

$$\varepsilon := \frac{(V_{\text{Zwischenräume}} - V_{\text{Innere Hohlräume}})}{V} \quad (3-2)$$

bedeutet dies einen Luftanteil von 42% innerhalb des Schüttgutes. Dies umfasst sowohl Räume zwischen Pellets, als auch Hohlräume innerhalb der Pellets. Die Variable  $V$  kennzeichnet das Volumen des verwendeten Messbehälters. [13, S.20] Als weitere Schüttgutei-

genschaften seien die Zeitverfestigung, sowie Wandreibung erwähnt. Erstere tritt bei manchen Schüttgütern auf Grund erhöhter Haftkräfte nach längerer Lagerung auf, was ein Verklumpen und reduzierte Porosität mit sich bringt. Dieser Effekt wird durch Bewegung der Partikel gegeneinander wieder aufgehoben bzw. rückgängig gemacht. [13, S.38] Die Kenntnis der Wandreibung ist beispielsweise zur Auslegung eines Silos von Nöten. So lässt sich bestimmen, ob das Gut entlang einer Wandung in Bewegung gerät oder nicht. [13, S.71] Nach Ö-Norm M7135 beträgt der untere Heizwert  $H_u$  von Holzpellets  $18 \text{ MJ/kg}$  [12]. Fossile Brennstoffe weisen erheblich höhere Werte auf, die rund das Doppelte betragen können.

Um Lager- und Austragungssysteme richtig auszulegen, ist die Kenntnis der besprochenen Schüttguteigenschaften von Vorteil. Diese werden in Versuchen ermittelt und tragen im Zuge der Lösungssuche wesentlich zur Gestaltung des technischen Gebildes bei. [13, S.1ff]

### 3.1.3 Anwendung von Holzpellets

Feuerungsanlagen für Holzpellets können nach untenstehenden Kriterien unterschieden werden, wobei, zur Aufgabenstellung der Diplomarbeit passend, ersterer Leistungsbereich weiter betrachtet wird.

- kleiner Leistungsbereich  $5 - 200 \text{ kW}$
- mittlerer Leistungsbereich  $200 - 5000 \text{ kW}$
- großer Leistungsbereich über  $5000 \text{ kW}$

In mittleren und großen Anlagen werden zur Lagerung der Pellets vorwiegend Silos verwendet, wohingegen in den kleineren Leistungsbereichen verschiedenste Ausführungen möglich sind. Diese müssen den Anforderungen von Pelletlieferanten, der Schnittstelle zum Heizkessel und den Eigenschaften der Pellets genügen. Die pneumatische Befüllung des Lagers durch ein Silofahrzeug ist üblich, dabei sollte die bautechnische Gestaltung der Befüllleitung im Lager ein Ansteigen des Feinanteils verhindern. Dieser kann durch erhöhten Abrieb in Rohrbögen, an zu rauher Rohrwand oder den Aufprall an Kanten entstehen. Nicht zuletzt der steigende Druckverlust legt nahe, pneumatische Transportwege kurz zu halten. Um das Brechen der Pellets zu verhindern, werden in Einblasrichtung Prallmatten montiert. Diese nehmen die kinetische Energie der Partikel auf, worauf diese zu Boden fallen. Durch die Hygroskopie des Brennstoffs ist dieser mittels baulicher Maßnahmen entsprechend vor Feuchte zu schützen. Typische Lager, die für Feuerungsanlagen des kleinen Leistungsbereiches dimensioniert wurden, fassen das 1- bis 1.5-fache des Brennstoffbedarfs für ein Jahr. Ein durchschnittliches Einfamilienhaus älteren Baujahres mit einem Wärmebedarf von rund

30 000 kWh/a verfeuert jährlich an die 6000 kg Pellets. Dies stellt lediglich einen Richtwert dar, der je nach Bausubstanz und thermischen Sanierungsmaßnahmen bzw. geänderten Wärmebedarf schwanken kann. [3, S.158ff]

Aus der Verfahrenstechnik sind unzählige Mittel bekannt, um Schüttgüter zu lagern, zu transportieren und zu dosieren. Basierend auf den Technologien der Fördersysteme werden im Folgenden gängige Varianten der Pelletaustragen erläutert.

### 3.2 Bekannte Systeme zum Austrag von Schüttgut

Austraggeräte, auch als Fördergeräte bezeichnet, dienen einer kontrollierten Entnahme von Schüttgut aus einem Lager oder Behälter. Zugehörige Vertreter wie Schneckenförderer, Schwingrinne und Zellenradschleuse erlauben den Austrag des Gutes wohingegen Austraghilfen den Schüttgutfluss im Behälter durch Energieeintrag verbessern sollen. [13, S.347ff]

#### 3.2.1 Austraghilfen

Diese Geräte werden gemäß ihrer Funktionsprinzipien als mechanische und pneumatische Varianten eingesetzt. Die Eigenschaften des Schüttgutes bestimmen maßgeblich über das zu verwendende System. In Abbildung 3-3 ist das Beispiel einer Belüftungspfeife als pneumatische Austraghilfe dargestellt, die sich an der Innenseite einer Behälterwandung befindet und kontinuierlich Luft mit geringer Geschwindigkeit einbläst. Das Gasgemisch strömt annähernd parallel zur Wand und soll damit einen großen Bereich aktivieren. An der Pfeife entsteht örtlich Überdruck, so stellt sich eine Gasströmung in Richtung niedrigeren Druckniveaus, etwa einer Abflussöffnung mit dort herrschendem Umgebungsdruck, ein.

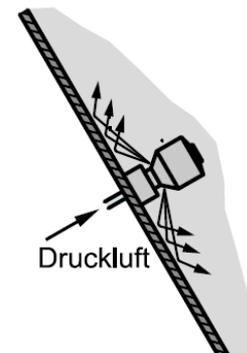
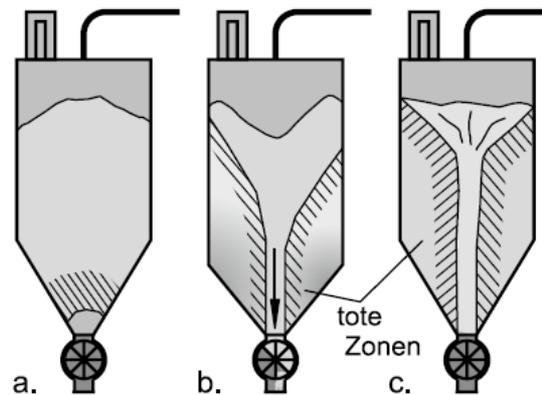


Abb. 3-3 Belüftungspfeife [13, S.356]

Der Fluidstrom reduziert die Wandreibung des Schüttguts und unterstützt dessen Fluss zur Austragöffnung hin. Daneben besteht auch die Möglichkeit, die Luft stoßartig über sogenannte Luftkanonen einzubringen. Dies bewährt sich auf Grund der reduzierten Durchströmungswiderstände vor allem bei gröberen Gütern. Das allmähliche Einblasen durch eine Belüftungspfeife wäre hier nutzlos. [13, S.355ff]

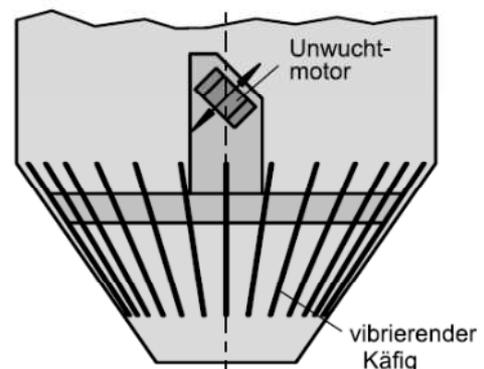
Die vorgestellten Systeme dienen neben der kontrollierbaren Entnahme auch der Zerstörung von Schüttgutbrücken, siehe Abbildung 3-4 a. Dieses Phänomen beschreibt die Ausbildung eines stabilen Gewölbes oberhalb der Auslassöffnung, das zur Blockade und dem vollständigen Erliegen des Auslaufmassenstroms führt. Ein weiteres Problem beim Gutabzug kann der sogenannte Kernfluss nach Abbildung 3-4 b-c darstellen. Durch unzureichende

Neigung und/oder zu große Rauigkeit der Wandungen bilden sich tote Zonen aus. Das Material kann dort nicht entlang des Silos nach unten fließen und es kommt zur Entwicklung eines zentralen Schachtes. Die Verweilzeiten des Gutes haben dann eine große Verteilung und in den toten Zonen kann es zur Zeitverfestigung kommen. Grundsätzlich haben alle Belüftungselemente begrenzte Reichweite und steigender Luftbedarf ist eine Frage der wirtschaftlichen Bereitstellung. [13, S.1ff] Abhilfe bei problematischer Entleerung schaffen neben pneumatischen auch mechanische Austraghilfen nach Abbildung 3-5. Die Herbeiführung einer Unwucht regt die Behälterwände zum Schwingen an.



**Abb. 3-4 a-c Brückenbildung und Kernfluss**  
[13, S.3]

Durch Vibrationen der Wandungen oder eigens eingesetzter Käfige wird die Wandreibung reduziert und das Nachfließen von Schüttgut erleichtert. Die Wirkung solcher Klopper oder Rüttler ist von der Silostruktur und natürlich dem Schüttgut abhängig. Die Anwendung empfiehlt sich vor allem bei dünnwandigen Silos mit schwingfähigem Aufbau. Die rudimentärsten Austraghilfen sind Stöcherlöcher, durch die Brücken und Schächte mittels Lanzen zerstört werden. Oftmals finden sich an Behälterwandungen auch Spuren von Hammerschlägen, ein Indiz für problematischen Schüttgutaustrag. [13, S.355ff] Der Einsatz von Austraghilfen



**Abb. 3-5 Mechanische Austraghilfe**  
[13, S.359]

ist auch mit Nachteilen verbunden. So kann unsachgemäße Verwendung eine weitere Verfestigung des Gutes mit sich bringen oder einstürzende Brücken eine Gefährdung der Behälterstabilität bedeuten. Richtig dimensionierte Austraghilfen vermögen allerdings die Größe des Austraggerätes zu reduzieren. [13, S.355ff]

### 3.2.2 Austraggeräte

Aus der Vielzahl verschiedener Verfahrenstechniken sollen jene herausgegriffen werden, die sich bei Umschlag und Manipulation von Pellets bewährt haben. Abhängig von der zugrundeliegenden Literatur finden sich Angaben zum Massen- oder Volumenstrom des jeweiligen Austraggerätes. Zur Vereinheitlichung wird, unter der Annahme einer Schüttgutdichte  $\rho_b$  von  $650 \text{ kg/m}^3$ , der jeweilig zugehörige Vergleichswert in Klammern angegeben.

### 1. Schneckenförderer

Sie zählen zur Gruppe der Stetigförderanlagen ohne Zugmittel deren Charakteristikum ein kontinuierlicher Massenstrom ist. Innerhalb eines Troges rotiert die Schneckenwelle mit der drehfest verbundenen Schneckenwendel, siehe Abbildung 3-6. Je nach Anforderung sind auch biegsame Schnecken erhältlich oder solche, die ohne innenliegende Welle auskommen. Die Gutauf- und -abgabe kann an beliebiger Stelle entlang des Troges erfolgen, wobei vorderrangig feine und staubförmige Massen wie Mais, Sand und Staub transportiert werden, was in nahezu beliebiger Einbaulage der Schnecke möglich ist. Bei Verzicht auf hohe Fördermengen ist auch vertikaler Einsatz möglich. Dies setzt aber hohe Drehzahlen voraus, da die notwendige Reibung an Wendel und Trogwandung nur durch Fliehkräfte induziert werden kann [8, S.242ff]. Die Schüttgutpartikel werden durch die Förderung in einem Schneckenförderer stark beansprucht, weshalb verschleißempfindliche Güter nicht gefördert werden sollten. Bei Verwendung eines innengekühlten Rohres, anstatt der Welle, ist der Transport heißer Schüttgüter bis 800°C möglich. [13, S.361ff]

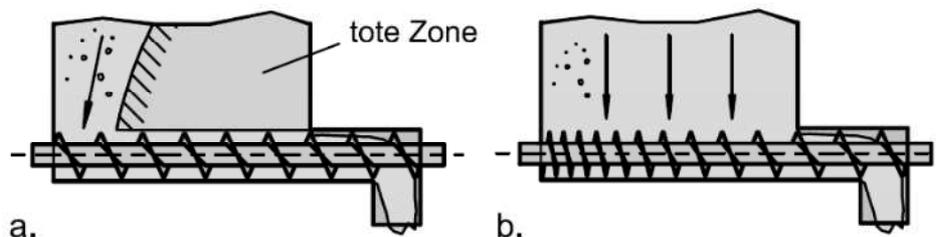


Abb. 3-6 a, b Schneckenförderer [13, S.364]

Abbildung 3-6 zeigt eine der möglichen Komplikationen im Einsatz von Schneckenförderern. Dabei wird das Fördergut nur partiell entlang der Austragöffnung abgezogen, unter der toten Zone bildet sich wiederum der anfangs erwähnte Kernfluss aus. Dem liegt als Ursache zu Grunde, dass sich die Schnecke bereits am Anfang des Troges mit Material füllt und dieses unter dem Schüttgut im vorderen Bereich durchfördert. Abhilfe kann eine Schneckenform, wie in Abbildung 3-6 b gezeigt, schaffen. Ungleiche Steigung und Abstand der Wendelgänge lassen ein Anwachsen des Massenstroms entlang der Förderrichtung zu. Ein derart gestaltetes System vermag den Abzug über die gesamte Länge zu bewerkstelligen. Schwierigkeiten können sich auch auf Grund der Fördergutkonsistenz ergeben. Anbackende Medien neigen dazu, die Wendel zu verkleben und drehen somit wirkungslos mit. Dies ist durch eine glatte Oberfläche der Wendel und eine gewisse Rauigkeit des Troges zu verhindern. Die Drehzahl als veränderlicher Parameter definiert neben vorgegebenen Merkmalen, wie der Geometrie, den Durchsatz. Bei zu hoher Drehzahl kann, auf Grund der Fliehkraft, das Material schlecht von oben nachfließen. Übliche Betriebswerte liegen im Bereich von 15 – 100  $U/min$ . Nachteilig zeigt sich die generell hohe Antriebsleistung, welche in Folge der ständigen Rei-

ungsprozesse aufgebracht werden muss. Bei großen Bauformen sind Massenströme im Bereich von rund 100 t/h möglich. Neben reinen Förderaufgaben können Schnecken auch zum genauen Dosieren verwendet werden. [13, S.361ff]

## 2. Zellenradschleuse

Abbildung 3-7 zeigt eine Zellenradschleuse mit horizontaler Achse. Durch die Schwerkraft fällt Schüttgut von oben in die Schleuse und nach ungefähr einer halben Umdrehung gegenüberliegend heraus. Neben der dargestellten Form als Vertikalschleuse, kann auch um eine lotrechte Achse gedreht werden, dies entspricht einer Horizontalschleuse. Mittels Zellrad ist die Schließung von Schüttgut zwischen Räumen unterschiedlichen Druckniveaus bei einer maximalen Differenz von rund 3.5 bar durchführbar. Auf Grund dieser Eigenschaft werden Zellenradschleusen bei der Gestaltung pneumatischer Förderanlagen oder von Heizungskesseln vielfach eingesetzt. Die Leckraten, welche sich aus den Spaltströmen und dem Luftvolumen der leeren Kammern ergeben, sind dabei von vernachlässigbarer Größe. Volumenströme bis zu 1000 m<sup>3</sup>/h (650 t/h) sind bei, im Vergleich zu Schneckenförderern, geringen Antriebsleistungen möglich. Bei Vertikalschleusen geht eine übermäßige Drehzahlerhöhung mit einer Durchsatzreduktion einher. Dies ist einerseits Folge eines verkürzten Eintrittszeitraumes der Masse in das Rad, andererseits wirkt die zunehmende Fliehkraft der für den Eintritt verantwortlichen Schwerkraft entgegen. Im Falle einer Horizontalschleuse entfällt die durchsatzreduzierende Wirkung der Fliehkraft natürlich. [13, S.373ff]

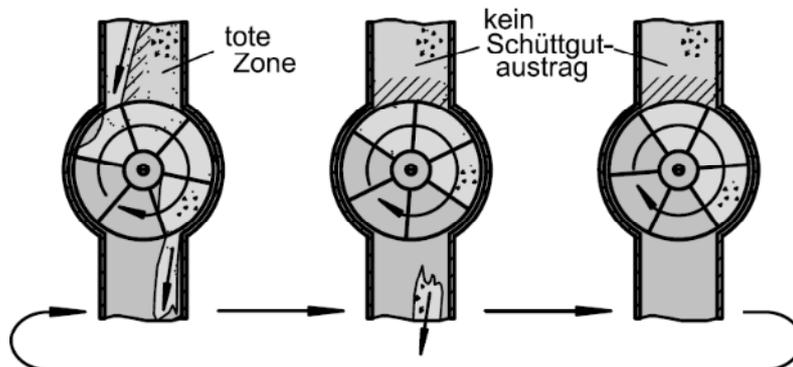


Abb. 3-7 Zellenradschleuse [13, S.374]

Auch hier kann es durch ein, dem Schneckenförderer ähnliches Phänomen, zur Ausbildung toter Zonen in der Austragöffnung kommen, siehe Abbildung 3-7. Die Zellenradkammern füllen sich derart schnell mit Material, dass sich ein Schacht ausbildet, der nur mehr einseitigen Abzug zulässt. Dabei kann es immer wieder kurz zum vollständigen Erliegen des Austrags kommen. Werden gut fließende und harte Materialien geschleust, können mit dem schlagartigen Füllen der Kammern unerwünschte Erschütterungen einhergehen. [13, S.373ff]

### 3. Räumarm

In Abbildung 3-8 a, b ist das Prinzip eines Räumarmaustraggerätes dargestellt. Dicht über dem Behälterboden rotiert ein sichelförmiger Arm, der die Bewegung des Materials hin zu einer zentralen Auslauföffnung erzwingt. Ein darüber angeordneter Kegel verhindert einen ungewollten Materialauslauf und reduziert die auf den Boden wirkenden Vertikalspannungen. Bei üblicherweise sehr kleinen Drehzahlen lassen sich vor allem stark abrasive und schlecht fließende Schüttgüter mit den robusten Armen bewegen. Um der Entstehung wandnaher toter Zonen zu entgegnen, sollte der Arm sehr nahe an der Behälterwand vorbeifahren. Die maximalen Volumenströme können bis zu  $6000 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $3900 \text{ t/h}$ ) betragen. [13, S.379ff]

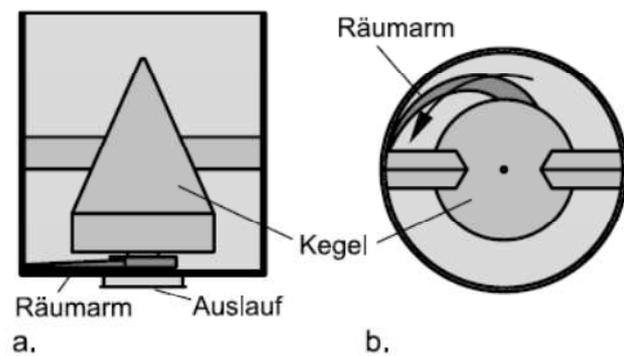


Abb. 3-8 Räumrad in Schnitt und Draufsicht [13, S.380]

### 4. Pneumatische Förderung

In Abbildung 3-9 sind die Betriebsbereiche verschiedener Fördersysteme in einem Diagramm nach Massenstrom  $M_s$  über Förderlänge  $\Delta L$  dargestellt. Neben Werten für Schwingförderer, Aufzüge, Band- und Kettenförderer sowie den bereits besprochenen Schraubenförderern finden sich auch Angaben zur pneumatischen Förderung. Auffällig ist ein sehr großer Einsatzbereich der pneumatischen Förderung, die bei Durchsätzen von rund  $10 \text{ t/h}$  noch  $1000 \text{ m}$  Förderlänge zu überwinden vermag. [1, S.58]

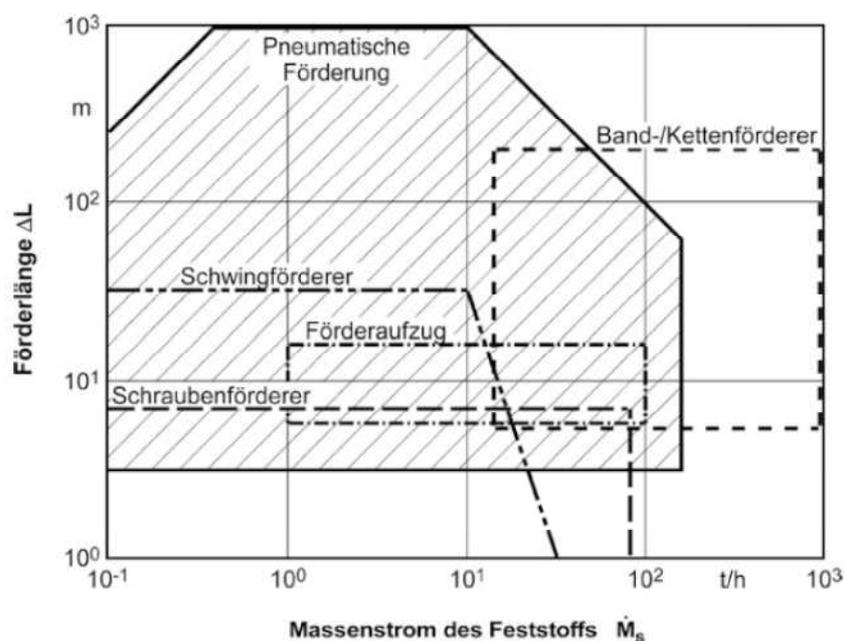
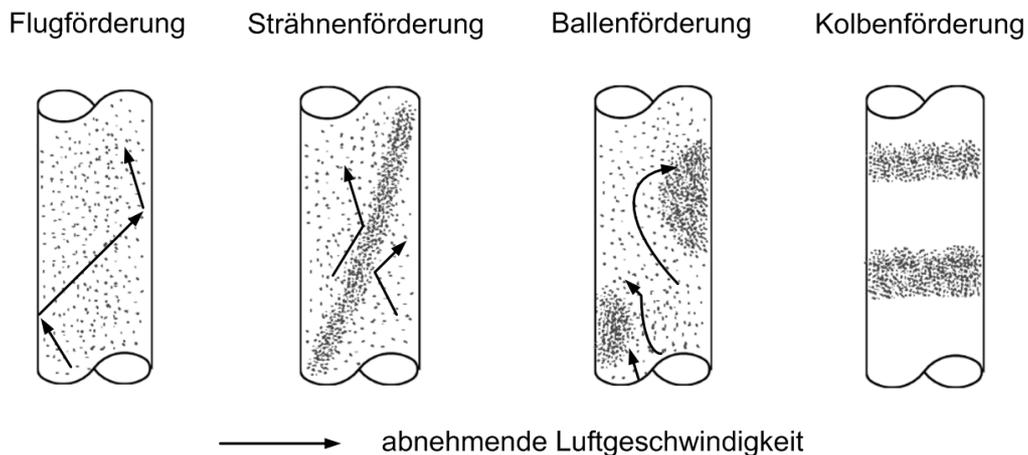


Abb. 3-9 Betriebsbereiche unterschiedlicher Fördersysteme [6, S.506]

Diese Anlagen charakterisieren sich durch den Feststofftransport in geschlossenen Systemen, bei denen das Fördergut durch einen Gasstrom mitgerissen oder geschoben wird. Durch die Kapselung in den üblicherweise verwendeten Rohrleitungen ist ein, nach außen schmutzfreier Transport möglich. Die Verwendung flexibler Rohre und der Einbau von Verzweigungen ergeben hohe Gestaltungsfreiheit und sprechen für die verbreitete Anwendung. Das Verhalten der Strömung bzw. des Feststofftransportes hängt von einer großen Anzahl verschiedener Faktoren ab, hier seien erwähnt: [1, S.58]

- Partikelgröße, Partikelform, Partikelgrößenverteilung;  
Die Förderbarkeit steigt mit sinkender Korngröße und das Verhältnis von angeblasener Fläche zur Masse sollte groß sein. Kugelähnliche Formen der Partikel sind optimal, da sie ein gegenseitiges Verhaken verhindern. Stabähnliche Geometrien weisen bei strömungsparalleler Lager ihrer Längsachse sehr kleine Anblasflächen auf und können somit bewegungslos in ihrer Position verharren. Ist die Größenverteilung gering, lassen sich die Eigenschaften und Strömungsverhältnisse exakt vorhersagen.
- Härte der Partikel;  
Sie lässt Aussagen über die zu erwartende Mehrung des Feinanteils beim Transport und eine Abschätzung zum Verschleiß des Rohrsystems und zugehöriger Einbauten zu.
- Schüttguteigenschaften wie Masse, Hygroskopie etc.



**Abb. 3-10 Förderzustände vertikal aufwärts**

Die Feststoffbeladung  $\mu$  gibt das Verhältnis des Feststoffmassenstroms zum Transportgasmassenstrom an und dient, wie auch die Gasleerrohrgeschwindigkeit  $v_g$ , zur Charakterisierung der Strömung. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass zur Beschreibung der Strömungsverhältnisse üblicherweise noch weitere Geschwindigkeiten

definiert sind. Hierbei ist insbesondere das Verhältnis von Feststoffgeschwindigkeit zu effektiver Gasgeschwindigkeit von Interesse. Die verschiedenen Förderzustände innerhalb einer vertikalen Rohrleitung sind in Abbildung 3-10 nach abnehmender Geschwindigkeit  $v_g$  dargestellt. Im Falle der Flugförderung herrschen mit  $v_g \sim 30 \text{ m/s}$  die höchsten Geschwindigkeiten. Sie dient der Förderung von grobem Gut ( $d > 1 \text{ mm}$ ) und weist eine Feststoffbelastung im Bereich von 1 bis 10 auf. Durch Reduktion der Geschwindigkeit kommt es zur sogenannten Strähnenförderung. Die Strömung entmischt sich derart, dass nur mehr ein Teil der Partikel über eine gleitende Strähne hinwegfliegen. Für Strähnen- und Ballenförderung liegt die Feststoffbelastung  $\mu$  im Bereich von 10 bis 50. Der Übergang zwischen diesen Zuständen ist durch die Stopfgrenze gekennzeichnet und es kann zeitweise zum Verstopfen des gesamten Rohrquerschnittes kommen. Ab diesem Zustand ist bei weiterer Abnahme der Luftgeschwindigkeit mit Feststoffablagerungen zu rechnen. Das Verhalten ist dann sehr instabil und führt schließlich zur Kolben- oder Pfropfförderung. Hierbei werden einzelne Pfropfen bei kleiner Luftgeschwindigkeit  $v_g < 10 \text{ m/s}$  aber hohem Druckverlust befördert. Je nach branchenspezifischen Anforderungen und Schüttgütern kommen die verschiedenen Formen der Förderzustände zur Verwendung. [6, S.506ff]

Neben den dargelegten Förderzuständen besteht die Möglichkeit, Anlagen nach dem Prinzip von Druck- und Saugförderung zu klassifizieren. Unabhängig vom jeweiligen Funktionsprinzip bestehen sie aus gemeinsamen Grundkomponenten, siehe Abbildung 3-11.

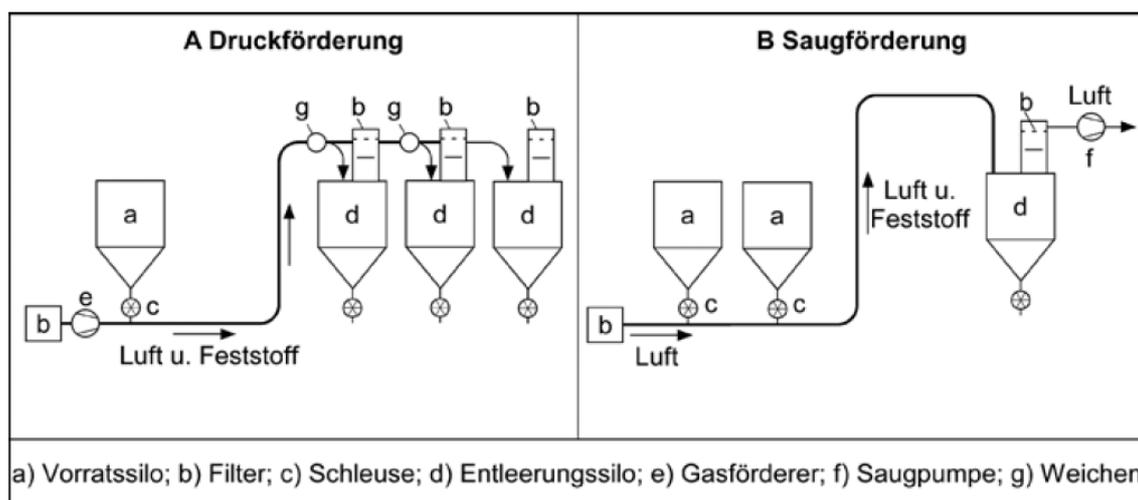


Abb. 3-11 Pneumatische Fördersysteme [6, S.526]

Ein Gasförderer bzw. Saugpumpe dient als Antrieb und bildet mit der Schleuse neben Rohrleitung und Filter die Grundkomponenten. Im Falle der Saugförderung ist eine Zentralschleuse zur Aufgabe mit vorgeschaltetem Filter nicht unbedingt von Nöten, sondern sie können beispielsweise durch eine einfache Saugdüse ersetzt werden [1, S.61]. Druckförderungen

erlauben die Aufteilung eines Massenstromes durch die Verschaltung von Weichen auf verschiedene Behälter, wohingegen Saugförderungen den Abzug aus den einzelnen Silos ermöglichen.

### 3.2.3 Lagerung und Austrag von Holzpellets

Die in Abschnitt 3.2.2 erläuterten Austraggeräte und Fördersysteme finden sich, je nach anwendungsspezifischer Ausprägung gewisser Merkmale, in Systemen zur Lagerung, Austrag und Verfeuerung von Holzpellets wieder. Sie wurden auf Kundenbedürfnisse unter Beachtung der Schüttguteigenschaften zugeschnitten und werden meist in vollautomatischen Anlagen eingesetzt. Wartungsarmut stellt ein Hauptkriterium dar, weshalb sich die verwendeten Systeme durch einen durchwegs einfachen und robusten Aufbau auszeichnen. Mittels der Pelletierung wird ein Produkt gewonnen, das ohne Probleme in den automatischen Ablauf der Zuführung und Dosierung vom Brennstofflager in den Brennkessel eingebunden werden kann. Die dabei verwendeten Technologien sind spezifisch für Holzpellets entwickelt und taugen nur bedingt bei Verwendung anderer biogener Brennstoffe. So existiert zum Beispiel kein Fördersystem, welches die vollautomatische Zuführung von Scheitholz ermöglicht. Ebenso wenig sind derzeit Saugfördersysteme zum Transport von Hackschnitzel im Einsatz. Limitierend wirken hier technische und wirtschaftliche Faktoren. Pneumatische Förderanlagen in Heizsystemen sind generell als Saugfördervariante ausgeführt. Diese Arbeitsweise macht einen Tagesbehälter, der am Kessel montiert ist, notwendig. Dieser Behälter separiert die Pellets aus dem Gesamtstrom und stellt Sie der kesselinternen Weiterverarbeitung zu. Erfolgt der Austrag über eine Förderschnecke, kann der Tagesbehälter entfallen und die Pellets werden direkt an den Kessel übergeben. Den Fördersystemen ist die nachgeschaltete Zellenradschleuse gemein, um Brennstoff in den Kessel und damit auf ein anderes Druckniveau zu bringen.

#### 1. Pelletlager mit Förderschnecke und Schrägboden

Durch die Verwendung von schräg angeordneten Platten als untere Begrenzung soll die restlose Entleerung garantiert werden. Der Brennstoff gleitet an reibungsreduzierten Wandungen nach unten und wird somit der Schnecke zugeführt. Um eine zusätzliche Gewichtsbelastung der Schnecke zu verhindern, kann diese durch ein darüber befindliches Druckentlastungsblech abge-

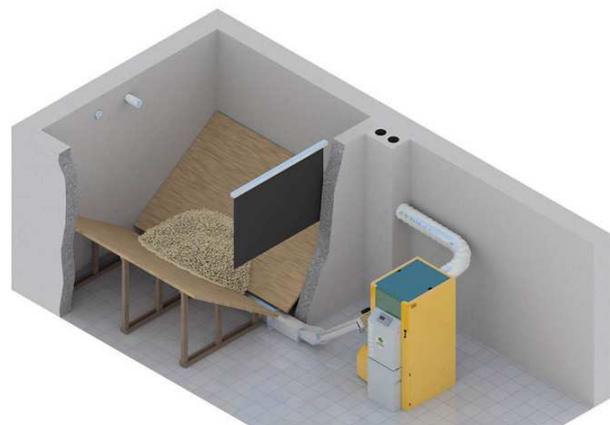
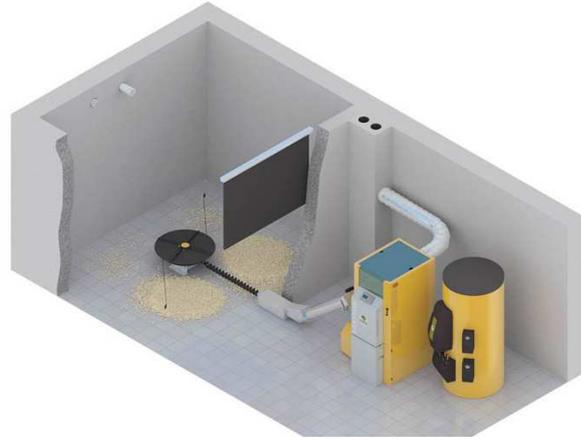


Abb. 3-12 Pelletlager mit Förderschnecke u. Boden [7]

schirmt werden. Auf Grund seines Aufbaus erzeugt dieses System einen beachtlichen Teil an Totraum unterhalb, der nicht zur Lagerung von Pellets zur Verfügung steht.

### 2. Pelletlager mit Förderschnecke und Rührarm

Einen wesentlich höheren Füllungsgrad erlaubt das nebenstehende System. Die in Abbildung 3-13 sichtbaren Rührarme sind über der Schnecke angeordnet und werden über ein drehbares Teller in Rotation versetzt. Innerhalb einer vollen Umdrehung des Tellers überstreichen die Rührarme zweimal die Schnecke und fördern diesen Brennstoff zu. Da die Rührarme nicht auf dem Niveau des Bodens arbeiten können, verbleibt hier ein geringer Rest an Brennstoff.

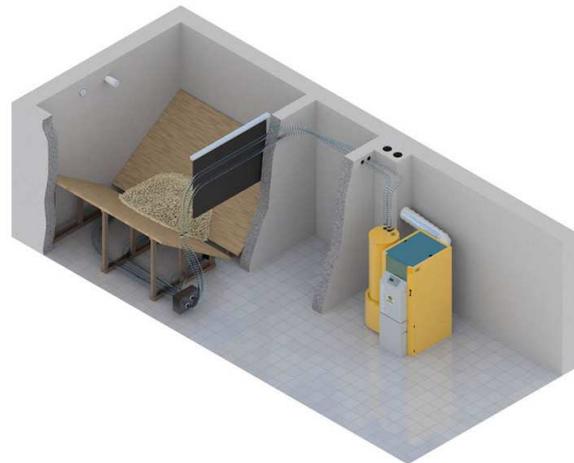


**Abb. 3-13 Pelletlager mit Förderschnecke u. Rührarm [7]**

Die Schnittstelle vom Lagerraum zum Kessel kann wiederum durch pneumatische Saugförderung oder auch ein Schneckensystem wie in der Abbildung, realisiert werden.

### 3. Pelletlager mit pneumatischer Saugentnahme und Schrägboden

Bisher aufgegriffene Varianten beschränken die räumliche Entfernung zwischen Lager und Heizkessel aufgrund der Kosten durch die wachsende Schneckenlänge. Eine Saugförderanlage vermag dies zu umgehen und kann durchschnittlich horizontale Entfernungen bis zu 25m und vertikale bis 5m überwinden, in Abhängigkeit von der Leistung des Gasförderers. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, einen Brennstoffbehälter außerhalb des Gebäudes zu platzieren.

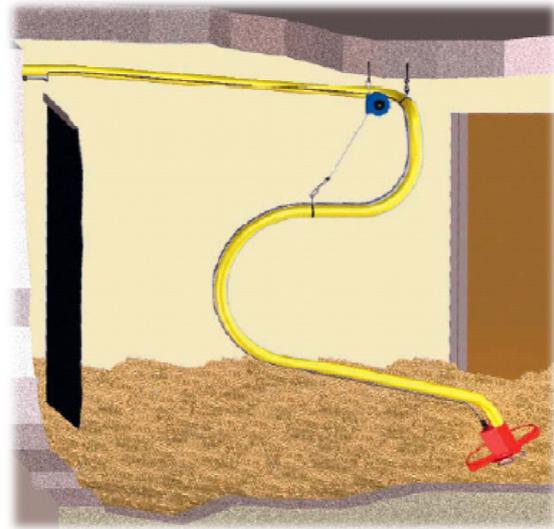


**Abb. 3-14 Saugentnahme [7]**

Bautechnische Einschränkungen durch vorgegebene Raumgeometrien, wie im Sanierungsbereich oftmals anzutreffen, können so umgangen werden. Im Austragspalt zwischen den Schrägplatten werden spezielle Absaugsonden an das Ende der Saugschläuche montiert, die eine verstopfungsfreie Aufgabe der Pellets garantieren sollen. Der Einbau mehrerer Sonden lässt eine gleichmäßigere Entleerung des Lagers zu.

#### 4. Pelletlager mit pneumatischer Saugentnahme ohne Schrägboden

Auch hier kann auf den Einbau eines Schrägbodens verzichtet werden. Eine Möglichkeit besteht darin, dies durch das vermehrte Aufstellen von Absaugsonden umzusetzen. Eine vollständige Entleerung ist auf Grund der beschränkten Anzahl der Sonden und damit verbundener Haufenbildung dazwischen nicht möglich. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung einer mobilen Austrageinheit, die sich durch das Lager bewegt und dabei Pellets aufnimmt bzw. weiterleitet, siehe Abbildung 3-15. Auf Merkmale dieses Systems wird später eingegangen (vgl. Kapitel 4).



**Abb. 3-15 Pneumatische Entnahme ohne Schrägboden [3, S.163]**

#### 5. Pelletlager als Lagerbehälter in verschiedenen Formen

Steht kein eigener Raum zur Lagerung der Holzpellets zur Verfügung, bietet sich die Verwendung verschiedenster Behälterbauformen an. Abbildung 3-16 zeigt eine für gebäudeinterne Verwendung konzipierte Variante in Form eines Gewebesackes. Die Austragung kann beliebig erfolgen und auch verschiedene Formen des Sackbodens, beispielsweise konisch und gerade, sind möglich. Das verwendete Austraggerät beeinflusst den Grad der Entleerung maßgeblich. Ein Erdtank nach Abbildung 3-17 ist in der Baugröße beinahe unbeschränkt und bietet die Möglichkeit einer externen Lagerung.



**Abb. 3-16 Lagersystem "Big Bag" [7]**



**Abb. 3-17 Erdtank [3, S.164]**

#### 6. Kombinierte Varianten

Die Auflistung obiger Systeme ist nicht vollständig und viele Hersteller bieten abgewandelte Varianten an. Durch verschiedenste Kombinationen werden stets neue Lösungen gefunden.

## 4 Konzeptionierung der Austrageinheit für Schüttgut

In diesem Kapitel wird auf die Konstruktionsphasen "Planung und Konzeption" eingegangen. Das Einbinden von Randbedingungen, die Erstellung der Anforderungsliste, sowie Lösungssuche und Bewertung bilden dabei wichtige Meilensteine des Konstruktionsablaufes. Zum Zwecke der leichteren Verständlichkeit, sowie eines gesamtheitlichen Eindruckes werden erste Ansätze und Definitionen festgehalten.

Die Planung erfolgt in KWB-internen Workshops und mit der Erstellung einer Ausschreibung ist diese erste Phase abgeschlossen. Dieses Dokument enthält eine grob umrissene Aufgabenstellung, die im Entwicklungsauftrag festgehalten wird. Nach Abgrenzung des Rahmenbereichs kann der Entwicklungsauftrag restlos geklärt und in Form einer Anforderungsliste dokumentiert werden.

### 4.1 Planung und Anforderungsliste

#### 4.1.1 Randbedingungen zur Konzeptionierung

Folgende Punkte stellen einen Auszug des Rahmenbereichs dar und sollen Inhalt und Umfang der Aufgabenstellung vorführen.

- Art und Eigenschaften des Schüttgutes (z.B.: physikalische Eigenheiten wie Festigkeit, Schüttwinkel, Dichte, Feinanteilzunahme bei mechanischer Belastung...). Dies hat starken Einfluss auf die Bauweise des späteren Systems.
- Die Aufstellung bzw. Umgebung des Systems (z.B.: Sanierungsbereich, Klima im Schüttgutlager, Schutz v. Niederschlag, unterirdische Lagerung oder Lagerung in Gebäuden...)
- Die Förderleistung des Systems geht einher mit der Größe der Heizung je nach Heizlast. Dies erfordert die Abklärung der zu bedienenden Kesselleistung.
- Abstimmung von Pelletlager, Austragungssystem und Kesseltyp um störungsfreien Betrieb zu ermöglichen. Erlaubter Restinhalt bei "vollständiger Entleerung"
- Normen (z.B.: Lagerung, Brandschutz, Dichtheit des Systems...)
- Welche zusätzlichen Funktionen sind notwendig (z.B.: Füllstandskontrolle)
- Mechanische Belastungen durch das Schüttgut (z.B.: beim Befüllen der Anlage oder bei vollem Brennstofflagerraum)
- Entnahme (z.B.: seitlich, von oben oder unten liegend)

## 4.1.2 Vorgaben laut Produktplanung

Bereits die Erstellung des Entwicklungsauftrages bedingt die Auseinandersetzung mit technischen und wirtschaftlichen Belangen rund um das Thema Austragung bzw. Förderung von Holzpellets. Die schiere Größe des Lösungsfeldes wird durch Vorgaben aus der Produktplanung nach Abbildung 4-1 etwas eingeschränkt und in Form der Anforderungen festgehalten.

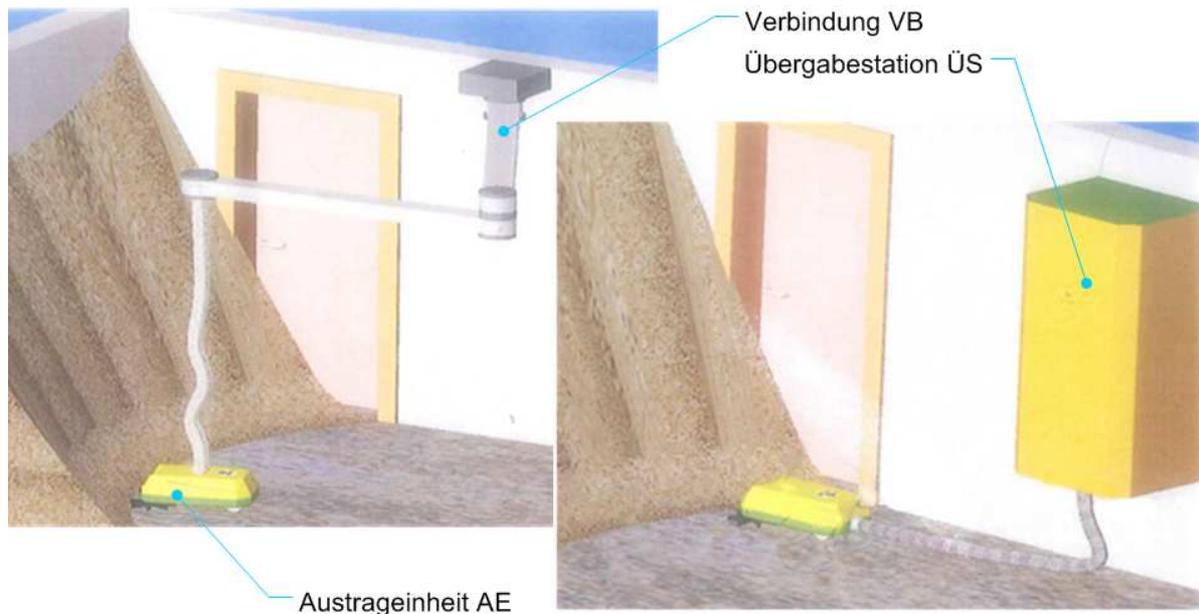


Abb. 4-1 Austragungssystem

So entsteht ein erster Eindruck, unter welchen Vorgaben sich die Konstruktion zu entwickeln hat. Eine mobile Austrageinheit soll sich im Brennstofflager bewegen, dabei Pellets aufnehmen und, eventuell zeitverzögert, weitergeben. Das Vorhandensein einer mechanischen Verbindung zur Heizung oder einer zwischengeschalteten Übergabestation ist nicht zwingend vorgeschrieben, weshalb sich die Möglichkeit einer zeitlichen Verzögerung beim Pellettransport erst ergibt. Je nach Ausführung der Verbindung ist deren physikalisches Prinzip nicht festgelegt, sodass auch die Realisation durch eine autonome Austrageinheit denkbar wäre. Diese Betrachtungen ließen die Definition der 3 Baugruppen Austrageinheit, Verbindung und Übergabestation als zweckmäßig erscheinen.

## 4.1.3 Anforderungsliste

Auf die Bedeutung einer konsequent erstellten und geführten Anforderungsliste wurde bereits eingegangen. Die Gliederung von Anforderungen nach Gesichtspunkten aus Abschnitt 2.3.2 kann auch anderweitig geschehen oder zusätzlich durch die Unterscheidung in Basis-, Leistungs- und Begeisterungsanforderungen ergänzt werden. Diese Terminologie entstammt dem Kano-Modell nach Abbildung 4-2, welches den Zusammenhang aus Kundenzufriedenheit und Erfüllung der Kundenwünsche beschreibt. [4, S.98]

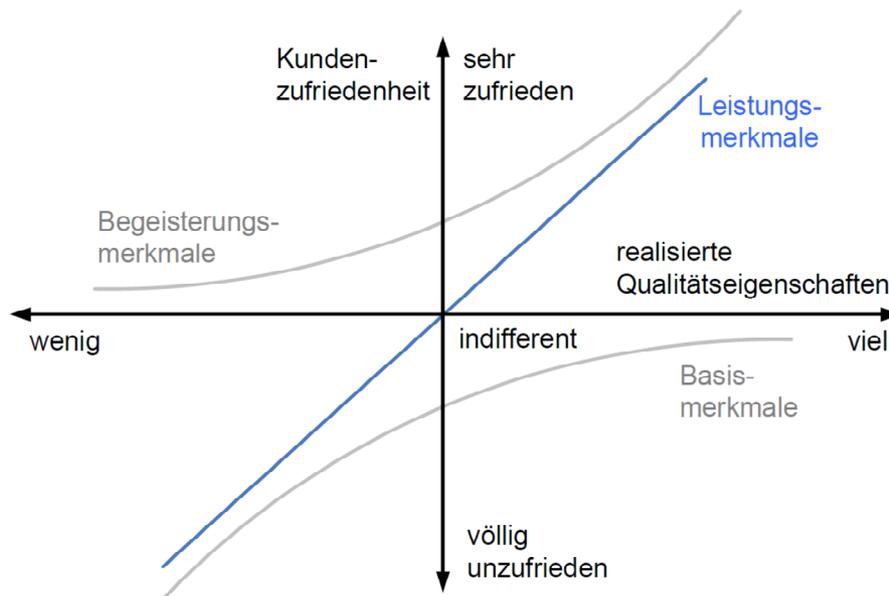


Abb. 4-2 Kano-Modell

Die Abszisse gibt den Grad der Zielerreichung im Sinne umgesetzter Qualitätseigenschaften im Bereich zwischen "wenig" und "viel" an. Unter Qualität versteht man die Relation zwischen der Summe von Eigenschaften des Produktes und den Anforderungen und berechtigten Erwartungen des Kunden. [2] Die Ordinate bemisst die Kundenzufriedenheit zwischen völliger Un- und Zufriedenheit. Um die Abbildung richtig deuten zu können, ist die Definition der verschiedenen Anforderungstypen wie folgt notwendig. [4, S.98]

- Basisanforderungen; Diese werden vorausgesetzt und die Umsetzung wird meist nicht bemerkt. Trotzdem führt ein zu geringer Grad der Erfüllung zur überproportionalen Abnahme der Kundenzufriedenheit.
- Leistungsanforderungen; Sie zeigen einen linearen Zusammenhang im Kano-Modell. Ein steigender Erfüllungsgrad bedeutet proportional steigende Kundenzufriedenheit.
- Begeisterungsanforderungen; Ein Fehlen dieser Merkmale beeinträchtigt die Zufriedenheit nicht maßgeblich, jedoch führt steigender Erfüllungsgrad zur überproportionalen Steigerung der Kundenzufriedenheit.

Der zeitliche Aspekt darf bei dieser Betrachtung nicht außer Acht gelassen werden, da die Kundenzufriedenheit in Bezug auf die realisierten Qualitätseigenschaften einer gewissen Dynamik unterliegt. Dieser Gewöhnungseffekt lässt Begeisterungsmerkmale zu Leistungsmerkmalen und schließlich zu Basismerkmalen werden, wenn diese erst durch eine zu große Anzahl von Anbietern erfüllt werden. [4, S.98]

Im Folgenden werden die wichtigsten Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt aufgezählt und erläutert. Um die Übersichtlichkeit der Anforderungsliste zu wahren, wurden die Forderungen nach verschiedenen, ordnenden Gesichtspunkten gegliedert. Innerhalb derer wird mit Hilfe der Kano-Merkmale unterschieden.

### 1. Anforderungen: Allgemeine

Sofern für den Prototypenbau von Relevanz, sollen alle gültigen Normen, Gesetze und Richtlinien befolgt werden. Insbesondere gilt dies für Maschinen- und Brandschutzrichtlinie.

### 2. Anforderungen: Zu fördernder Brennstoff

Zu verwenden sind Pellets nach ÖNORM M7135 im Durchmesserbereich von 6mm bis 8mm, wobei Formabweichungen die Funktion nicht einschränken dürfen. Als Begeisterungsmerkmal wurde die Kompatibilität des technischen Gebildes mit pelletierten Nicht-Holzbrennstoffen wie Miscanthus-, Gras-, Stroh- und Heu-Pellets oder Olivenkernen festgelegt.

### 3. Anforderungen: Einsatz des Fördersystems

Das technische Gebilde soll der Brennstoffversorgung von Heizkesseln bis maximal 35 kW Leistung genügen, was im Falle der Fa. KWB durch die Produktserie Easyfire abgedeckt wird. Hinsichtlich von Funktionssicherheit, Einsetzbarkeit und Entleerungsgrad soll sich die Entwicklung unabhängig von der Form des Lageraums zeigen. Die Verwendung in Lagerbehältern verschiedenster Form stellt hierbei eine Begeisterungsanforderung dar. Der Entnahmepunkt der Pellets kann an beliebigen Punkten im Raum liegen, wobei die Brennstoffzufuhr in gewissen Zeitintervallen stets gewährleistet werden muss. Diskontinuierliche Zufuhr ist denkbar, darf aber nicht zu einem Abschalten der Heizung auf Grund Brennstoffmangels führen. Für das Vorhandensein eines Vorratsbehälters bedeutet dies eine Entnahmeeistung im Bereich von 3 kg/min bis 8 kg/min. Als Anhaltspunkt für die Lebensdauer dienen, wie üblich für Heizungssysteme, rund 20 Jahre. Die mechanische Struktur der Austrageinheit muss sämtlichen Betriebszuständen inklusive Verschüttung standhalten. Räumliche Differenzen zwischen Austrageinheit und Übergabestation bzw. Heizkessel müssen bis zu gewissen Grenzen überwindbar sein.

#### 4. Anforderungen: Installations- bzw. Montageunternehmen

Geringer Montage- und Inbetriebnahmeaufwand beim Kunden vor Ort wird als Basisanforderung klassifiziert. Hierzu zählen neben einer einfachen und schnellen Montage durch die Verwendung standardisierter Werkzeuge auch die Ausführung verwechslungssicherer Bauteile, um Falschmontage zu verhindern.

#### 5. Anforderungen: Endkunde

Diese geben die grundlegenden Rahmenbedingungen und Gedanken zur Entwicklung des Systems wieder. Die Einteilung in Basis-, Leistungs- und Begeisterungsanforderungen findet sich im Lastenheft laut Anhang.

- Kein Schrägboden erforderlich
- Kein Aufwand für den Kunden für bzw. bei der Lagerräumfüllung (z.B.: Hantieren mit der Austrageinheit) oder während des Betriebs.
- Bei einer Störung muss die Austrageinheit leicht auffindbar sein (z.B.: durch entsprechende Verbindung mit der Übergabestation)
- Vollständige, automatische Entleerung des Lagerraumes ohne Zutun des Kunden möglich; Es verbleiben keine (<10%) Brennstoffreste im Lagerraum
- Pelletsstaub und allfällige Verschmutzungen dürfen keinen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit des Systems haben
- Eine ev. auftretende Verstopfung wird vom System ohne Zutun des Kunden behoben (z.B. durch Spülen)
- Entnahmelogik zur gleichmäßigen Lagerraumentleerung und Leerererkennung

#### 6. Anforderungen: Supply Chain

Hierzu zählen im Rahmen der Prototypentwicklung eine geringe Teilevielfalt, sowie die Verwendung von Norm- und Zukaufteilen. Im Sinne der Abstimmung von Fertigungsmöglichkeiten und Kostenminimierung ist die Verwendung von KWB-internen Gleichteilen, die bereits in anderen Systemen verwendet werden, anzustreben.

#### 7. Anforderungen: Sonstige

Diese betreffen beispielsweise die Herstellungskosten, welche sich an denen bestehender Systeme messen. Der Vermeidung von Schutzrechtsverletzungen stellt eine Basisanforderung dar.

**4.2 Konzeption und Bewertung**

Das Ausarbeiten von Konzeptvarianten und deren Bewertung stellen die abschließenden Schritte der Phase "Konzipieren" dar.

4.2.1 Auswahlverfahren

Bereits sehr früh zeigt sich die Notwendigkeit zur Entscheidung, in welche Richtung die Konstruktion weiter verlaufen soll. Durch die Erstellung einer Auswahlliste kann hierzu ein Dokument erstellt werden, das im Zusammenspiel mit untenstehendem Text die Rechtfertigung für das weitere Vorgehen bildet. Nach Abbildung 4-3 zeigen sich demnach zwei grundsätzliche Möglichkeiten, zum einen die Lösung mit einer autonomen Austrageinheit und zum anderen mittels einer verbundenen Austrageinheit.

		Auswahlliste						
Lösungsvarianten eintragen	Lösungsvarianten nach <u>Auswahlkriterien</u> beurteilen:					Entscheiden: <u>Lösungsvarianten</u> kennzeichnen		
	(+)	ja				(+)	Lösung weiter verfolgen	
	(-)	nein				(-)	Lösung scheidet aus	
	(~)	nicht sicher						
	(?)	Informationsmangel				(?)	Information beschaffen (Lösung erneut beurteilen)	
	Forderungen der AFL erfüllt							
	Grundsätzlich realisierbar							
	Techn. Aufwand zulässig							
	Wirtschaftl. Aufwand zulässig							
	Im eigenen Bereich bevorzugt							
Bemerkungen (Hinweise, Begründung)								
AE autonom	+	+	~	~	-	Aufwand u. Kosten hoch, techn. Umsetzung fragwürdig	-	
VB vorhanden	+	+	+	+	+		+	

**Abb. 4-3 Auswahlliste**

Erstere ist vergleichbar mit Ausführungen zeitgemäßer Serviceroboter, beispielsweise als Staubsauger oder Rasenmäher. Die Bezeichnung "autonom" entstammt der fehlenden mechanischen Verbindung der Austrageinheit zur Übergabestation. In Übereinstimmung mit dem Entwicklungsauftrag und der Auswahlliste wird diese aus folgenden Gründen verworfen:

- Die Verfolgung beider Ansätze im Zuge der Entwicklungsmethodik ist nach technischen, wirtschaftlichen und zeitlichen Aspekten zu aufwendig.
- Die Zahl von Lösungen bzw. Prinzipien, die auf die jeweils andere Variante anwendbar sind, ist fragwürdig. Man läuft Gefahr, Konstruktionszeit für Lösungen aufzubringen, die durch wirtschaftliche Gesichtspunkte an der folgenden Bewertung scheitern.

Konkret ergeben sich dabei eine Fülle an technischen Problemen, derer an dieser Stelle etwas Raum gewidmet sei. Moderne Serviceroboter sind in verschiedensten Ausführungen und Preiskategorien erhältlich. Das Leistungsvermögen hat sich in letzter Zeit stark verbessert, jedoch bleiben grundsätzliche Problematiken aufgrund der Funktionsweise erhalten. Energie für den Antrieb und Durchführen der eigentlichen Tätigkeiten wird meist durch eingebaute Akkumulatoren bereitgestellt. Das Erreichen einer Ladestation innerhalb eines gewissen Zeitfensters ist daher von zentraler Bedeutung für kontinuierliche Funktionsweise. Im Falle eines Staubsaugerroboters wird dies durch Absturz an Hindernissen oder Festfahren aufgrund unzureichend Fahrstrategie und Sensorik oftmals unterbunden. Kommt es zu derartigen Fehlfunktionen, muss das Gerät durch den Benutzer von Hand zur Station gebracht und dort verbunden werden. Ferner sind die Zeitspannen zwischen den Ladezyklen trotz allem bescheiden und die Reinigungsergebnisse stehen konventioneller Reinigung noch stark nach. Das bisher Gesagte stellt bei der Anwendung in einem Brennstoffbunker zum Pellettransport ein großes Problem dar. Als wichtigste Kriterien, die auch im Widerspruch zur Anforderungsliste stehen, wurden erfasst:

- Diskontinuierliche Arbeitsweise; Es kann nicht innerhalb eines Zeitintervalls garantiert werden, dass Pellets an eine Übergabestation geliefert werden. Sollte es zu Verzögerungen kommen, hätte dies einen Stillstand der Heizung zur Folge.
- Resultierend aus der Schüttgutedichte und den Fließeigenschaften ist anzunehmen, dass der Energiebedarf zum Antrieb und der Aufnahme von Pellets ungleich höher als bei vergleichbaren Servicerobotern ist. Die sich ergebenden Bedingungen im Lager, wie z.B.: zu überwindende Steigungen, sind nicht vorhersehbar.
- Sollte das Gerät beim Befüllen des Lagerraums an beliebiger Stelle verbleiben dürfen, wäre eine vollkommene Zuschüttung die Folge und die Austrageinheit müsste die Distanz zur Übergabestation durchtunneln.
- Durch die fehlende mechanische Verbindung ist die Austrageinheit im Falle eines Defektes nur durch das Entleeren des Bunkers auffindbar.
- Eine separate Übergabestation zur Schleusung des Brennstoffs aus dem Bunker in den Heizraum ist notwendig. Dies erfordert Mechanismen, die Austrageinheit an der Übergabestation zu entleeren.

- Vorangestellte Argumente lassen eine wirtschaftlich vertretbare Lösung dieser Variante auf Grund erhöhten Aufwandes nicht erwarten.
- In Brennstofflagerräumen ist die Brandschutzverordnung und damit die ATEX- Richtlinie von Interesse. Die Kosten verschiedenster Bauteile steigen durch die Forderung nach Explosionsschutz stark an.

Nachdem diese Umstände erfasst sind, kann weiter in Richtung einer Austrageinheit mit Verbindung entwickelt werden.

#### 4.2.2 Lösungssuche für Teilfunktionen

Nach der Aufspaltung in Teilfunktionen können diese in einem morphologischen Kasten festgehalten werden. Einige der Wirkprinzipien und Lösungen zum Erfüllen der Funktionen werden im Folgenden betrachtet, auf Grund des Umfangs wird auf eine vollständige Erläuterung des Ordnungsschematas verzichtet. Der Aufbau entspricht weitestgehend den Empfehlungen aus Abschnitt 2.4.5. Die Spalten enthalten eine Auflistung der Teilfunktionen, welche durch einen zusätzlichen Spaltenparameter "Baugruppe" getrennt sind. Die Zeilen enthalten die denkbaren Lösungen bzw. Wirkprinzipien. Nach Formel 2-1 ergeben sich 82944 mögliche Prinzipkombinationen, die eine Erfüllung der Gesamtfunktion bzw. der Aufgabe ermöglichen, wobei bereits bei der Entstehung des morphologischen Kastens untragbare Lösungen zu Teilfunktionen ausgeschlossen werden. Nicht immer sind Verträglichkeiten auf Anhieb ersichtlich, so dass ein stetes Prüfen und Korrigieren der Prinzipkombinationen notwendig ist. Die folgende Auflistung soll zum Verständnis der Problemstellung und deren Lösung beitragen.

##### 1. Energieversorgung der Austrageinheit

Nach umfangreichen Überlegungen kommen schließlich zwei Arten der Energieversorgung in die engere Wahl. Die Bezeichnung "extern" bezieht sich hierbei auf ein System, dessen Grenze am Rande der baulichen Erstreckung des Lagerraums verläuft.

- Pneumatische Lösung; Externe Versorgung der Austrageinheit über ein Schlauchsystem zur Bereitstellung von Strömungsenergie und Wandlung an Bord.
- Elektrische Lösung; Dies beinhaltet die externe Spannungsversorgung von außen über einen Leiter.
- Kombinierte Lösung; Eine Kopplung von pneumatischer und elektrischer Lösung zur Energieversorgung.

## 2. Energiewandlung an Bord der Austrageinheit zur Fortbewegung

Folgende Lösungsansätze zur Darstellung eines Antriebs wurden gefunden:

- Wandlung von Strömungsenergie in mechanische Energie in Form von Rotation oder Translation. Ausgeführte Geräte wären beispielsweise Druckluftmotore oder Pneumatikzylinder.
- Wandlung elektrischer Energie in mechanische Energie durch Motoren.
- Wandlung elektrischer Energie in Strömungsenergie; Dies bedingt die Verwendung einer Strömungsmaschine (Turbine, Verdichter) an Bord der Austrageinheit.
- Wandlung von Strömungsenergie in elektrische Energie; Hierzu wäre der Antrieb eines Generators und die Zwischenumformung in Rotationsenergie von Nöten.

## 3. Antriebsart: Fortbewegung durch gewandelte Energie

Dies bezieht sich auf die Verzweigung der bereitgestellten Energie:

- Räumwerkzeuge mit Antrieb gekoppelt; Räumwerkzeuge dienen der Aufnahme und dem Umschlag von Pellets. Zweiter ist von Nöten, um eine Brückenbildung der Pellets z.B.: vor einer Absaugöffnung zu verhindern.
- Räumwerkzeuge und Antrieb getrennt; Dies bedingt eine größere Anzahl verschiedener Energiewandler bzw. eine Aufspaltung der bereitgestellten Energie auf mehrere Zweige.

## 4. Auffinden der Pellets im Lager bzw. Bewegungsablauf

- Kinematik durch Verbindung teilweise vorgegeben; Dies entspricht dem in Abbildung 3-18 links dargestellten Vorbild. Die Verbindung könnte hier durch gelenkig verbundene Kragarme oder auch ein Schienensystem an Boden oder Decke realisiert werden. Damit wäre es möglich, die Bewegungsabläufe der Austrageinheit einzuschränken und Bereiche im Lagerraum systematisch zu entleeren.
- Durch Antrieb vorgegeben; Das Anfahren von Brennstoffresten bei Entleerung des Lagers ist von besonderer Bedeutung. Obliegt dies rein der Austrageinheit ohne Einwirken der Verbindung, muss eine Fahrstrategie erstellt werden. So kann nach zufälliger und gesteuerter Fahrt unterschieden werden. Mit steigenden Anforderungen an den Entleerungsablauf und damit die Fahrstrategie, wächst der Aufwand für Antrieb und Steuerung.

## 5. Fahrstrategie

Der Bewegungsablauf der Austrageinheit entscheidet maßgeblich über den Entleerungsgrad des Brennstofflagerraums. Folgende Strategien wurden unterschieden:

- Zufallfahrt ungesteuert; Die Austrageinheit wird mittels eines Antriebs bewegt, dessen Funktionsweise eine willkürliche Bewegung im Raum bewirkt. Entleerungsdauer und -grad sind dabei stochastisch bestimmt.
- Zufallfahrt gesteuert; Dies entspricht einem gesteuerten Ablauf, der nach einem Ereignis wie einer Kollision die Antriebsrichtung und Einschaltdauer des Antriebs willkürlich neu setzt. Dadurch sind Wendemanöver möglich. Durch ein neuerliches Ereignis wird auf diese Weise die Fahrtrichtung wiederum geändert, bis nach einer gewissen Zeit jeder Punkt des Lagerraums erreicht wurde.
- Gesteuerte Fahrstrategie; Diese sei am Beispiel der Mäanderfahrt erklärt. Theoretisch würde die Fahrlinie der Austrageinheit ein Muster ergeben, das sich in Form eines Mäanders über den Boden des Brennstofflagerraums legt. Kollisionen als Ereignisse in einer Ablaufsteuerung würden ein Wenden bewirken. Ist die Austrageinheit mit derartigen Antrieben ausgestattet, würde sich eine Vielzahl denkbarer Muster ergeben, die beliebig kombiniert werden könnten. Dies kennzeichnet jedoch einen rein hypothetischen Fall, dem die Fortbewegung auf einem erdachten idealen Boden zu Grunde liegt. Im Anwendungsfall würde es ständig zu Abweichungen vom Idealkurs durch eine Abdrift kommen, da verschiedene Steigungen und Bodenbeschaffenheiten zu überwinden sind. Die tatsächlichen Bewegungsabläufe wären nur in Versuchen ermittelbar.

## 6. Erkennen, ob Pellets transportiert werden bzw. im Bereich vorhanden sind.

Diese Funktion könnte gewissen Komfortansprüchen genügen. Sind in unmittelbarer Nähe der Ausräumwerkzeuge keine Pellets vorhanden, könnte Pelletzuführung und/oder Pellettransport gestoppt werden, bis durch das Anfahren einer neuen Position wieder Brennstoff gefunden wurde. So ließe sich Energie sparen und im Falle einer ständigen Leermeldung eine Erinnerungsfunktion zum Auffüllen des Lageraums schaffen. Je nach Gestaltung des Gesamtsystems ist eine derartige Funktion notwendig, geschweige denn sinnvoll oder zum Beispiel im Falle des kombinierten Systems aus Antrieb und Ausräumen schlicht obsolet.

## 7. Energiewandlung an Bord der Austrageinheit zur Pelletaufnahme

siehe Punkt 2: Energiewandlung an Bord der Austrageinheit zur Fortbewegung

### 8. Werkzeuge zur Pelletzuführung und -aufnahme

Sie dienen einerseits der Auflockerung von Pellets im Falle der Brückenbildung und auch der Befüllung einer Austrageinheit, die auf eine Entleerung an der Übergabestation angewiesen ist. Wie in Punkt 3 erwähnt, können diese Werkzeuge eine Einheit mit dem Antrieb bilden. Neben förderbandähnlichen Ausführungen wären auch rotierende Elemente wie Schnecken oder Räumarme denkbar. Die Pellets könnten auch durch Luftstöße in gewünschte Positionen gebracht werden.

### 9. Verbindung zwischen Austrageinheit und Übergabestation

Da von einer autonomen Austrageinheit durch Anwendung eines Auswahlverfahrens abgesehen wurde, verbleiben folgende Verbindungsarten im Kombinationsschema:

- Kontinuierlich mechanisch in Form einer gelenkig oder elastisch ausgeführten Verbindung. Dies entspricht beispielsweise der Verbindung durch bewegliche Kragträger oder eines Schlauches.
- Kontinuierlich elektrisch: Ein Leiter dient der Übertragung von Energie und Signalen.

### 10. Transport der Pellets von der Austrageinheit zur Übergabestation

Dies bedingt die Tatsache, dass eine Übergabestation zur Aufnahme, Speicherung und Weitergabe von Brennstoff vorhanden ist. Auf diese Weise ergeben sich folgende Varianten:

- Austrageinheit fährt Übergabestation an; Dies setzt eine Reihe weiterer Teilfunktionen bzw. deren Lösungen voraus.
- Saugförderung bzw. Druckförderung; Erstere ist die standardisierte Form der pneumatischen Förderung für den Austrag von Pellets.

### 11. Aufgaben der Übergabestation

Dieser Punkt entscheidet letztlich, ob eine Übergabestation in der Lösungsvariante berücksichtigt wird. Ist dem nicht so, wird der Brennstoff direkt an den Kessel bzw. den Tagesbehälter weitergegeben. Ist eine Übergabestation vorgesehen, hat diese mehrere Aufgaben zu erfüllen. Sie stellt die Schnittstelle von Brennstofflagerraum und Heizraum dar und dient damit der Schleusung der Pellets. Diese müssen von der Austrageinheit übernommen, eventuell gespeichert und an den Kessel weitergegeben werden. Der Speicherbedarf ist neben der Kesselleistung auch in Hinsicht auf die diskontinuierliche Brennstoffzufuhr auszulegen. Die Station puffert somit die ungleichmäßigen Zeitabstände in denen Pellets von der Austrageinheit aufgegeben werden.

#### 4.2.3 Erarbeiten der Konzeptvarianten

Als Kriterium zur Abgrenzung der einzelnen Varianten untereinander erweist sich die Art der Energieversorgung als zielführend.

##### 1. Konzeptvarianten mit Versorgung der Austrageinheit durch Strömungsenergie

Im Verlauf der weiteren Konkretisierungs- und Entwicklungsschritte werden zusätzliche Varianten untersucht und ausgeschlossen. Hierzu zählt etwa die Energieversorgung mittels Druckluft bei rund 6 bar, die außerhalb des Lagerraums erzeugt und zur Austrageinheit geleitet wird. Entscheidend ist der Kostenfaktor, da die zur Erzeugung, Verteilung und Wandlung der Druckluft notwendigen Geräte die Referenzkosten bei weitem übersteigen. Lohnender in Bezug auf Umsetzbarkeit scheint die Einbeziehung der sogenannten Saugturbine. Dieses Gerät ist in den pneumatischen Saugförderanlagen, die zur Versorgung des Heizkessels dienen, bereits vorhanden. Die so bereitgestellte Strömungsenergie kann zur Wandlung an Bord der Austrageinheit herangezogen werden. Eine Übergabestation kann entfallen und die Verbindung zwischen Saugturbine und Austrageinheit ist kontinuierlich-elastisch in Form eines Schlauches oder Schlauchpaares realisiert, das auch den Abtransport der Pellets gewährleistet. Die Saugturbine ist nicht umschaltbar, weshalb eine Wandlung in mechanische Rotationsenergie stets die gleiche Drehrichtung von Antriebs- bzw. Austräumgebilden zur Folge hat. Den Grundgedanken kann Abbildung 3-15 vermitteln. Auf Grund der Funktionsweise der Saugturbine sind Ein- und Zweischlauchausführungen denkbar, auf die unterschiedlichen Merkmale wird in Kapitel 4 vertiefend eingegangen.

##### 2. Konzeptvarianten mit Versorgung der Austrageinheit durch elektrische Energie

Zur Umwandlung an Bord der Austrageinheit wird elektrische Energie über einen Leiter von außerhalb des Brennstofflagers bereitgestellt. Dies stellt die einzige Verbindung dar, was die Realisierung einer Übergabestation voraussetzt. Nach der Aufnahme von Pellets an beliebigen Punkten im Lagerraum muss zur Weitergabe des Brennstoffs diese Station angefahren werden. Durch die vorhandene Versorgung mit elektrischem Strom können verschiedenste Elemente der Sensorik und Steuerungs- bzw. Regelungstechnik verbaut werden. Werden Antrieb und Austräumgebilde durch Motore bewegt, sind dadurch verschiedenste Fahrstrategien möglich. Diese Konzeptvarianten weisen viele Parallelen zu den in Abschnitt 3.4.1 ausgedehnten autonomen Varianten auf. Denen gegenüber kann allerdings das Fehlen einer erschöpflichen Energiequelle an Bord der Austrageinheit als eindeutiger Vorteil verbucht werden. Die zugrundeliegende Funktionsweise generiert allerdings eine Vielzahl weiterer Aufgaben, deren Erfüllung zwingend notwendig wäre. Hierzu zählen beispielsweise:

- Die Übergabe der Pellets von der Austrageinheit an die Station muss bei jedem Füllungsgrad des Brennstofflagers möglich sein. Dies wirft die Frage auf, an welcher vertikalen Position dies zu geschehen hat, da mit sinkendem Pelletpegel das Erreichen höher gelegener Punkte unmöglich wird. Somit scheint das Entladen des Brennstoffs nur in Bodennähe möglich und sinnvoll, dies würde allerdings bedeuten, dass sich die Austrageinheit durch den Bunker graben muss.
- Es ist zwingend erforderlich, dass die Austrageinheit im Sinne der Belieferung des Heizkessels stets die Übergabestation anfährt. Fraglich bleibt, ob dies durch die Bedingungen im Lager (Nachrutschen von Pellets, Einstürzen von Brücken usw.) überhaupt möglich ist.

### 3. Konzeptvarianten mit Versorgung der Austrageinheit durch Strömungsenergie und elektrische Energie

Diese Möglichkeit stellt eine Kombination aus den bisher in Punkt Eins und Zwei besprochenen Varianten dar. Die Verbindung zwischen Austrageinheit und Vorratsbehälter besteht demnach aus einem elektrischen Leiter und dem flexiblen Schlauch. Durch Verwendung der Saugturbine können Pellets pneumatisch abbefördert werden, wohingegen die Versorgung von Antrieb und Ausräumwerkzeugen auf der Umwandlung von elektrischer Energie beruht. Diese Trennung ergibt den Vorteil, dass die pneumatische Förderung bis zum Auffinden von neuem Brennstoff deaktiviert werden könnte. Auch hier kann eine Übergabestation entfallen, was die Anzahl entstehender Probleme und notwendiger Lösungen deutlich reduziert. Varianten, bei denen sich eine Art Laufkatze an der Decke entlang einer Schiene bewegt sind denkbar. Der Schlauch verbindet die Saugturbine mit der Laufkatze von der aus die Austrageinheit operiert. Dabei kann die Erzeugung einer Bewegung von der Austrageinheit selber oder durch Vorgabe der beweglichen Katze erfolgen.

Allen Varianten, die sich der Wandlung elektrischer Energie bedienen, liegt der große Vorteil einer klar definierten Antriebsleistung zu Grunde. So ergibt die Wandlung in Elektromotoren kalkulierbare Momente und Drehzahlen. Hingegen ist dies, bei Varianten vom Typ Eins, nicht immer vorhersehbar. In Abhängigkeit von der Feststoffbeladung des pneumatischen Fördersystems variieren die Strömungsgeschwindigkeiten und somit die Beträge der gewandelten Energien. Verschiedene Konzeptvarianten sind zu den 3 Gruppen erarbeitet, bis hin zu maßstäblichen Skizzen und überschlägigen Kalkulationen finalisiert und auf Herstellungskosten geprüft. Einer Gruppe von 5 Personen obliegt schließlich die Durchführung der Bewertung mittels einer Nutzwertanalyse.

#### 4.2.4 Bewertung der Konzeptvarianten

Nach Abschnitt 2.3 endet die Konzeptphase mit der Bewertung der Konzeptvarianten und abschließender Auswahl des Lösungskonzeptes. Die hierfür notwendigen Bewertungskriterien werden aus dem Zielsystem, welches der Funktionsstruktur entstammt, gewonnen. Zur besseren Überschaubarkeit der Bewertungsunterlage empfiehlt sich die Gliederung nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien, sowie der Anführung von Beispielen. Im Folgenden soll auf die Bewertungskriterien und deren Bedeutung eingegangen werden.

##### 1. Technische Kriterien: Variabilität und Flexibilität

Dies beinhaltet die Bewertung von Entleerungsgrad und Bewegungsfreiheit der Austrageinheit nach folgenden Gesichtspunkten:

- Kann die Austrageinheit den gesamten Lagerraum erreichen oder hemmt eine eventuell vorhandene Verbindung zur Übergabestation die Bewegung.
- Lässt die Fahrstrategie eine akkurate und restlose Entleerung erwarten.

##### 2. Technische Kriterien: Ausstattung

Dieses Kriterium beschäftigt sich mit der Frage, ob zusätzliche Einbauten im Pelletlager von Nöten sind und in welchem Umfang diese das Speichervolumen reduzieren.

##### 3. Technische Kriterien: Zuverlässigkeit

Hierbei lassen sich zwei Unterkriterien unterscheiden.

- Robustheit / Störanfälligkeit; Lässt der mechanische und elektrische Aufbau eine gewisse Lebensdauer erwarten und in welchem Umfang sind Verschleißteile vorhanden. Dies beinhaltet auch die Auffindbarkeit der Austrageinheit bei Ausfall oder Defekt.
- Förderstrom; Ist eine garantierte Brennstoffversorgung des Heizkessels durch die jeweilige Ausführung möglich? Dabei wird definiert, dass die Verbindung durch einen Saugschlauch einen kontinuierlichen Förderstrom gewährleistet. Dies bedeutet zwar nicht, dass zu jeder Zeit Pellets gefördert werden, jedoch wäre dies auf Grund der Verbindung möglich. Von einem diskontinuierlichen Förderstrom kann gesprochen werden, wenn die Verbindung der Austrageinheit durch einen elektrischen Leiter realisiert ist. Die Übergabestation dient während der Abwesenheit der Austrageinheit als Puffer um Pellets für den Kessel bereitzustellen.

#### 4. Wirtschaftliche Kriterien: Planungs- Installations- und Betreuungsaufwand

Hier werden notwendige Tätigkeiten vor und während des Betriebs abgehandelt. Gemäß der Aufgabenstellung sind diese Aufwände auf ein Minimum zu reduzieren.

- Planungsaufwand enthält z.B.: die bautechnische Umgestaltung vorhandener Räume in Bezug auf Durchbrüche und dergleichen.
- Der Installationsaufwand bezieht sich auf das ausführende Unternehmen und bewertet den Aufwand vor Ort. Dies beinhaltet beispielsweise das Adaptieren von Leitungen oder Sensoren.
- Der Betreuungsaufwand behandelt Ansprüche des Systems im Falle einer Brennstofffüllung oder auch wiederkehrende Servicetätigkeiten die dem Kunden obliegen.

#### 5. Wirtschaftliche Kriterien: Kosten

Hier werden den Kriterien erstmalig Eigenschaftsgrößen in Form von Zahlen zugeordnet. Die Herstellungskosten werden anhand bestehender Systeme, firmenintern als auch an Produkten von Mitbewerbern, gemessen. Da für die Herstellungskosten von unternehmensfremden Produkten keine Zahlen vorhanden sind, werden diese abgeschätzt.

#### 6. Wirtschaftliche Kriterien: Zu erwartender Entwicklungsaufwand

Dieser Aspekt berücksichtigt die Komplexität des technischen Gebildes und den damit verbunden zeitlichen Aufwand.

#### 7. Wirtschaftliche Kriterien: Innovationsgrad

Die Innovation behandelt den Neuheitsgrad eines Produktes in Hinblick auf die wirtschaftliche Verwertbarkeit [10, S.94ff]. Dabei sind die Differenzierungsmöglichkeit zu Produkten am Markt und das Potential für Skalierbarkeit im Falle größerer Lagerräume von Bedeutung.

Sowohl im Zuge der technischen als auch der wirtschaftlichen Bewertung werden persönliche Neigungen einbezogen. Mit dem Bewertungskriterium "persönliches Gefühl" soll jener Komponente Bedeutung verliehen werden, die sich einer qualitativen und quantitativen Bewertung entzieht. Durch einen geringen Anteil an der Gesamtgewichtung wird der Einfluss dieser intuitiv betonten Entscheidung reduziert. Mit großem Punktevorsprung werden Varianten bevorzugt, die sich durch die Versorgung der Austrageinheit mit Strömungsenergie auszeichnen.

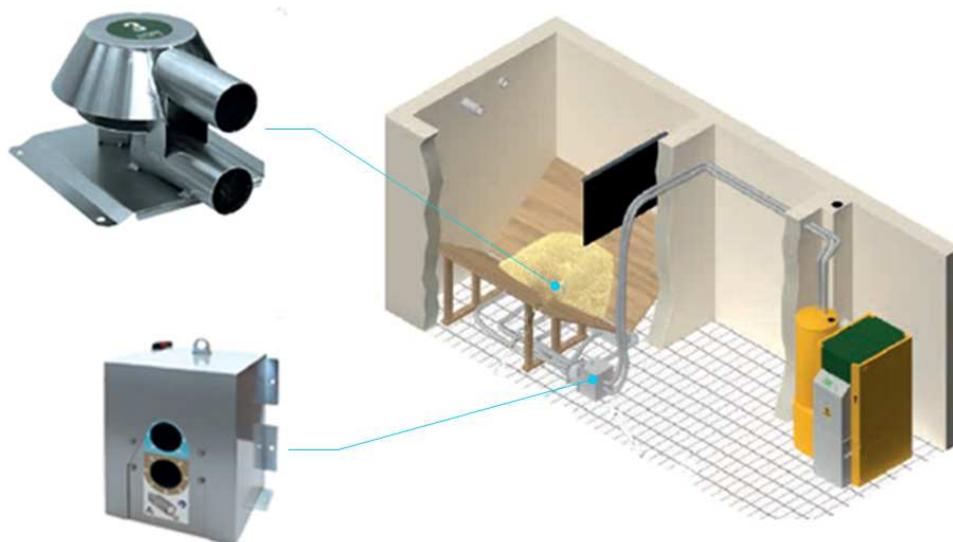
## 5 Ausarbeitung der Austrageinheit für Schüttgut

In diesem Abschnitt wird auf die Baustruktur und deren Festlegung in Form, Bemessung und Herstellung eingegangen. Dem vorangestellt finden sich die Grundlagen des Anwendungsumfeldes.

### 5.1 Grundlagen

#### 5.1.1 Pneumatische Förderanlagen im Heizungsschema

Im Abschnitt 3.2.2 wurde bereits eingehend auf die Eigenschaften und Vorzüge der pneumatischen Förderung eingegangen. Bedingt durch den einfachen Aufbau und den Entfall einer aufwendigen Aufgabereinheit am Beginn des Förderstranges, beispielsweise einer Zellenrad-schleuse, werden größtenteils Saugförderanlagen als Schnittstelle zwischen Heizungskessel und Brennstofflagerraum eingesetzt. Durch die Verwendung sogenannter Absaugsonden (vgl. Abschnitt 3.2.3) wird der Schüttgutabzug von mehreren, räumlich verteilten, Punkten innerhalb des Lagerraumes ermöglicht.



**Abb. 5-1 Pneumatische Saugförderanlage im Heizungsschema  
(l.o.: Absaugsonde, l.u.: Umschalteinheit) [7]**

In Abbildung 5-1 ist ein typisches System, bestehend aus Heizkessel und Austragung, dargestellt. Die, am unteren Ende des Schrägbodens angebrachten Absaugsonden, sind über je zwei flexible Schläuche mit der Umschalteinheit verbunden, von welcher wiederum zwei Schlauchverbindungen zur Saugturbinenstation geführt werden. Sind die Pellets im Wirkungsbereich der aktiven Sonde abgesaugt, wird der Schüttgutabzug mittels der Umschalteinheit automatisch

auf eine andere Sonde verlegt. So kann der Forderung nach einer beinahe restlosen Entleerung entsprochen werden. Die Funktion der Saugturbine wird anhand der Abbildung 5-2 verdeutlicht.



**Abb. 5-2 Heizkessel mit Tagesbehälter [7]**

Im abgedichteten Tagesbehälter wird durch die Saugturbine ein Unterdruck von rund  $0.05 - 0.35 \text{ bar}$  gebildet. Einer der beiden Schläuche fungiert als Verbindung zwischen Absaugsonde und Tagesbehälter, über diesen Unterdruckzweig werden Pellets aus dem Lageraum zum Behälter gefördert. Beim Eintritt des Gemisches aus Pellets und Luft, fallen die Partikel zu Boden und werden über eine Zellenradschleuse und die Förderschnecke der Verbrennung zugeführt. So werden die Pellets separiert und die verbleibende, staubbeladene Luft wird von der Turbine in den Überdruckzweig geleitet, welcher zum zweiten Anschluss der Absaugsonde geführt wird. Die eigenwillige Formgebung der Entnahmesonden ist der Funktion untergeordnet. Am unteren Ende des konischen Deckels wird die Rückluft des Überdruckzweiges eingeblasen, dies soll einer Brückenbildung bzw. Stopfern vorbeugen. Darunter befindet sich der Anschluss des Unterdruckzweiges, dort findet die Aufgabe der Pellets statt. Die Rückführung der Luft ist darüber hinaus notwendig, um eine Absaugung der Pellets aus dem, weithin als dicht angenommen, Lagerraum zu ermöglichen. Es wird ver-

sucht, über verschiedenste Gestaltungsansätze weitere Funktionen in die Sonden zu implementieren. Auf diese Weise kann beispielsweise der natürliche Schüttgutwinkel abgebaut werden. Bei den üblicherweise verwendeten Turbinen betragen die Volumenströme zwischen  $10 - 50 \text{ l/sec}$ , je nach Feststoffbeladung  $\mu$ , Druckverhältnissen und den Durchmessern des Leitungssystems.

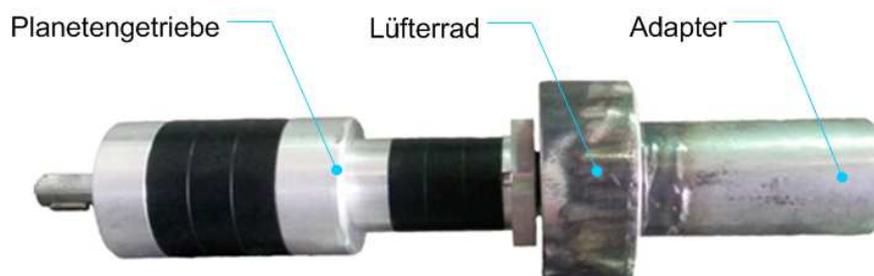
Pneumatische Saugförderanlagen stellen eine verbreitete Möglichkeit der Pelletförderung dar und sind weitestgehend wartungsfrei. Um die Lärmentwicklung zu begrenzen, werden die Turbinen meist akustisch abgeschirmt.

### 5.1.2 Vorversuche

Bevor die Nutzwertanalyse durchgeführt werden kann, muss der Entwicklungsgrad der verschiedenen Konzepte soweit fortgeschritten sein, dass eine technische und wirtschaftliche Bewertung möglich ist. Dies macht die Durchführung verschiedener Versuche im Vorfeld der Konzeptionsphase notwendig.

#### 1. Energieversorgung der Austrageinheit mittels Strömungsenergie

Dieser Test soll den Beweis für die grundsätzliche Durchführbarkeit der Wandlung von Strömungsenergie in Rotationsenergie an Bord der Austrageinheit bringen. Zur Bereitstellung der Luftströmung wird der Überdruckzweig der Saugturbine aus Abschnitt 5.1.1 herangezogen.



**Abb. 5-3 Planetengetriebe mit Lüfterrad und stufenförmigen Adapter**

In Abbildung 5-3 ist der grundsätzliche Aufbau dargestellt. Ein stufenförmiger Adapter bewerkstelligt den Übergang des Überdruckschlauchdurchmessers auf den Außendurchmesser des Lüfterrades. Dieses handelsübliche Rad eines Axiallüfters ist drehfest mit der Eingangswelle des mehrstufigen Planetengetriebes verbunden. Eine optimierte Variante in Bezug auf Strömungsverhältnisse zeigt Abbildung 5-4. Hier wird das Adapterstück konisch ausgeführt und der Ringspalt zwischen Lüfterrad und Gehäuse erheblich reduziert. Diese Maßnahmen zeigen eine deutliche Leistungssteigerung, was als Grundlage für eine Sensibilisierung bezüglich der strömungsgünstigen Ausführung gesehen wird.



**Abb. 5-4 Planetengetriebe mit Lüfterrad und konischem Adapter**

Eine pragmatische Methode zur Ermittlung des Abtriebsmomentes stellt der montierte Kragarm dar. An dessen Ende werden verschiedenen Massen angebracht und so auf das erbrachte Drehmoment rückgeschlossen. Mit der Untersetzung von 6000:1 bei einer gemessenen Eingangsdrehzahl von rund  $1200 \text{ U/min}$  ergaben sich Werte von bis zu  $50 \text{ Nm}$ . Das ist für die Funktionserfüllung der Austrageinheit, auch bei Reduktion der Untersetzung zugunsten erhöhter Abtriebsdrehzahl, ausreichend.

## 2. Strömungsverhalten in der Drehdurchführung bzw. des Ringspaltsegmentes

Die kontinuierliche Verbindung der Austrageinheit zur Saugturbinen über die flexiblen Schläuche macht eine Drehdurchführung unerlässlich. Würde sich die Austrageinheit bei fehlender Drehdurchführung um eine der eigenen Achsen drehen, käme es zur Verdrillung des Schlauches bzw. des Schlauchpaares. Die anspruchsvollere Zweischlauchlösung erfordert eine Mehrwegdrehdurchführung, deren Funktionsweise in Hinblick auf die strömungsoptimierte Gestaltung anhand eines Modells verifiziert wurde, siehe Abbildung 5-5. Zur Darstellung der Ein- und Zweischlauchvarianten sei auf Abschnitt 5.1.4 verwiesen. Die tatsächliche Umsetzung des Modells findet sich in Abbildung 5-11 wieder. Das Bauteil besteht aus zwei Rohren die einen Ringspalt bilden, welcher an einem Ende durch einen längsachsnormalen und am anderen Ende durch einen schrägen Blechzuschnitt abgeschlossen ist. In der Abbildung erfolgt die Anbindung an den Überdruckzweig der Saugturbinen am linken Stutzen, gegenüberliegend wird Luft entnommen und über das Lüfterrad gelei-



**Abb. 5-5 Modell der Mehrwegdrehdurchführung**

tet. In der umgesetzten Variante des Prototyps wird der linke Stutzen drehbar um die Mittelachse des Gebildes sein, somit bildet das Modell ein Worst-Case-Szenario ab, bei dem die Einströmöffnung gegenüberliegend der Ausströmöffnung liegt. Demnach wird der Luftstrom aufgeteilt und maximal umgelenkt. Trotz der scheinbar ungünstigen Form kann weiterhin ein Abtriebsmomente des Planetengetriebes im Bereich von rund 40 – 45 Nm ermittelt werden.

### 5.1.3 Versuchsaufbau

Zum Testen der Prototypen bzw. deren Baugruppen war eine entsprechende Umgebung von Nöten. Zu diesem Zwecke wurden ein Vorratsbehälterersatz sowie ein zugehöriges Versuchsbecken entworfen und gebaut.

#### 1. Vorratsbehälterersatz

Um eine gewisse Mobilität des Versuchsaufbaus zu wahren, wurden die notwendigen Komponenten transportfähig ausgeführt. Abbildung 5-6 zeigt die bewegliche Variante eines Tagesbehälters, bestehend aus einer 200 l fassenden Tonne und aufgesetzter Saugturbine. Am Ende des druckseitig befestigten Schlauches ist das Modell der Mehrwegdrehdurchführung mit einer Aufnahme für das Planetengetriebe inklusive Lüfterrad zu erkennen. Das Volumen des Pelletbehälters ist ausreichend um den durchgehenden Betrieb der Austrageinheit für rund 20 Minuten zu ermöglichen.

Für längeren Betrieb wird der Behälter an gegebener Stelle entleert und die Pellets erst nach Beendigung des Testlaufs wieder am Versuchsbecken aufgegeben. Die spätere Aufgabe der bereits geförderten Pellets soll eine Verfälschung der Testergebnisse durch Änderung der Rahmenbedingungen während des Testlaufs, wie Schütthöhe oder Oberflächenprofil, verhindern.



Abb. 5-6 Vorratsbehälterersatz

## 2. Versuchsbecken

Passend zum Vorratsbehälterersatz wird auch das Versuchsbecken transportfähig ausgeführt, siehe Abbildung 5-7. Der Aufbau bestehend aus Flachpaletten, Wandungen aus der Schalungstechnik und einem stabilisierenden Rahmen, erlaubt trotz der bescheidenen Erscheinung die aussagekräftige Durchführung der verschiedenen Versuche. Auf die Stahlflexhülle des Saugschlauches sowie den Federzug wird in Abschnitt 5.1.5 vertiefend eingegangen. In dieser Abbildung ist bereits die Anbindung an einen Prototypen zu erkennen, wobei die losen Enden der beiden Schläuche mit dem Vorratsbehälterersatz verbunden werden. Bei einer Grundfläche von  $1200 \times 1600 \text{ mm}$  kann eine maximale Füllhöhe von rund  $800 \text{ mm}$  realisiert werden, dies entspricht rund  $1.5 \text{ m}^3$  des Schüttgutes.



**Abb. 5-7 Versuchsbecken**

### 5.1.4 Versuchsablauf

Um in kurzer Zeit zu signifikanten Ergebnissen zu gelangen, werden vier Testszenarien durchlaufen. Diese Versuche charakterisieren die üblichen Zustände, welche sich während des Arbeitsablaufes der Austrageinheit ergeben. Durch Eingriff in den Ablauf können die Szenarien beliebig modifiziert und kombiniert werden. Die Anforderung nach Wartungsarmut bedeutet letztendlich auch, dass die Austrageinheit beim Befüllen des Brennstofflagers in beliebiger Position verharren darf. Demnach ist eine Art Parkposition, in die das Gerät manuell gebracht werden muss, unerwünscht. Dies erfordert die Durchführung eines Tests, in dem die Austrageinheit zur Gänze verschüttet wird, wobei die Tiefe variabel gestaltet werden kann. Bei kontinuierlichem Abzug von Pellets bildet sich dann ein Schüttgutkrater aus, in dessen Mitte sich die Austrageinheit befindet. Je nach Beschaffenheit des Gerätes sind nun folgende Fälle denkbar:

- Die Austrageinheit fährt den Krater nach oben und es setzt eine Oberflächenfahrt ein
- Die Austrageinheit ändert die vertikale Position nicht und eine Bodenfahrt setzt ein

In beiden Fällen besteht nach gegebener Zeit die Notwendigkeit, eine Ecke zu durchfahren. Je nach Testszenario ergeben sich verschiedene Massenströme, welche die Wirksamkeit der Ausräumwerkzeuge bzw. der gesamten Einheit quantifizieren.

### 1. Zuschütten

Hierbei wird die Austrageinheit am Boden des Behälters platziert und mit Pellets überhäuft. Die zusätzliche Gewichtskraft durch die Pellets, welche von oben auf die Austrageinheit wirkt, hemmt die Wirksamkeit von Ausräumwerkzeugen bzw. Antriebselementen. Zusätzlich muss darauf geachtet werden, dass die Struktur des Gerätes den erhöhten Kräften standhält. Die Austrageinheit ist nicht ausgelegt, um sich den Weg in Form eines Tunnels zu bahnen.

### 2. Oberflächenfahrt

Dieser Zustand kann sich nach der Zuschüttung, oder auch durch den Eingriff von Außen einstellen. Je nach Ausprägung gewisser Merkmale der Prototypen, kommt es dabei zu verschiedenen Bewegungsabläufen. Dies reicht von geradlinigen Bewegungen bis hin zu spiralförmigen Mustern. Wird die Austrageinheit von oben auf die Pellets gesetzt, kann durch das Eingraben auch eine Änderung der vertikalen Position eintreten.

### 3. Bodenfahrt

Derartige Bewegungsabläufe können sich nach einer Zuschüttung oder dem Eingraben einstellen. Wie bereits festgehalten wurde, entscheidet die Fahrstrategie wesentlich über den Entleerungsgrad bzw. die benötigte Zeit. Um verschiedene Bodenbeläge zu simulieren, werden die relativ glatten Pressholzplatten des Beckenbodens nach absolvierten Versuchen aufgeraut und die Versuchsreihe wiederholt.

### 4. Eckenfahrt

Je nach Grundriss des Lagerraumes zählt das Durchfahren vorhandener Ecken zu den Schlüsseleigenschaften der Austrageinheit und stellt zugleich eine große Herausforderung dar. Die Austrageinheit sollte dabei nicht kippen und zuverlässig mit dem Abtransport der Pellets fortfahren.

Nach erfolgten Veränderungen am Gerät wird der gesamte Versuchsablauf wieder durchlaufen. Die Optimierung hinsichtlich eines der Testszenarien wirkt sich teilweise negativ auf die verlässliche Erfüllung anderer Funktionen aus. Des Weiteren bedeuten optimierte Einzelabläufe keineswegs ein optimales Gesamtergebnis. Aus diesen Gründen sind nach vorangegangener Prüfung und Abschätzung immer wieder Kompromisse zu finden.

### 5.1.5 Funktionsweise und Voraussetzungen

Wie bereits Erwähnung fand, wird für die Energieversorgung der Austrageinheit die Strömungsenergie der Saugturbine herangezogen. Durch die kontinuierlich elastische Verbindung der Austrageinheit zur Turbine kann eine Übergabestation entfallen, was der Anforderung nach geringem Montage- und Inbetriebnahmeaufwand entspricht. Dies bietet, neben dem Wegfall einer elektrischen Energieversorgung, zusätzlich den Vorteil, dass die Saugturbine zum Standardrepertoire der Fa. KWB zählt. Die Strömungsenergie wird über das Lüfterrad und ein nachgeschaltetes Getriebe in mechanische Rotationsenergie umgeformt und von dort an die Antriebselemente und Ausräumwerkzeuge weitergeleitet. Die Fahrstrategie entspricht einer ungesteuerten Zufallsfahrt, Entleerungsdauer und -grad sind dabei stochastisch bestimmt. Dies soll einer effizienten Entleerung aber nicht im Wege stehen. Der Antrieb ist, bedingt durch die Kopplung an die Saugturbine, nicht in seiner Drehrichtung umschaltbar. Um dennoch die Durchfahrt einer Ecke zu erlauben, wird das Antriebsrad in einem gewissen Abstand zur vertikalen Symmetrieachse der Austrageinheit gesetzt. In Kombination einem, das Gerät umgebende horizontalen Ring, kann es sich aus einer Ecke "herausdrehen". Die zugrundeliegenden Überlegungen sind in Abschnitt 5.2.5 genauer angeführt. Durch die Funktionsweise des Antriebes ergibt sich ein spiralförmiger Fahrtweg der Austrageinheit. Ein idealer Entleerungsvorgang stellt sich nach zeitlichem Ablauf folgenderweise dar:

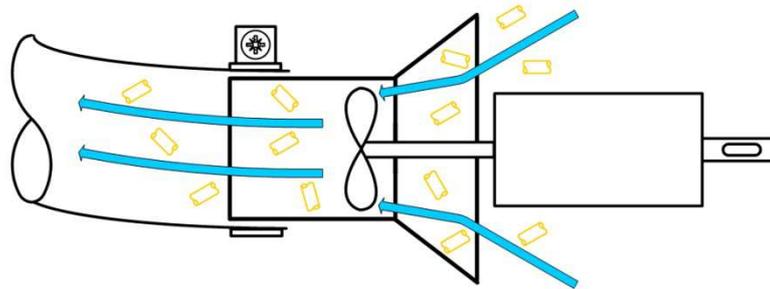
- Das Gerät verbleibt nach Entleerung und erneuter Füllung des Brennstofflagers an beliebiger Stelle
- Die Austrageinheit gräbt bzw. saugt sich "frei" d.h. es bildet sich ein örtlicher Krater
- Im spiralförmigen Muster wird der Boden abgefahren wobei die Kraterschrägen teilweise befahren werden und sich somit Änderungen der vertikalen Lage einstellen
- Das Gerät trifft nacheinander auf die Ecken, durchfährt diese allerdings zuverlässig

Die Verbindung in Form der Schläuche schränkt die Bewegungsfreiheit der Austrageinheit ein, dieser Effekt kann aber durch die Verwendung des Federzuges aus Abbildung 5-7 abgeschwächt werden. Dieser ist, in einem gewissen Bereich, auf die zu tragende Last einstellbar und nimmt so die Gewichtskraft der Schläuche auf, das wiederum entlastet die Austrageinheit. Der Bewegungsablauf in Kombination mit den angebrachten Schläuchen macht eine Drehdurchführung notwendig, welche die Drehbewegungen der Austrageinheit entkoppelt. So kann es zu keiner Verdrehung des Schlauchpaares kommen. Theoretisch wären Ein- und Zweischlauchvarianten denkbar. Die Verbindung durch die Schläuche bringt allenfalls den Vorteil, dass die Austrageinheit im Falle einer Störung in kurzer Zeit gefunden werden kann. Die ebenfalls in Abbildung 5-7 dargestellte Stahlflexhülle dient als Schutzumante-

lung des Schlauches beim Befüllen des Lagerraums. Die hohen Auftreffgeschwindigkeiten der Pellets könnten sonst die Zerstörung der Schläuche bewirken.

### 1. Einschlauchvariante

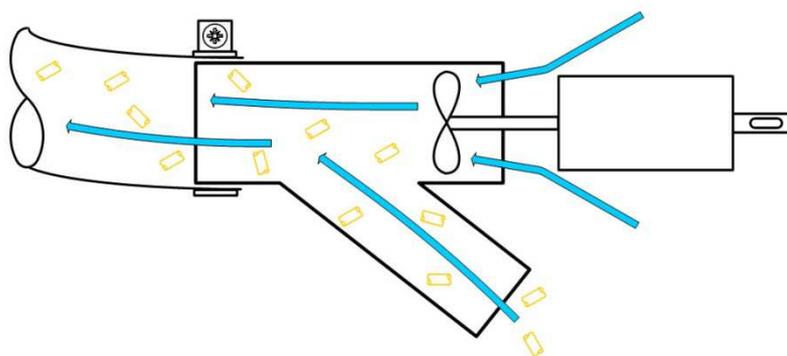
Diese stellt geringere Anforderungen an die Drehdurchführung bezüglich Entwurf und Fertigung dar, birgt jedoch Problematiken durch den Abtransport der Pellets über den Antriebszweig. Die staubbeladene Abluft des Überdruckzweiges der Saugturbine wird dabei an beliebiger Stelle in den Lagerraum eingeblasen, steht aber nicht in unmittelbarer Verbindung zur Austrageinheit. Pellets und Luft werden über den Unterdruckzweig angesaugt und müssen dabei das Lüfterrad passieren, siehe Abbildung 5-8. Folgende Schwierigkeiten können sich einstellen:



**Abb. 5-8 Einschlauchvariante**

- Stopfer blockieren das Lüfterrad, damit entfällt die Bewegung des Antriebs- bzw. Ausräumwerkzeuges und der Pellettransport könnte vollständig erliegen
- Die fehlende Auflockerungswirkung der Rückluft erhöht die Neigung zu Brückenbildung und Stopfern
- Der ständige Aufschlagen angesaugter Pellets würde das Lüfterrad aus Kunststoff nach kurzer Zeit zerstören

Eine weitere Möglichkeit bietet die Einschlauchvariante mit Bypass nach Abbildung 5-9.



**Abb. 5-9 Einschlauchvariante mit Bypass**

Dabei wird aufgrund des Aufbaus der Luftstrom im Unterdruckzweig zweigeteilt, somit kann die Pelletförderung über das Lüfterrad unterbunden werden. Diese Lösung bringt folgende Vor- bzw. Nachteile gegenüber der Variante ohne Bypass mit sich:

- Keine Schädigung des Lüfterrades. Das Eindringen von Pellets in den Lüfterradzweig muss unterbunden werden.
- Durch die Wahl verschiedener Durchmesser kann das Verhältnis der Geschwindigkeiten bzw. Volumenströme in den beiden Zweigen variiert werden.
- Sollte das Antriebsrad aufgrund mangelnder Leistung blockiert werden, beispielsweise im Szenario der Verschüttung, werden weiterhin Pellets abgesaugt. So kann auch das Antriebselement nach gegebener Zeit wieder bewegt werden.

## 2. Zweischlauchvariante

Wie bereits erwähnt, ist zur Umsetzung dieser Variante eine Mehrwegdrehdurchführung notwendig. Trotz des intensiveren Aufbaus wird diese Teillösung in die Prototypen implementiert. Überlegungen die hierzu führen sind:

- Die Luft des Überdruckzweiges ist lediglich staubbeladen und der Transport von Pellets über das filigrane Lüfterrad kann somit ausgeschlossen werden.
- Nachdem die Rückluft das Lüfterrad passiert hat, kann sie von beliebiger Stelle an Bord der Austrageinheit in das Schüttgut eingeblasen werden. Dies dient der Zerstörung von Schüttgutbrücken und kann zur zusätzlichen Zuführung von Pellets an die Absaugöffnung verwendet werden.
- Die örtliche Differenz zwischen Einblaspunkt der Rückluft und Entnahmepunkt der Pellets ist sehr viel geringer als bei den Einschlauchvarianten. Dies bringt geringere Werte der Feststoffbeladung, kleineren Druckverlust und damit höhere Strömungsgeschwindigkeiten im Schlauchsystem mit sich. So kann die Leistung der Antriebseinheit an Bord der Austrageinheit maximiert werden.

Trotz des vermeintlich reduzierten Pelletdurchsatzes, aufgrund geringerer Werte der Feststoffbeladung, können erhebliche Fördermengen erzielt werden.

## 5.2 Prototyp I

Die Entwicklung und Konstruktion von Prototyp I ist gekennzeichnet durch einen beträchtlichen Anteil der Phasen Planen und Konzipieren. Dies liegt zu einem großen Teil am anspruchsvollen Prozess der Informationsbeschaffung und deren Verarbeitung. Die wertvollen Erfahrungen, welche aus den Tätigkeiten rund um Prototyp I gewonnen werden konnten, reduzieren den zeitlichen Aufwand für diese Phasen bei Prototyp II erheblich.

Das Erstellen der Werkstättenzeichnungen und die Fertigung selbst sind zeitlich derart abgestimmt, dass keine Verzögerungen durch Lieferzeiten zustande kommen. Im konkreten Fall werden Laserzuschnitte und diverse Teile, die einer spanenden Fertigung bedürfen, im Vorfeld an externe Unternehmen vergeben. Sofern nicht eigens erwähnt, werden alle Bauteile aus handelsüblichen Stahl S235JR hergestellt.

### 5.2.1 Überblick

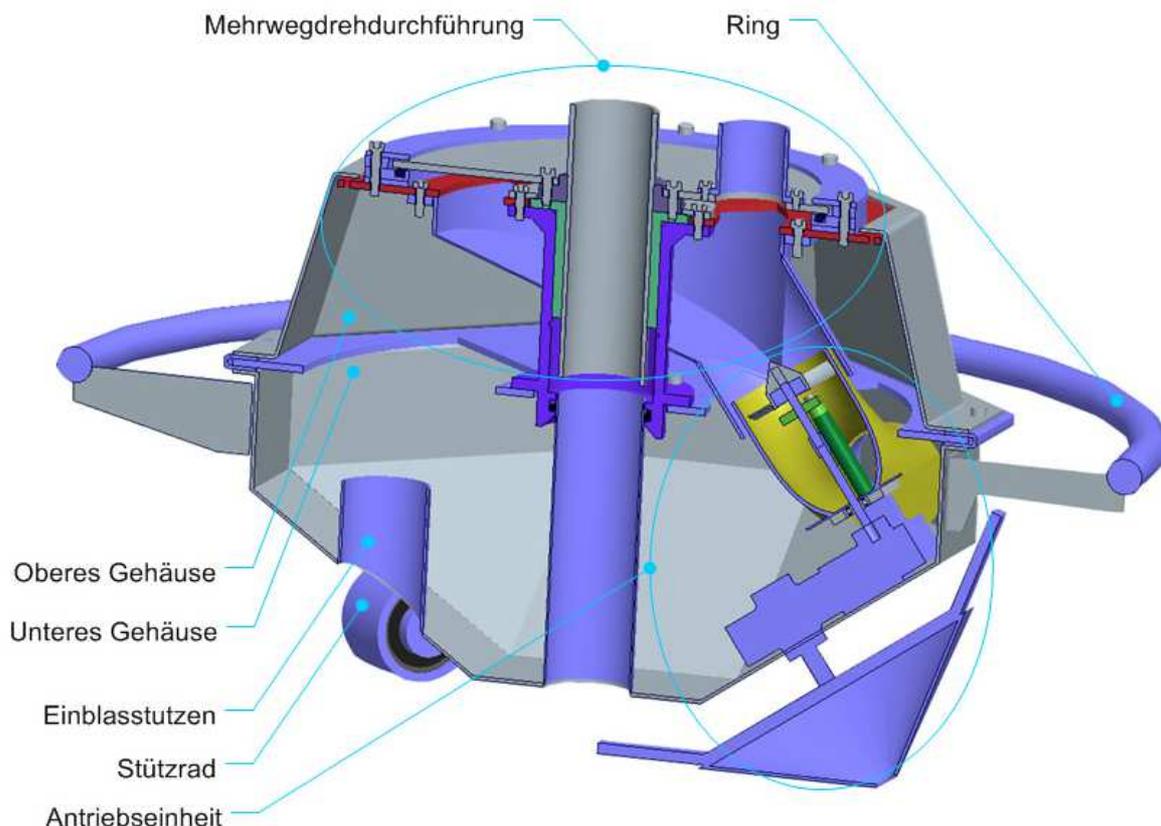


Abb. 5-10 Schnittansicht Prototyp I

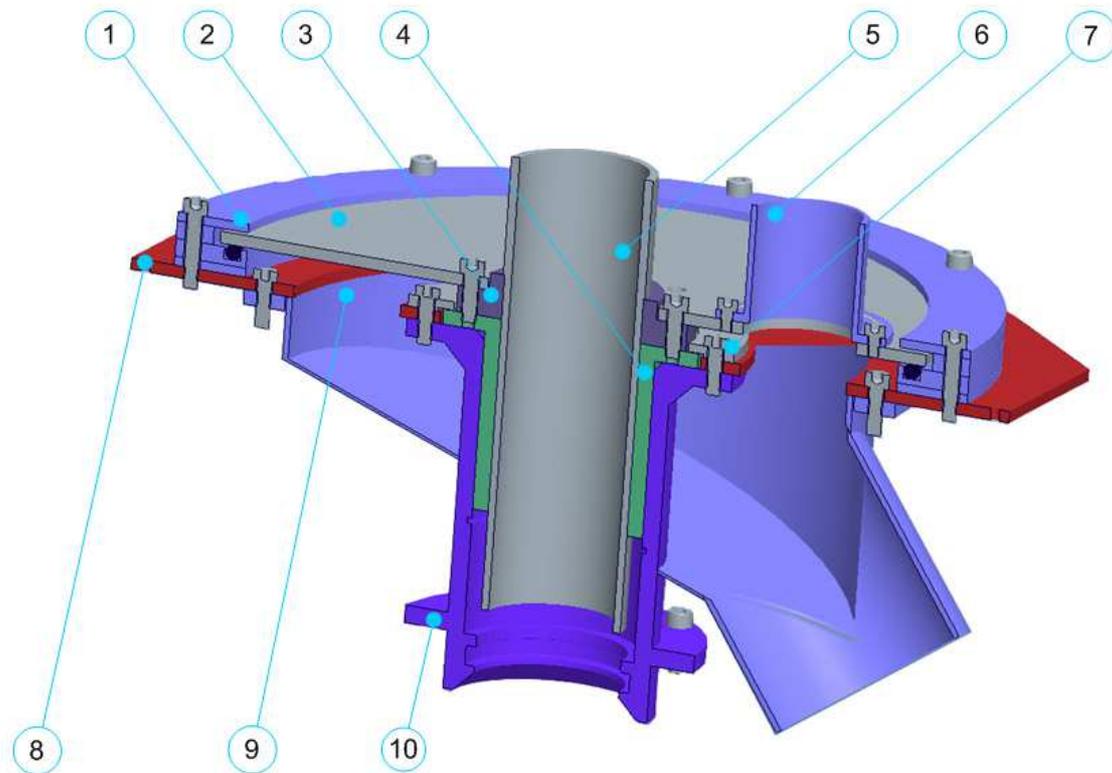
Abbildung 5-10 bietet einen Überblick in Form eines Schnittes durch die Austrageinheit. Die Darstellung ist nicht vollständig, da im Laufe der Weiterentwicklung bzw. Optimierung ständig Bauteile ergänzt und ausgetauscht werden. Sofern dies von Bedeutung für die Funkti-

onsweise bzw. das Verständnis ist, wird an gegebener Stelle im weiteren Verlauf dezidiert auf diese eingegangen. Oftmals ist ein allzu detailliertes Ausarbeiten von Werkstättenzeichnungen nicht hilfreich, da Materialien zur Herstellung nicht in den gewünschten Dimensionen lagern bzw. die benötigten Werkzeuge nicht vorhanden sind.

### 5.2.2 Mehrwegdrehdurchführung

Auf die Notwendigkeit der Drehdurchführung wurde bereits eingegangen. Die wichtigsten Aufgaben sind:

- Herstellung einer soliden Verbindung zwischen dem Schlauchpaar und der Austrageinheit
- Entkopplung allfälliger Drehbewegungen der Austrageinheit von dem Schlauchpaar
- Sicherstellung einer strömungsgünstigen Versorgung der Antriebseinheit mit Rückluft
- Vermeidung von Leckagen gegenüber der Umgebung
- Bildung einer zentralen Einheit, die als Plattform für das weitere Assembling der Austrageinheit dient



**Abb. 5-11 Mehrwegdrehdurchführung**

Damit stellt die Drehdurchführung, neben der Antriebseinheit, eine der wichtigsten Baugruppen dar. Nachstehend sind die Bauteile nach Nummerierung aus Abbildung 5-11 angeführt.

### 1. Ringverband

Dieser verhindert einerseits das ungewollte Austreten von Druckluft aus dem Ringspaltsegment (vgl. Punkt 9), andererseits das Eintreten von Fremdkörpern aus der Umgebung der Austrageinheit. Die metallischen Ringe des Verbandes nehmen einen Dichtungsring auf, welcher sich gegen die Rotationsscheibe (vgl. Punkt 2) stützt. Bedingt durch das thermische Trennen in der Herstellung weist diese Scheibe leichten Verzug auf, daher wurde in einer späteren Variante ein zweiter Dichtring an der Oberseite installiert. Kommt es zu einer Drehbewegung der Austrageinheit um die Vertikalachse, bleiben folgende Teile in Ruhe:

- Schlauchpaar
- Rotationsscheibe (vgl. Punkt 2)
- Zentralrohrflansch (vgl. Punkt 3)
- Gleitbuchse (vgl. Punkt 4)
- Oberes Zentralrohr (vgl. Punkt 5)
- Rückluftstutzen (vgl. Punkt 6)

Der Ringverband ist drehfest mit der Lochscheibe (vgl. Punkt 8) verschraubt.

### 2. Rotationsscheibe

Dieser Bauteil gleitet zwischen den Dichtringen des Ringverbandes (vgl. Punkt 1) und ist in seiner Mitte drehfest mit dem Zentralrohrflansch (vgl. Punkt 3) und der Gleitbuchse (vgl. Punkt 4) verbunden. Um die zentrische Bohrung zur Aufnahme des Zentralrohrflansches sind 8 Durchgangsbohrungen angeordnet.

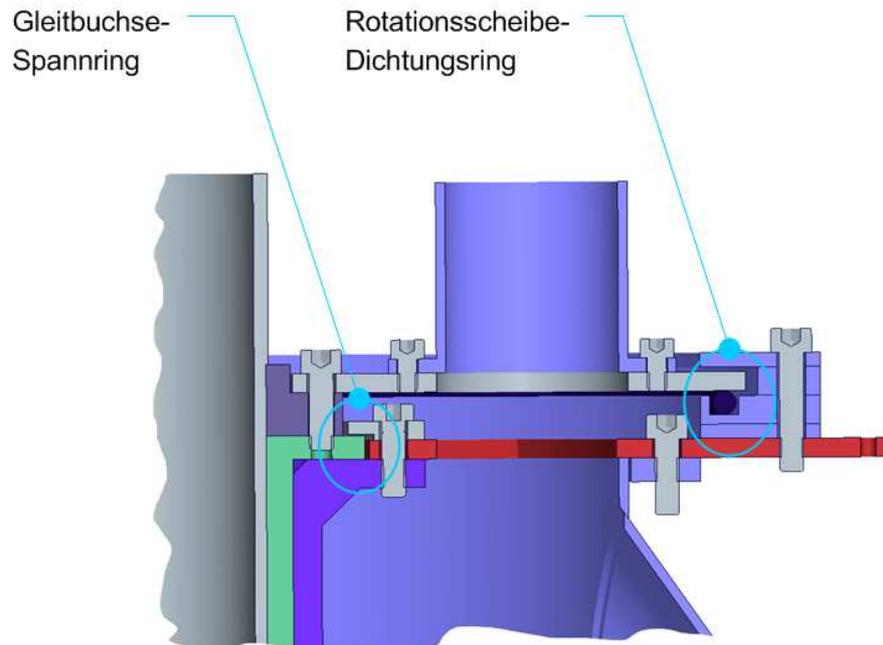
### 3. Zentralrohrflansch

Von den Acht Bohrungen am Umfang des Zentralrohrflansches sind Vier als Durchgangsbohrungen und die restlichen Vier mit Innengewinde ausgeführt. Mithilfe der Gewindebohrungen wird die Rotationsscheibe mit dem Flansch verbunden, die Schrauben der Durchgangslöcher ziehen die Gleitbuchse (vgl. Punkt 4) an den Flansch. Durch die geringe Einschraubtiefe wird die Gleitbuchse, wie auch der Flansch, auf das Zentralrohr (vgl. Punkt 5) gepresst.

### 4. Gleitbuchse

Die aus Polyoxymethylen (POM) gefertigte Buchse bewerkstelligt den reibungsarmen Übergang von den rotierenden Elementen zum stehenden System mittels Schmierfilm. Die Bauteile Schaft (vgl. Punkt 10) und Spannring (vgl. Punkt 7) sind miteinander verbunden und fixieren die Gleitbuchse in Ihrer Position. Kommt es zu einer Zugkraft in den Schläuchen,

wird diese an die Buchse übertragen und schließlich in den Spannring geleitet. Um die Drehbarkeit zu gewährleisten, muss der Spannring einen minimalen axialen Abstand zum Flansch der Buchse aufweisen, siehe Abbildung 5-12.



**Abb. 5-12 Detailansicht Drehdurchführung**

Dabei kommt es zu einer Doppelpassung in den Bereichen Gleitbuchse-Spannring bzw. Rotationsscheibe-Dichtungsring. Aufgrund der Elastizität der O-Ringe kann dies jedoch vernachlässigt werden und die Funktionalität ist gegeben.

#### 5. Oberes Zentralrohr

Dient als Träger für die beweglichen Bauteile und stellt die Anbindung an den Unterdruckschlauch zur Saugturbine her. In seinem Inneren werden Pellets im mit dem Luftstrom hinfort gerissen, nachdem diese am unteren Zentralrohr aus der Umgebung angesaugt wurden.

#### 6. Rückluftstutzen

Bietet die Anschlussmöglichkeit für den Schlauch der Rückluft und dreht mit der Rotationsscheibe um die gemeinsame Achse. Die Rückluft strömt dabei durch die Öffnungen der Lochscheibe (vgl. Punkt 8) in das Ringspaltsegment (vgl. Punkt 9).

#### 7. Spannring

Auf die Bedeutung des Spannringes wurde bereits eingegangen. Durch seine Befestigung wird die Lochscheibe am Schaft fixiert und die Gleitbuchse positioniert.

### 8. Lochscheibe

Durch die Öffnungen der Lochscheibe kann die Rückluft in beliebiger Position der Rotations-scheibe (vgl. Punkt 2) in das Ringspaltelement (vgl. Punkt 9) einströmen.

### 9. Ringspaltsegment

Das Modell zum Ringspaltsegment, mit dessen Hilfe die erbringbare Leistung in Bezug auf die Strömungsverhältnisse evaluiert wird, ist in Abbildung 5-5 dargestellt. Um die Montage am Schaft (vgl. Punkt 10) zu ermöglichen, muss das Segment teilbar gefertigt werden. Die Luft dringt durch den Rückluftstutzen (vgl. Punkt 6) ein und wird zur Auslassöffnung bzw. der Antriebseinheit geleitet

### 10. Schaft

Der massive Schaft stellt den zentralen Bauteil der Drehdurchführung dar. An seinem unteren Ende befindet sich eine Nut mit Dichtring zur Aufnahme des unteren Zentralrohres. Wie in Abbildung 5-10 erkennbar ist, wird so die Verlängerung des Absaugzweiges in der Austrageinheit bewerkstelligt. Am unteren Flansch des Schaft ist ein Blechteil befestigt, der die Austrageinheit horizontal nach zwei Hälften teilt. Der Flansch am oberen Ende dient der Befestigung zuvor thematisierter Bauteile.

In Abbildung 5-13 und 5-14 ist die zusammengesetzte Baugruppe nochmals dargestellt. Der grüne Rand in Abbildung 5-14 ist Teil einer Papierdichtung die zum Einstellen des Spaltmaßes zwischen Rotationsscheibe (vgl. Punkt 2) und den Dichtungsringen im Ringverband (vgl. Punkt 1) verwendet wird.

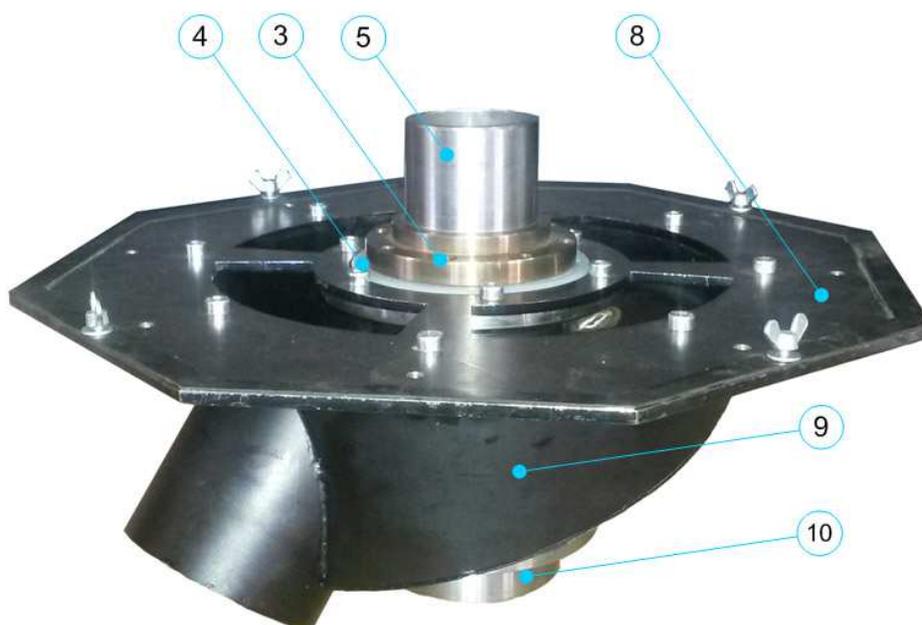


Abb. 5-13 Ausgeführte Drehdurchführung Ansicht 1

Diese Papierdichtungen sind als Bögen in verschiedenen Stärken erhältlich und beeinflussen die Anpressung der O-Ringe und damit die Gängigkeit der Drehdurchführung. Am seitlichen Rand der Rotations-scheibe (vgl. Punkt 8) ist eine Dichtung zu erkennen, welche bei Montage der oberen Gehäusehälfte angepresst wird. Die Schläuche werden mittels Schlauchklemmen am Rückluftstutzen (vgl. Punkt 6) und dem oberen Zentralrohr (vgl. Punkt 5) fixiert.

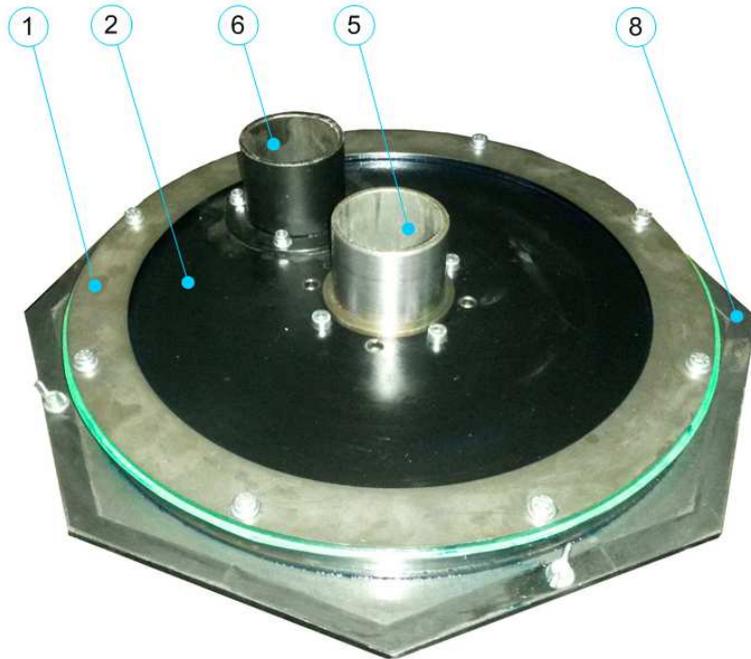


Abb. 5-14 Ausgeführte Drehdurchführung Ansicht 2

### 5.2.3 Antriebseinheit

Die wesentlichen Aufgaben der Antriebseinheit sind:

- Strömungsgünstige Führung der Druckluft über das Lüfterrad und weiter zum Einblasstutzen bzw. der Ausräumeinheit (vgl. Abschnitt 5.2.4)
- Wandlung der Strömungsenergie in Rotationsenergie
- Drehmomentwandlung im Getriebe zum Antrieb des Rades

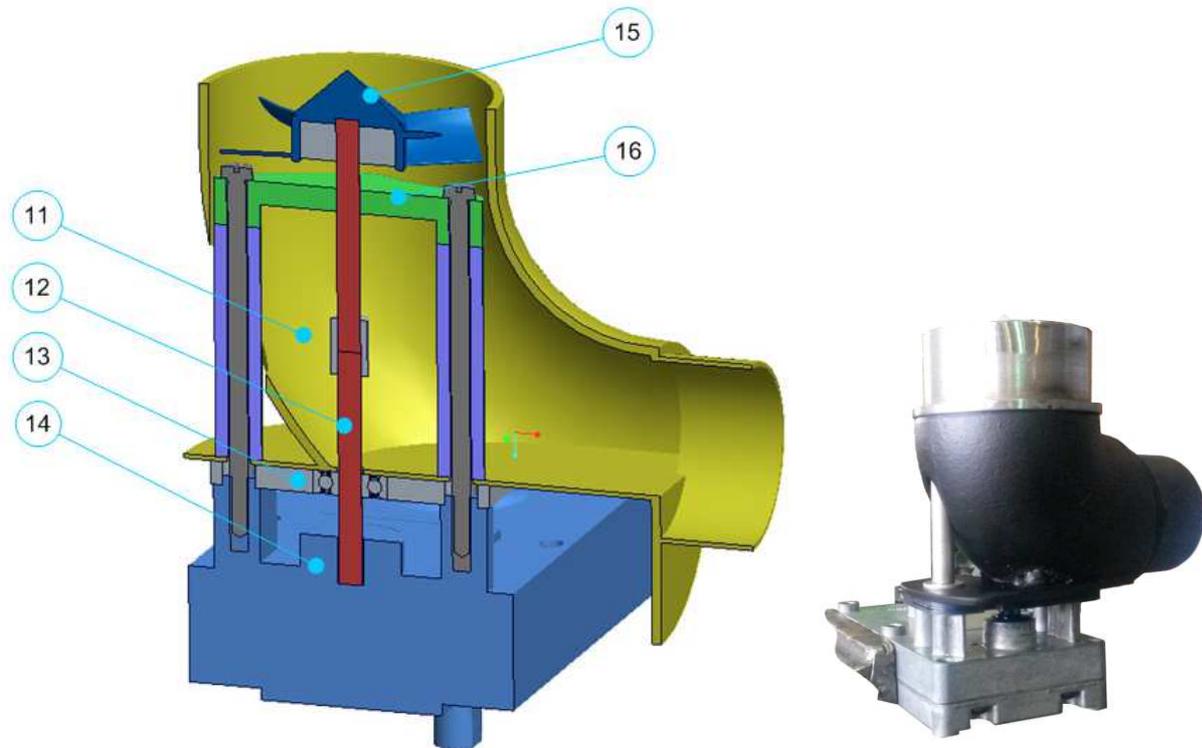
In Abbildung 5-15 sind die einzelnen Bauteile dargestellt. Grundlage für die Antriebseinheit bildet ein Getriebemotor aus dem Teilekatalog der Fa. KWB. Der Rotor und das Statorblechpaket wird entfernt und in adaptierter Form wieder verwendet.

### 11. Rohrbogen

Die Luft aus dem Ringspaltsegment (vgl. Punkt 9) wird in einem modifizierten 2" Rohrbogen über das Lüfterrad (vgl. Punkt 15) geleitet und versetzt dieses in Drehung. Am Ausgang des Bogens wird ein Schlauch befestigt, welcher die Luft zum Einblasstutzen aus Abbildung 5-10 leitet. Um die Bauhöhe zu reduzieren und eine ebene Fläche zur Montage am unteren Lagerschild (vgl. Punkt 13) zu schaffen, wurde der Rohrbogen wie in der Abbildung ersichtlich angepasst.

### 12. Getriebeeingangswelle

Die ursprüngliche Rotorwelle wurde verlängert, um das Lüfterrad in den Rohrbogen zu integrieren. Sie ist an der unteren Seite durch ein Wälzlager, oben durch ein Gleitlager in Form einer Messingbuchse gelagert. Das Axiallüfterrad wurde leicht aufgespresst und rotiert im Betrieb mit rund  $1200 \text{ U/min}$ .



**Abb. 5-15 Antriebseinheit ohne Rad (li.: 3D-CAD-Ansicht, re.: in natura)**

### 13. Unteres Lagerschild

Aus dem Statorblechpaket des ursprünglichen Gerätes kann das Lagerschild zur Aufnahme eines Wälzlagers gefertigt werden. Das Schild stützt sich an seiner Unterseite auf das Getriebe (vgl. Punkt 14) und nimmt an seiner Oberseite den modifizierten Rohrbogen auf.

### 14. Getriebe

Das Getriebe mit einer Untersetzung von  $4000:1$  bleibt unverändert. Es wird am unteren Gehäuse der Austrageinheit befestigt und das Antriebsrad an seiner Ausgangswelle montiert. Durch die, im Gegensatz zu den Vorversuchen, geänderte Übersetzung, ergibt sich ein neues Abtriebsmoment von rund  $30 \text{ Nm}$ .

### 15. Lüfterrad

Dieser Bauteil stammt aus einem Axiallüfter und wandelt die kinetische Energie des Fluidstromes in Rotationsenergie um.

## 16. Oberes Lagerschild

Das obere Lager des Getriebemotors nimmt in seiner ursprünglichen Konstellation die Rotorwelle auf und gewährt einen konstanten Ringspalt zwischen Rotor und Stator. In der adaptierten Variante muss das obere Lagerschild durch kleine Rohre angehoben werden, um das Fehlen der Statorbleche auszugleichen bzw. die Montage des Rohrbogens zu erlauben.

### 5.2.4 Ausräumeinheit

Die Ausräumeinheit ist in Abbildung 5-10 nicht enthalten und wird aufgrund der Ergebnisse aus dem Versuchsablauf (vgl. Abschnitt 5.2.6) entworfen und gebaut. In Abbildung 5-16 ist der prinzipielle Aufbau dargestellt. Die Ausräumeinheit wird mit der Abluft der Antriebseinheit versorgt und leitet die Luft ausgangsseitig zum Einblasstutzen weiter. Angedachter Zweck der Ausräumeinheit ist es ein Ausräumrad zu bewegen, welches nicht mit dem Antrieb der Austrageinheit in Verbindung steht. Sollte es zu einer Blockade des Antriebs kommen, beispielsweise durch zu große Gewichtskraft aufliegender Pellets, arbeitet das Ausräumrad ungehindert weiter und versorgt die Absaugvorrichtung der Austrageinheit weiter mit dem Schüttgut. Ist der Brennstoff örtlich abgesaugt und damit die hemmende Gewichtskraft reduziert, nimmt auch das Antriebsrad seine Funktion wieder auf.



**Abb. 5-16 Ausräumeinheit ohne Ausräumrad**

Als Basis dient ein Getriebemotor der Fa. KWB, welcher im Rahmen der Anforderungen entsprechend adaptiert wird.

## 17. Radiallüfter

Im Gegensatz zur Antriebseinheit wird bei der Ausräumereinheit ein Radiallüfter zur Wandlung der Strömungsenergie verwendet. In Richtung der Rotationsachse, am oberen Ende der

Einheit, befindet sich der Einlass für die, von der Antriebseinheit kommende, Druckluft. Der Luftstrom wird im Radialrad umgelenkt und verlässt das Gehäuse normal zur Einströmrichtung.

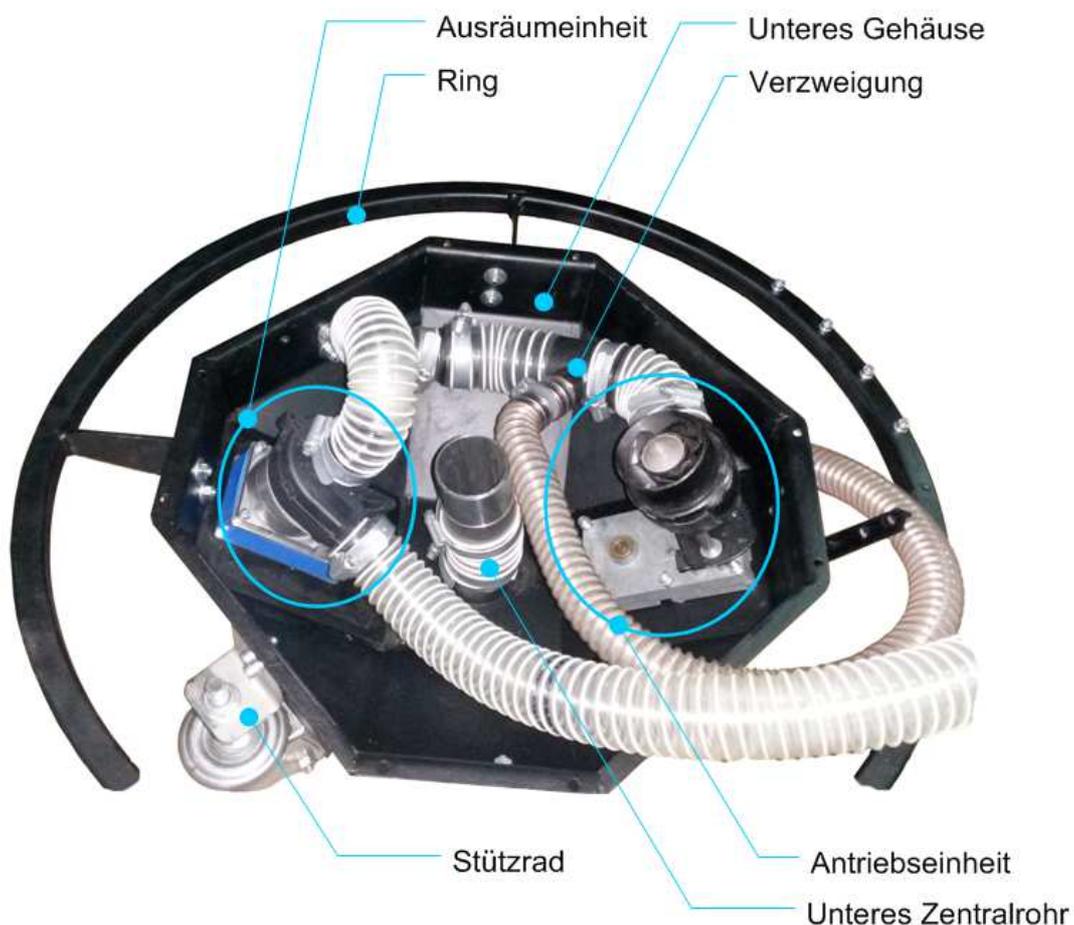
### 18. Lagerschilder

Diese nehmen ursprünglich den Stator und die Rotorwelle in zwei Wälzlagern auf. Durch den Wegfall des Stators kann die axiale Bauhöhe stark reduziert werden und die Eingangswelle bietet eine ideale Aufnahme für das Lüfterrad.

### 19. Getriebe

Das verwendete Getriebe bietet ein Abtriebsmoment von rund  $30 \text{ Nm}$  bei einer Untersetzung von 3500:1. Ausgangsseitig wurde ein Ausräumrad befestigt, siehe Abbildung 5-18.

Eine Übersicht der neuen Verhältnisse innerhalb der Austrageinheit bietet Abbildung 5-17. Es finden sich, zusätzlich zu den Teilen aus Abbildung 5-10, die Ausräumeinheit, Schlauchverzweigungen und ein flexibler Teil des unteren Zentralrohres.



**Abb. 5-17 Adaptierte untere Hälfte der Austrageinheit**

Folgt man der Rückluftströmung nach der Drehdurchführung, können folgende Stationen im unteren Bereich der Austrageinheit festgehalten werden:

- Durchströmen der Antriebseinheit welche die Fortbewegung der Austrageinheit bewerkstelligt
- Aufteilung des Luftstromes an der Verzweigung. Damit kann die Leistung der nachgeschalteten Ausräumeinheit beeinflusst werden bzw. steht ein zusätzlicher Luftstrom zur Auflockerung der Pellets zur Verfügung.
- Der Schlauchdurchmesser wird reduziert und die Strömung in den Radiallüfter der Ausräumeinheit geleitet. Diese treibt die Ausräumwerkzeuge an.
- Die verbleibende Restluft kann zum Auflockern der Pellets durch den Einblasstutzen geführt werden.

### 5.2.5 Weitere Bauteile

Aufgrund der Versuchserkenntnisse verändert sich die Erscheinung der Austrageinheit laufend. Bedeutende Bauteile, welche noch nicht explizit erwähnt wurden, sind in der Abbildung 5-18 dargestellt.

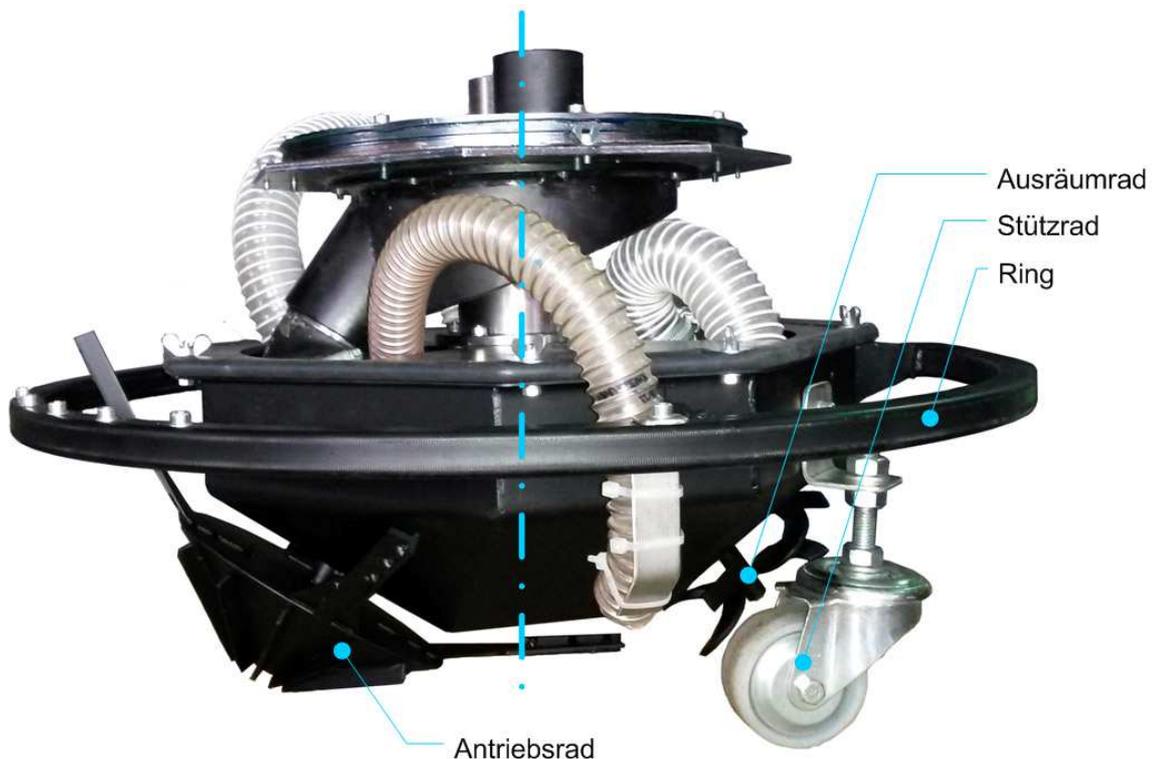
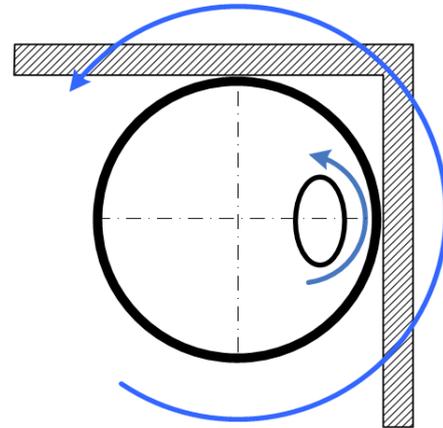


Abb. 5-18 Austrageinheit

### Antriebsrad und äußerer Ring

In Abschnitt 5.1.5 wurde bereits erwähnt, dass der Antrieb durch die grundlegende Funktionsweise in seiner Drehrichtung nicht umschaltbar ist. Dies macht für übliche Antriebskonzepte, beispielsweise symmetrischen Antrieb zweier Räder, die Durchfahrt einer Ecke sehr schwierig. Aus diesem Grund ist das Antriebsrad außerhalb der Drehmitte montiert und die Austrageinheit mit einem Ring ausgestattet, welcher den äußersten Bauteil des Gebildes darstellt. Abbildung 5-19 stellt diesen Verhalt in Draufsicht dar. Das schräg gestellte Antriebsrad erscheint elliptisch, die Drehrichtung wird durch den kleinen Pfeil angedeutet. Erreicht die Austrageinheit ein Hindernis, dreht Sie sich in Richtung des großen Pfeiles von diesem weg. Die Form und Lage des Antriebsrades ergibt sich aus einem Kompromiss von Kippneigung, Baugröße und Traktion. Folgende Tendenzen und Erkenntnisse können festgehalten werden:



**Abb. 5-19 Draufsicht Eckenfahrt**

- Die Schrägstellung des unteren Gehäuses, und damit der Antriebsradachse, ist durch den Schüttgutwinkel der Pellets definiert. Dies soll das selbstständige Nachfließen des Brennstoffes in Richtung des Absaugpunktes am Ende des unteren Zentralrohres ermöglichen. Konstruktive Maßnahmen in Inneren der Austrageinheit lassen den Winkel, abweichend vom Idealwert, etwas flacher ausfallen. Durch die auflockernde Wirkung der Antriebs- bzw. Ausräumräder sowie der eingeblasenen Rückluft, stellt dies keinen Nachteil dar und das Schüttgut fließt beinahe ungehindert nach.
- Die Kippneigung der gesamten Ausräumeinheit steigt mit abnehmendem Radabstand von der vertikalen Drehmitte.
- Mit wachsendem Radabstand nimmt die Baugröße und Masse der Austrageinheit bzw. des Antriebsrades zu. Jene Ausräumarme, die am Antriebsrad befestigt sind, erreichen den Absaugpunkt nicht mehr und die Gefahr der Brückenbildung bzw. Stopferneigung steigt an. Die gesteigerten Abmaße des Antriebsrades in Verbindung mit der zusätzlichen Masse bewirken zusätzlichen Leistungsbedarf um die Einheit voran zu bewegen.
- Sowohl für das Antriebsrad als auch das Ausräumrad gilt, dass gesteigerte Größe die umgewälzte Menge an Pellets erhöht. Dies erklärt den erhöhten Leistungsbedarf.

### Ausräumrad und Stützräder

Das Ausräumrad wird als Teil der Ausräumeinheit mit dem Getriebe verbunden und an der Außenseite des unteren Gehäuses befestigt. Durch das ständige Umwälzen der Pellets kommt es zur Reduktion des Schüttgutwinkels und Pellets werden zur Absaugöffnung gefördert. Um den Kontakt des Ausräumrades mit dem Boden des Versuchsbeckens zu vermeiden, werden Abstützpunkte in Form von höhenverstellbaren Nachlaufrädern vorgesehen. Im Gegensatz zu starren Rädern stört das drehbare Pendant den Bewegungsablauf der Austrageinheit nicht. Die optische Erscheinung des Ausräumrades wird durch zwei Schneckenwendeln geprägt, welche drehsymmetrisch um ein Rohr angeordnet sind.

### 5.2.6 Versuchsergebnisse

In Abschnitt 5.1.4 wurden die verschiedenen Testszenarien bereits eingehend erklärt. Diese wurden nach Änderungen an der Austrageinheit wiederum vollständig durchlaufen, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Erst die Fixierung aller übrigen Parameter erlaubt es, denn Einfluss einer Änderung zu erfassen. Dies stellt sich durch unbekannte Zusammenhänge und gegenseitige Beeinflussung teilweise als problematisch dar. In diesem Abschnitt werden die markanten Ergebnisse festgehalten und das zugrundeliegende Ursache-Wirkungs-Prinzip erklärt.

#### 1. Aufstandsfläche der Austrageinheit

Im Besonderen die Ergebnisse der Oberflächenfahrt verweisen auf Probleme im Zusammenhang mit der Größe der Austrageinheit. Die Aufstandsfläche des unteren Gehäuses und des äußeren Rings behindern das Eingraben der Austrageinheit im Schüttguthaufen. Wird die Saugturbine und damit die Antriebseinheit aktiviert, bildet sich unter der Absaugöffnung ein Hohlraum aus. Die Ausräumarme des Antriebsrades führen Pellets lediglich in unzureichenden Mengen heran. Zur Verbesserung wird der äußere Ring durch eine eingerollte Welle mit einem Durchmesser von 10 mm ersetzt und die Austrageinheit um die Ausräumeinheit erweitert. Die Wirkung des Ausräumrades wird durch verschiedene Ausführungen fortlaufend verbessert und somit können genügend Pellets umgewälzt und schließlich abgesaugt werden. Je nach Bodenbeschaffenheit des Versuchsbeckens muss das Antriebsrad mit verschiedenen Oberflächen ausgestattet werden, um effektiven Vortrieb zu ermöglichen. Geschliffene Estriche erfordern gummierte Räder, raue Betonböden erzwingen den Einsatz stark profilierter Elemente die dazu neigen, sich im Relief des Untergrundes zu verhaken. Dabei ist auf eine gewisse Toleranz des Radprofils zu achten, da es Pellets beim Überfahren aufnehmen muss, um nicht wirkungslos auf der rollenähnlichen Form der Brennstoffpartikel zu "wälzen".

## 2. Masse und deren Wirkung auf das Bewegungsverhalten

Die Eigenmasse des Prototyps I beträgt rund  $15\text{ kg}$  und fordert weitere Abstimmung und Kompromisslösungen. Bei abnehmender Eigenmasse nimmt der Einfluss des Schlauchpaares auf die Bewegungsabläufe der Austrageinheit zu, andererseits hemmt steigendes Gewicht den Antrieb. Um die zusätzliche Gewichtskraft der Pellets beim Testszenario der Zuschüttung aufzunehmen, werden Stützräder montiert. Diese entlasten den Antrieb und erlauben es, das Antriebsrad auch unter der Pelletsoberfläche zu drehen. Kommt es zur Bodenfahrt, wirken diese Stützräder aber eher hinderlich auf den gesamten Bewegungsablauf. Abbildung 5-20 zeigt die Austrageinheit ohne Drehdurchführung und oberes Gehäuse, um den Einfluss der Masse bei Oberflächenfahrt abzuschätzen. Des Weiteren sind die geänderten Formen des Ringes und des Antriebsrades zu erkennen. Durch die reduzierte Masse der Austrageinheit gelingt es nicht, den Federzug zu betätigen und das Fahrzeug wird in Abhängigkeit der Schläuche kippelig. Wird die Rückzugskraft des Zuges weiter reduziert, um die freie Bewegung zu ermöglichen, verbessert sich dieses Verhalten geringfügig.



**Abb. 5-20 Prototyp I ohne oberen Aufbau**

## 3. Verunreinigungen

Im Hinblick auf die geforderte Haltbarkeit liegt das Augenmerk bei der staubbeladenen Luft, welche aus dem Rückluftzweig der Saugturbine die Austrageinheit durchströmt. Abrieb und Staub der Pellets legt sich an beweglichen Teilen der Drehdurchführung, der Antriebseinheit und der Ausräumeinheit ab. In Abbildung 5-21 ist dies am Beispiel der Antriebseinheit dargestellt. Die Blickrichtung ist hier entgegen der Strömungsrichtung hin zum oberen Lagerschild.

Wie zu erwarten kommt es an ungünstigen Stellen, beispielsweise bei Strömungsabriss entlang der Kontur, zu erheblichen Ablagerungen. Die verschleißende Wirkung des Pelletstaubes ist unter Heizungsherstellern hinlänglich bekannt, dies äußert sich in der robusten und einfachen Bauweise der verbreiteten Austragungssysteme. Die Abdichtung der Austrageinheit gegenüber dem Brennstoff aus der Umgebung stellt hingegen kein Problem dar. Beim Prototyp I wurde dies durch Dichtlippen entlang der horizontalen Trennebenen zwischen unterem und oberem Gehäuse sowie oberem Gehäuse und Drehdurchführung realisiert.



**Abb. 5-21 Staubablagerungen**

#### 4. Leistung in Abhängigkeit der Strömungsverhältnisse

Durch die serielle Verschaltung der Antriebs- und Ausräumeinheit beeinflussen sich diese in Abhängigkeit der Lastfälle bzw. weiterer Umstände gegenseitig. Die, der Antriebseinheit nachgelagerte Verzweigung aus Abbildung 5-17 erlaubt es, die Leistung der Ausräumeinheit zu beeinflussen und stellt, neben dem Einblasstutzen, einen zusätzlichen Luftstrom zur Umwälzung von Pellets zur Verfügung. Würde der höchst unwahrscheinliche Fall eintreten, dass es zum vollkommenen Verschluss des Einblasstutzens kommt, wären Antriebs- und Ausräumrad ohne die Abzweigung bewegungslos. Der entnommene Luftstrom bewirkt, dass zumindest die Antriebseinheit weiterhin die angedachte Funktion erfüllen kann. Der gesamte Strang ist als abwürgefest zu betrachten, da ein Stillstand von einer der beiden Einheiten nicht das Erliegen der Strömung bedeutet. In den Versuchen zeigt sich, dass die Ausräumeinheit durch zu hohen Leistungsbedarf aufgrund äußerer Umstände praktisch niemals vollständig blockiert. Werden beide Einheiten gezielt mechanisch blockiert, wie es theoretisch beim Zuschütten passieren kann, bildet sich durch das Absaugen ein Krater und die Räder können spätestens dann wieder frei drehen.

#### 5. Ergebnisse der einzelnen Testszenarien

Grundsätzlich können die verschiedenen Versuchsabläufe (vgl. Abschnitt 5.1.4) zufriedenstellend absolviert werden. Die Austrageinheit verharrt beim zugeschütteten Zustand in der ursprünglichen Position und es bildet sich ein Schüttgutkrater aus, von dem aus eine spiralförmige Fahrt einsetzt. Im Falle der Oberflächenfahrt kann mit variablen Zusatzgewichten eine Tendenz zum Eingraben oder der Bewegung an der Oberfläche eingestellt werden. Der Umfang erkennbarer Verbesserungen im Verhalten der Austrageinheit nimmt mit voranschreitender Anzahl der Optimierungsschleifen ab. Anders ausgedrückt ist nach ausführli-

chen Tests das Ende möglicher Verbesserungen auf Grundlage von Prototyp I erreicht. Je nach Szenario können Pelletsmengen im Bereich von  $3 - 5 \text{ kg/min}$  abtransportiert werden, dies entspricht den üblichen Werten einer Absaugsonde (vgl. Abschnitt 5.1.1).

Erkenntnisse, welche anhand der Tests mit dem Prototyp I gewonnen werden konnten, führen schließlich zu einer Anpassungskonstruktion (Prototyp II).

### 5.3 Prototyp II

Nach [9] besteht eine Anpassungskonstruktion aus den Konstruktionsphasen des Entwurfes und der Ausarbeitung. Durch die Versuche mit Prototyp I sind höherwertige Information generiert worden, welche die Schwachstellen der Lösung klar aufzeigen. Im Besonderen betrifft dies:

- Ungelöster Gewichtskompromiss der Austrageinheit
- Die Struktur bzw. die große Aufstandsfläche der Austrageinheit ermöglicht nur beschränktes Nachfließen der darüber liegenden Pellets im zugeschütteten Zustand
- Die Eckenfahrt gestaltet sich teilweise schwierig

#### 5.3.1 Überblick und Bauteile

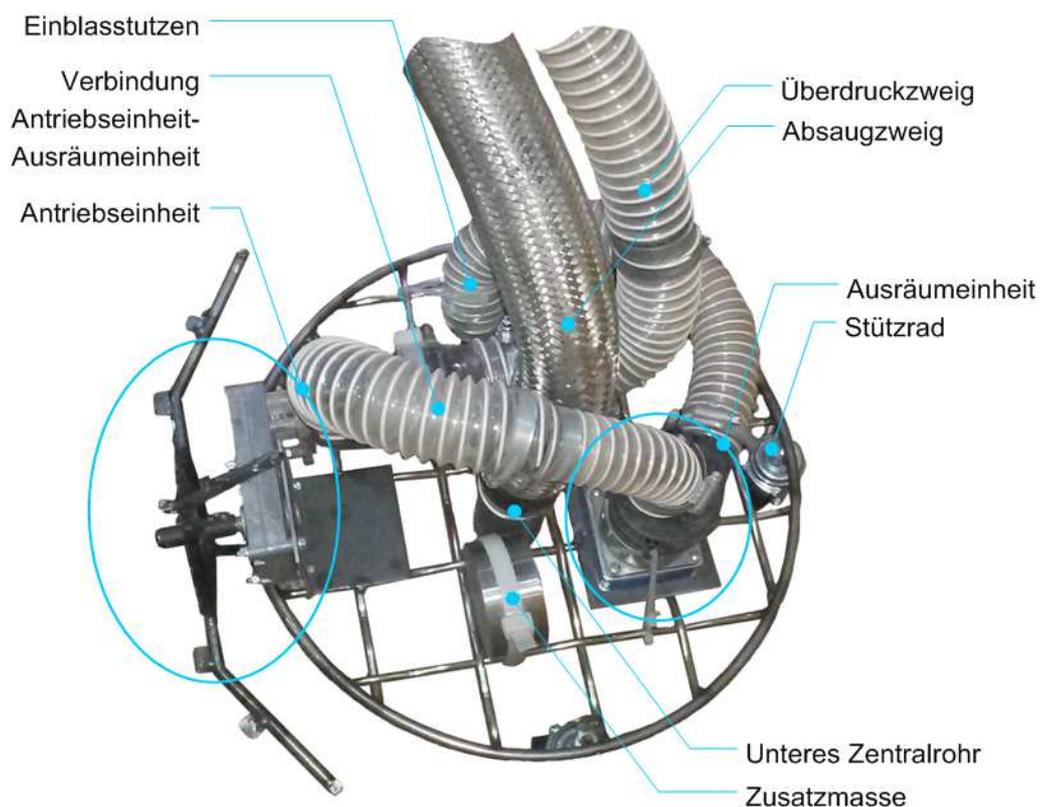


Abb. 5-22 Prototyp II

Dieser Prototyp entsteht in sehr kurzer Zeit und sein Aufbau ist das Resultat der vorangegangenen Versuche. Die Basis zur Aufnahme der weiteren Baugruppen bildet ein schlichtes Drahtgitter aus rostfreiem Stahl, das von einem äußeren Ring umschlossen wird. Folgt man der Strömungsrichtung des Überdruckzweiges anhand von Abbildung 5-22, können folgende Stationen festgehalten werden.

#### Überdruckzweig und Antriebseinheit

Die staubbeladene Luft der Saugturbine strömt durch den flexiblen Schlauch über das Lüfterrad der Antriebseinheit, welches das Antriebsrad bewegt. Dieses weist eine neue Form auf, welche den Leistungsaufwand zum Umwälzen der Pellets erheblich reduziert. Somit steht mehr Leistung für den eigentlichen Antrieb der Austrageinheit zur Verfügung. Über die Verbindung und eine Reduktion des lichten Schlauchdurchmessers auf 40 mm gelangt die Luft zur Ausräumeinheit, die das Ausräumrad antreibt. Danach verlässt die Luft den Prototypen und wird durch den Einblasstutzen ins Schüttgut geleitet.

#### Drehdurchführung

Für die Versuche wird auf eine Drehdurchführung verzichtet und deren Fehlen durch variable Zusatzmassen teilweise kompensiert. Für weiterführende Testreihen ist eine Mehrwegdrehdurchführung zu konstruieren, die sich durch niedrige Bauhöhe, leichtgängige Betätigung und Verschmutzungstoleranz auszeichnet. Die geringe Bauhöhe zur Vermeidung von Kippbewegungen steht allerdings im Gegensatz zu einer strömungsgünstigen Führung der Rückluft im Inneren der Durchführung.

#### Weitere Bauteile

Das Gehäuse des Prototypen I ist gänzlich durch das Drahtgitter ersetzt, welches sich in allen vier Testszenarien bewährt. Dadurch kann Schüttgut von oben, zum Beispiel im verschütteten Zustand, ohne großen Widerstand zur Absaugöffnung gelangen. Durch die verstellbaren Stützräder wird ein Kontakt des Ausräumrades mit dem Boden verhindert und ein abwürgen ist somit unmöglich.

### 5.3.2 Versuchsergebnisse

Die Effektivität in den einzelnen Testszenarien konnte gegenüber dem Prototyp I wesentlich gesteigert werden. Die großzügig reduzierte Aufstandsfläche erlaubt gleichmäßige Massenströme durch das ungehinderte Nachfließen des zu fördernden Brennstoffs. Dabei können Werte von 5 – 7 kg/min erreicht werden. Die grundsätzlichen Charakteristika der Bewegung entsprechen denen der ersten Entwicklung und durch die variablen Massen kann das Ver-

halten adaptiert werden. Beim Durchfahren der Ecke in Bodennähe reduziert sich der geförderte Massenstrom auf ein Minimum, jedoch werden diese Schlüsselstellen in relativ kurzer Zeit, rund 20 Sekunden, absolviert. Der äußerst bescheidene Aufbau bedeutet geringe Material- und Fertigungskosten. Die nächsten Schritte zur Verbesserung von Prototyp II sind:

- Entwicklung und Konstruktion einer Drehdurchführung unter den oben genannten Prämissen (vgl. Abschnitt 5.3.1) sowie deren Einbau in der Austrageinheit. Die Größe der Durchführung ergibt sich dabei als Kompromiss zwischen einer strömungsgünstigen Luftführung sowie der ungezwungenen Bewegung des Brennstoffs zum Absaugpunkt. Durch zu große Abmaße wird das Nachfließen der Pelletpartikel gehemmt.
- Verbesserung der Schlauchnachführung bei Maximierung des Einsatzradius der Austrageinheit. Dabei sind die Möglichkeiten eines, an der Decke montierten, Schienensystems in Verbindung mit Federzügen zu bedenken.
- Vorangegangener Punkt erfordert den Bau einer vergrößerten Testumgebung mit gegebener Kapazität.
- Verbesserung der einzelnen Bauteile und deren Gesamtheit in Hinblick auf die einzelnen Testszenarien sowie die technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit. Insbesondere betrifft dies Antriebs- und Ausräumeinheit sowie Drehdurchführung.
- Reduktion der Schlauchlängen an Bord der Austrageinheit und Begünstigung eines kompakten Aufbaus.
- Das gesamte Konzept muss Verschmutzungstoleranter ausgeführt werden. Dies erfordert wohldefinierte Dichtungsmethoden.
- Testen der Stahlflexhülle im Anwendungsumfeld

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die, anhand der beiden Prototypen, gewonnenen Versuchsergebnisse wurde die Realisierbarkeit einer rein pneumatisch betriebenen Austrageinheit bewiesen. Grundlegende Voraussetzung hierfür war die Einhaltung einer strukturierten und genormten Entwicklungsmethodik. Auf Basis der daraus gewonnenen Konzepte bzw. nach deren Bewertung, konnte ein technisches Gebilde entstehen, das die Herstellungskosten von marktüblichen hybriden Lösungen deutlich unterschreitet. Denen gegenüber kann, neben dem Betrieb im zugeschütteten Zustand, der Entfall einer Energieversorgung durch Elektrizität als zusätzlicher Vorteil verbucht werden. Durch anwendungsorientierte Versuchsszenarien wurde die Austrageinheit nach und nach hinsichtlich der Praxistauglichkeit optimiert. Problematiken der Verschmutzung, einhergehenden Leistungs- und Dichtungsverlusten, sowie einer stochastisch bestimmter Fahrstrategie bleiben jedoch erhalten.

Ein Benchmark mit erhältlichen Produkten von Mitbewerbern zeigt, dass der Prototyp II für das frühe Entwicklungsstadium den Vergleich nicht zu scheuen braucht und auch Baugruppen zielführend, aber anderweitig, verwendet werden können. So sind beispielsweise Pellet-tanks erhältlich, die zum Abbau des Schüttgutwinkels elektrische betriebene Rührwerkzeuge am unteren Ende des Abzugbereiches aufweisen. Die Silowände werden dort konisch zusammengeführt und die nachfließenden Pellets über ein pneumatisches Fördersystem abtransportiert. Die Antriebseinheit der beiden Prototypen könnte hier als Alternative zum elektrischen Antrieb der Rührwerkzeuge eingesetzt werden.

Die logische Entwicklung führt hin zu hybriden Bauweisen, die sich sowohl der elektrischen Energie als auch einer Kopplung mit der Saugturbine bedienen. Bezüglich der denkbaren Möglichkeiten, beispielsweise Fahrstrategie und Ausstattungsmerkmale, können diese wesentlich variantenreicher ausfallen.

## 7 Verzeichnis

### 7.1 Quellenverzeichnis

[1] Böge, Alfred: Handbuch Maschinenbau, Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbautechnik

8. Auflage; Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

[2] Danzer, Hans Heinz: Vorlesungsskript TUGraz

[3] Döring, Stefan: Pellets als Energieträger, Technologie und Anwendung

Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011

[4] Eversheim, Walter et al.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung

Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005

[5] Kaltschmitt, Martin: Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren

2. Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001, 2009, korrigierter Nachdruck 2009

[6] Kraume, Matthias: Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik, Grundlagen und apparative Umsetzungen

2. Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

[7] KWB Kraft und Wärme aus Biomasse: [www.KWB.at](http://www.KWB.at)

Entnommen 2014

[8] Martin, Heinrich et al.: Materialflusstechnik, Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen der Fördertechnik

9.Auflage; Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008

[9] Niemann, Gustav: Maschinenelemente, Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen

4. Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1982, 1990, 2002, 2005

[10] Pahl, Gerhard et al.: Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung

7. Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003, 2005, 2007

[11] Pahl, Gerhard et al.: Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung  
Methoden und Anwendung

8. Auflage;

[12] Pelletshome: [www.pelletshome.com/pellets-oenorm](http://www.pelletshome.com/pellets-oenorm)

[13] Schulze, Dietmar: Pulver und Schüttgüter, Fließeigenschaften und Handhabung  
2. Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006, 2009

[14] Statistik Austria: [www.statistik.at](http://www.statistik.at)

## 7.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1 TOTE - Einheit .....	5
Abb. 2-2 Informationsumsatz mit Iterationsschleife.....	7
Abb. 2-3 Funktionsstruktur durch Aufgliedern einer Gesamtfunktion in Teilfunktionen.....	9
Abb. 2-4 Erfüllung von Teilfunktionen durch Wirkprinzipien .....	10
Abb. 2-5 Systemzusammenhang.....	11
Abb. 2-6 Zusammenhänge der Strukturen eines technischen Systems .....	11
Abb. 2-7 VDI 2222 mit den einzelnen Phasen einer Konstruktion [9, S.5].....	12
Abb. 2-8 Lebenszyklus eines Produkts [10, S.98].....	14
Abb. 2-9 Zuordnung der Konstruktionsarten zu den Konstruktionsphasen. [9, S.12].....	18
Abb. 2-10 Ordnungsschemata: Wirkprinzipien zum Erfüllen der Funktion "Energie speichern" bei Variation der Energieart [10, S.150].....	23
Abb. 2-11 Kombination anhand des morphologischen Kastens [10, S.159ff].....	24
Abb. 2-12 Auswahlliste [10, S.163].....	26
Abb. 2-13 Zielsystem [11, S.391].....	28
Abb. 2-14 Eigenschaftsgrößen und Wertvorstellungen .....	29
Abb. 2-15 Wertfunktion.....	29
Abb. 3-1 Energieträger [14] .....	32
Abb. 3-2 Kollergangpresse [5, S.272] .....	33
Abb. 3-3 Belüftungspfeife [13, S.356] .....	35
Abb. 3-4 a-c Brückenbildung und Kernfluss [13, S.3].....	36
Abb. 3-5 Mechanische Austraghilfe [13, S.359] .....	36
Abb. 3-6 a, b Schneckenförderer [13, S.364].....	37
Abb. 3-7 Zellenradschleuse [13, S.374].....	38
Abb. 3-8 Räumrad in Schnitt und Draufsicht [13, S.380].....	39

Abb. 3-9 Betriebsbereiche unterschiedlicher Fördersysteme [6, S.506].....	39
Abb. 3-10 Förderzustände vertikal aufwärts .....	40
Abb. 3-11 Pneumatische Fördersysteme [6, S.526].....	41
Abb. 3-12 Pelletlager mit Förderschnecke u. Boden [7].....	42
Abb. 3-13 Pelletlager mit Förderschnecke u. Rührarm [7] .....	43
Abb. 3-14 Saugentnahme [7].....	43
Abb. 3-15 Pneumatische Entnahme ohne Schrägboden [3, S.163] .....	44
Abb. 4-1 Austragungssystem.....	46
Abb. 4-2 Kano-Modell.....	47
Abb. 4-3 Auswahlliste .....	50
Abb. 5-1 Pneumatische Saugförderanlage im Heizungsschema (l.o.: Absaugsonde, l.u.: Umschalteneinheit) [7] .....	60
Abb. 5-2 Heizkessel mit Tagesbehälter [7] .....	61
Abb. 5-3 Planetengetriebe mit Lüfterrad und stufenförmigen Adapter.....	62
Abb. 5-4 Planetengetriebe mit Lüfterrad und konischem Adapter .....	63
Abb. 5-5 Modell der Mehrwegdrehdurchführung.....	63
Abb. 5-6 Vorratsbehälterersatz.....	64
Abb. 5-7 Versuchsbecken .....	65
Abb. 5-9 Einschlauchvariante mit Bypass.....	68
Abb. 5-8 Einschlauchvariante .....	68
Abb. 5-10 Schnittansicht Prototyp I.....	70
Abb. 5-11 Mehrwegdrehdurchführung .....	71
Abb. 5-12 Detailansicht Drehdurchführung.....	73
Abb. 5-13 Ausgeführte Drehdurchführung Ansicht 1.....	74
Abb. 5-14 Ausgeführte Drehdurchführung Ansicht 2.....	75
Abb. 5-15 Antriebseinheit ohne Rad (li.: 3D-CAD-Ansicht, re.: in natura).....	76
Abb. 5-16 Ausräumeinheit ohne Ausräumrad .....	77
Abb. 5-17 Adaptierte untere Hälfte der Austrageinheit.....	78
Abb. 5-18 Austrageinheit .....	79
Abb. 5-19 Draufsicht Eckenfahrt.....	80
Abb. 5-20 Prototyp I ohne oberen Aufbau.....	82
Abb. 5-21 Staubablagerungen.....	83
Abb. 5-22 Prototyp II.....	84

Mit freundlicher Genehmigung von Springer Science+Business Media:

Abbildungen 2-7 bis 2-13, 3-2 bis 3-11, 3-15

**7.3 Formelverzeichnis**

Formel 2-1 Anzahl möglicher Kombinationen.....	25
Formel 2-2 Der gewichtete Gesamtwert einer Lösung.....	30
Formel 2-3 Der absolute gewichtete Gesamtwert einer Lösung.....	30
Formel 3-1 Schüttgutdichte $\rho_b$ .....	33
Formel 3-2 Porosität $\varepsilon$ .....	33