



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Thermochemischer Speicher Planung eines Drehrohrreaktors für Kaltversuche

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von
Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Andreas
und
Projektass. Dipl.-Ing. Widhalm Johannes

E302
Institut für Energietechnik und Thermodynamik
eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von
Halil Ibrahim Candeger, BSc
0726887
Unter-Meidlinger Straße, 1100 Wien

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Abstract	3
Kurzfassung	4
Danksagung	5
1 Einführung	6
1.1 Energiewirtschaft weltweit	6
1.2 Energieverbrauch in der EU 27	8
1.3 Energieverbrauch in Österreich	8
1.4 Klimatische Veränderungen	9
1.5 Erneuerbare Energien	10
1.6 Ziel der Diplomarbeit	10
2 Grundlagen	12
2.1 Einteilung der thermischen Energiespeicher	12
2.1.1 Sensible Wärmespeicher	13
2.1.2 Latente Wärmespeicher	14
2.1.3 Thermochemische Wärmespeicher	15
2.2 Drehrohrreaktor	18
2.2.1 Drehrohrföfen	18
2.2.2 Rotationstrommeltrockner	21
3 Berechnungen	27
3.1 Verweilzeit	27
3.1.1 Experimentelle Bestimmung der Verweilzeitverteilung	29
3.1.2 Verweilzeit nach Friedmann und Marshall	30
3.1.3 Verweilzeit nach Thibault, Alvarez, Blasco und Vega	31
3.1.4 Verweilzeit nach Matchett und Baker	32
3.1.5 Verweilzeit nach AIChE	34
3.1.6 Verweilzeit nach Alvarez und Shene	34
3.1.7 Vergleich der Verweilzeit-Modelle mit experimentellen Daten	35
3.2 Bewegung fester Partikel in Gasen	41
3.3 Simulation mit Barracuda	45
3.3.1 Netzgeometrie	45
3.3.2 Randbedingungen	45
3.3.3 Simulationsergebnisse	46
3.4 Antriebsleistung	49
3.4.1 Antriebsleistung nach D.J. van Dyk und L. Pretorius	49
3.4.2 Antriebsleistung nach C.M. van't Land	50
3.4.3 Antriebsleistung nach AIChE	50

3.4.4 Vergleich der Antriebsmomente	51
4 Konstruktion Drehrohrreaktor	53
4.1 Dosiereinheit	53
4.2 Drehrohr	54
4.2.1 Hubschaufel	55
4.3 Ausgangseinheit	55
4.4 Lagerung	55
4.5 Dichtung	56
4.6 Obergestell	56
5 Diskussion und Erkenntnisse	60
Abbildungsverzeichnis	61
Tabellenverzeichnis	63
Literaturverzeichnis	67

Abstract

The storage of energy is a central component in the realm of power supply systems. Growing interest in renewable energy is raising the demand for energy storage in electricity and heat supply systems due to their volatile nature and seasonal supply.

The storage of energy has become a hot topic in scientific fields, where for decades it has garnered the same amount of attention as energy production amongst scientists. However, up to the present day only a few storage technologies have reached the necessary technological maturity at competitive costs.

The Institute for Energy Systems and Thermodynamics at the Technical University in Vienna has seen a major increase in scientific papers written on the subject of regenerative energy storage. A large percentage of these papers focus on thermochemical storage of energy. Various reactor types and storage materials have been studied over the years and are currently subject to further research.

It is the goal of this thesis to construct and present a test standard designed for researching thermochemical storage. This test standard will provide reliable data of movement, mixing behaviour and solid fabric contact of the storage material under various operating conditions. All experiments will be performed in a cold state. The collected data from this thesis will be utilized to present, construct, implement and operate a new test stand under hot conditions.

This Thesis is divided into four chapters: Introduction, basics, calculations, constructs and discussions and finally the findings. The introduction chapter presents the current state of energy supply and demand. Basics covers the previous scientific findings regarding thermal storages on which this thesis is based on. The next chapter includes calculations made based on theoretical models for the interpretation and dimensioning of the rotary reactor. The chapter constructs and discussions dives into the main and subcomponents and their functions. The last chapter contains a critical review of the results and findings of this thesis.

Kurzfassung

In Energieversorgungssystemen kommt der Speicherung von Energie eine zentrale Bedeutung zu. Der wachsende Anteil erneuerbarer Energien erhöht aufgrund des volatilen bzw. saisonalen Angebots den Bedarf an Energiespeichern innerhalb der Systeme zur Strom- und Wärmebereitstellung.

Die Energiespeicherung ist heute immer mehr in den Fokus der Forschung und Entwicklung gerückt. Sie bekam jahrzehntelang von wenigen Forschern und Instituten die gleiche Aufmerksamkeit wie die Energieproduktion. Bisher haben jedoch erst wenige Speichertechnologien die notwendige technische Reife, um wettbewerbsfähig zu sein, erreicht.

Am Institut für Energietechnik und Thermodynamik der Technischen Universität Wien sind in den letzten Jahren viele wissenschaftliche Arbeiten über das Thema Energiespeicherung für regenerative Energien veröffentlicht worden. Ein starker Fokus liegt auf der thermochemischen Energiespeicherung. Viele unterschiedliche Reaktorarten und Speichermaterialien sind in den letzten Jahren untersucht worden und werden immer noch untersucht.

Ziel dieser Arbeit sind die Auslegung und Konstruktion eines Versuchsstandes für die Untersuchung eines thermochemischen Speichers. Mit diesem Versuchsstand sollen Bewegungsabläufe, Mischungsverhalten und Gas-Feststoff-Kontakt des Speichermaterials unter verschiedenen Betriebsbedingungen untersucht werden. Alle Versuche werden nur im kalten Zustand durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen aus dieser Arbeit sollen für die Auslegung, Konstruktion, Umsetzung und den Betrieb des neuen Versuchsstandes für Heißversuche eingesetzt werden.

Die vorliegende Arbeit ist gegliedert in vier Kapitel: Einführung, Grundlagen, Berechnungen, Konstruktion sowie Diskussion und Erkenntnisse. Im Kapitel Einführung wird der gegenwärtige Zustand von Energiebereitstellung und Verbrauch erläutert. In den Grundlagen wird auf die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse im Bereich der thermischen Speicher eingegangen, auf denen die vorliegende Arbeit aufgebaut ist. Für die Auslegung und Dimensionierung des Drehrohrreaktors wurden basierend auf theoretischen Modellen Berechnungen im gleichnamigen Kapitel durchgeführt. Im nächsten Kapitel werden die Haupt- sowie Subkomponenten und deren Funktionen erklärt. Das abschließende Kapitel ist eine kritische Auseinandersetzung mit den Ergebnissen und Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit.

Ich bedanke mich bei all meinen Lehrern und Professoren, die mir eine Inspiration, eine
Erweiterung meines Horizonts und eine Erleuchtung in der Dunkelheit waren.
Ich bedanke mich beim Staat Österreich für die Möglichkeit, hier in Wien, einer der schönsten
Städte in der Welt, zu studieren.
Weiter danke ich meiner Ehefrau, die mir immer zur Seite stand und mich tatkräftig unterstützte.
Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern für ihre moralische und finanzielle Unterstützung
während meines Studiums.

Kapitel 1

Einführung

Für die Entwicklung des Weltklimas war das Jahr 2015 bedeutsam. Bei der UN-Klimakonferenz in Paris wurden die zwei größten Kohlenstoffdioxidemittenten USA und China sich einig und ratifizierten erstmalig das Weltklimaabkommen in der Geschichte. Somit wurde zwischen den Industrie- und Schwellenländern eine Allianz gegen die Weltklimaveränderung geschlossen. Das Ziel des Abkommens ist die Begrenzung der globalen Erderwärmung unter $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis zum Ende dieses Jahrhunderts. Um es zu erreichen, ist es notwendig von fossilen Brennstoffen auf erneuerbare Energien umzusteigen. Aufgrund dieser Erkenntnis machten in den letzten Jahren erneuerbare Energien fast die Hälfte der neuen Stromerzeugungskapazität weltweit aus. Der große Nachteil der erneuerbaren Energieträger ist das volatile bzw. saisonale Angebot, daher ist die Umsetzung dieser Ziele mit erneuerbaren Energieträgern nur mit Speichertechnologien zu bewerkstelligen.

Um die Zukunft der Energieversorgung zu sichern, müssen die Energieverbrauchsdaten von der Vergangenheit bis zur Gegenwart analysiert werden. Nur eine penible Auseinandersetzung mit der Vergangenheit, kann die Effizienz der Energiewirtschaft in der Zukunft sichern.

1.1 Energiewirtschaft weltweit

Der Primärenergieverbrauch ist in der Europäischen Union sowie in der restlichen Welt in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gestiegen. Die Globalisierung und die Vernetzung führte zu einer Steigerung der weltweiten Produktion. Die Produktion von immer mehr Gütern und die enorme Steigerung des weltweiten Güterhandels haben zu einem starken Anstieg des Energieverbrauchs geführt. Allein in den letzten vier Jahrzehnten hat sich dieser deutlich mehr als verdoppelt[1].

Aus der Abb.1.1 ist ersichtlich, dass der Primärenergieverbrauch weltweit in den Jahren 1980 bis 2015 kontinuierlich gestiegen ist. Während im Jahr 1980 der weltweite Primärenergieverbrauch ca. 6638,8 Millionen TOE (Tonne Öläquivalent) betrug, stieg er im 2015 auf 13147,3 Millionen TOE. Das entspricht einer Steigerung von insgesamt 124,0 % bzw. 2,0 % pro Jahr. Allein von 2002 bis 2014 nahm der Primärenergiebedarf jährlich um überdurchschnittliche 2,5 % zu. Nicht enthalten in dieser Statistik sind Brennstoffe wie Holz, Torf und tierische Abfälle, die zwar in einigen Ländern einen hohen Stellenwert haben, über deren Verbrauch jedoch keine zuverlässigen statistischen Angaben vorliegen [2].

Die meisten Prognosen zeigen, dass der weltweite Energieverbrauch steigen wird. Die globale Energienachfrage wird bis 2040 um 30 % steigen, dies impliziert eine Zunahme des Verbrauchs aller modernen Energieträger. Die globalen Gesamtzahlen verschleiern jedoch eine Vielzahl unterschiedlicher Trends und signifikanter Verschiebungen unter den Energieträgern. Darüber hinaus haben mehrere hundert Millionen Menschen auch 2040 noch keinen Zugang zu grundlegenden Energiedienstleistungen.

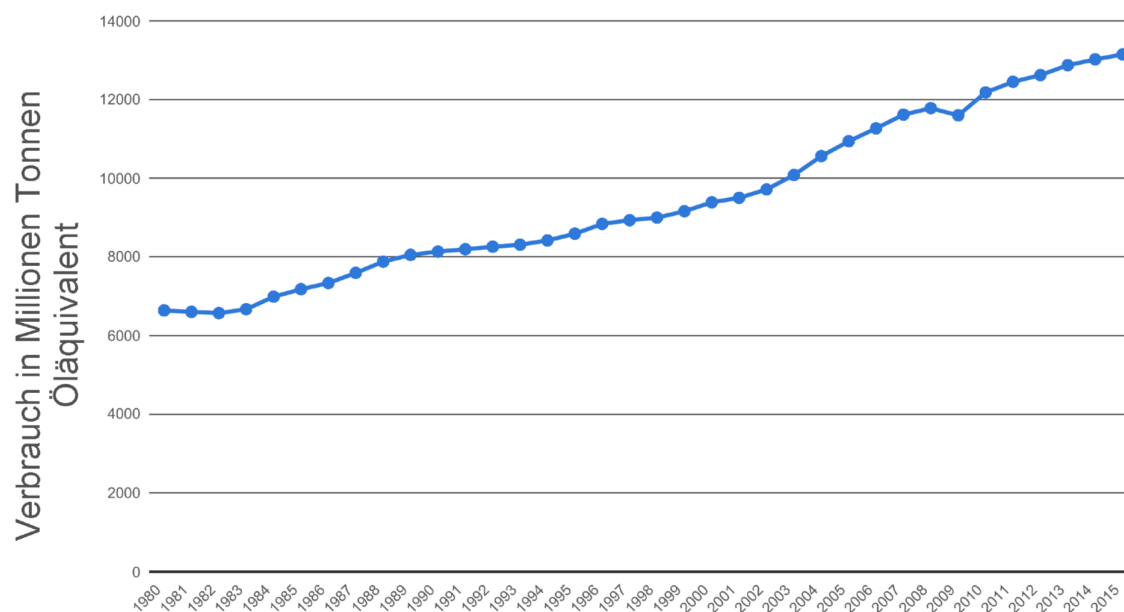


Abbildung 1.1: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs weltweit [3]

Der Primärenergieverbrauch pro Kopf lag im Jahr 2014 weltweit bei 1,79 TOE. Regional war der Pro-Kopf-Verbrauch in Nordamerika (5,81 TOE), dem Mittleren Osten (3,59 TOE) sowie in Europa und Eurasien (3,13 TOE) am höchsten. In Afrika (0,37 TOE), dem asiatisch-pazifischen Raum (1,34 TOE) sowie Mittel- und Südamerika (1,40 TOE) lag der Primärenergieverbrauch pro Kopf hingegen unter dem weltweiten Durchschnitt [1].

Parallel zur Steigerung der globalen Produktion veränderte sich auch der Energiemix: Bei den wichtigsten Energieträgern ist vor allem der Anteil von Öl stark rückläufig (zwischen 1973 und 2014 minus 14,8 %), die Anteile von Kohle und Gas haben hingegen zugenommen (plus 4,1 bzw. 5,2 %). Der absolute Verbrauch erhöhte sich bei allen Energieträgern. Die Bedeutung der erneuerbaren Energien ist sowohl absolut als auch im Vergleich zu anderen Energieträgern gestiegen, 2014 lag ihr Anteil bei 13,8 %. Je nach Erhebungsansatz wird dabei der Begriff erneuerbar jedoch sehr unterschiedlich definiert.

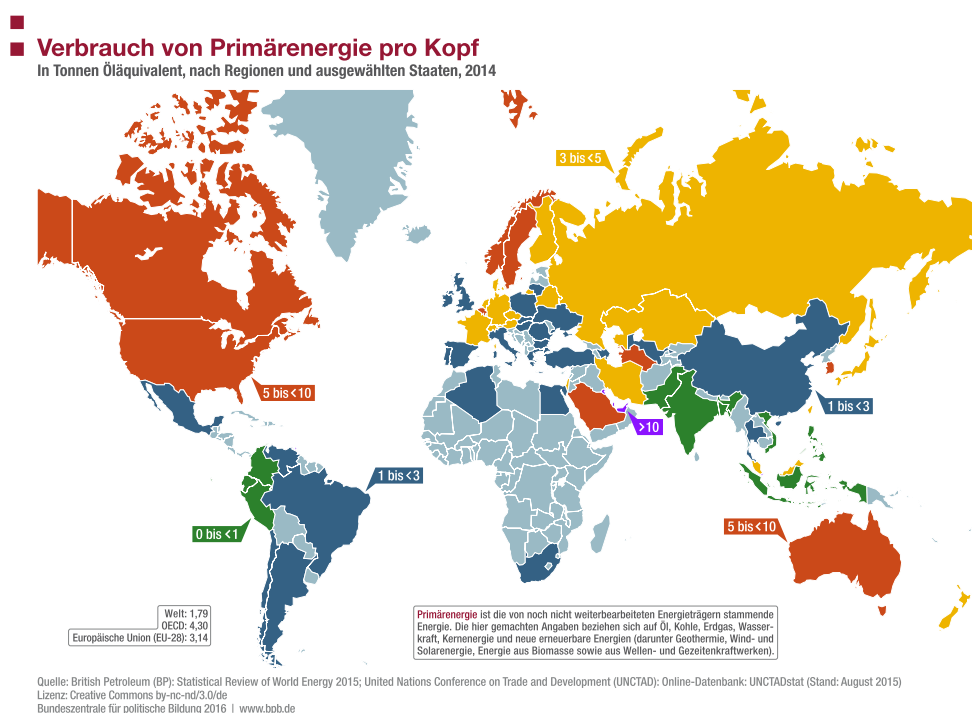


Abbildung 1.2: Primärenergieverbrauch weltweit [1]

1.2 Energieverbrauch in der EU 27

Die größten Primärenergieträger in der EU 27 sind die fossilen Energieträger mit 58,6 % in Summe. An zweiter Stelle kommen feste Brennstoffe mit 16,8 % wie z. B. Kohle, Holz, feste Biomasse. Die Kernenergie mit 13,8 % kommt an dritter Stelle als Primärenergieträger in der EU 27. Der Anteil der erneuerbaren Energie ist mit 10,0 % an letzter Stelle (s. Abb. 1.4). Im Vergleich zu der EU 27 ist der Anteil der erneuerbaren Energien in Österreich viel höher [4].

Der energetische Endverbrauch gliedert sich in Verkehr 32,1 %, Sachgüterproduktion 30,3 %, private Haushalte 25,1 %, Dienstleistungsbereich 10,4 % und Landwirtschaft mit 2,2 %. Der sektorale Endenergieverbrauch ist aus der Abb. 1.7 zu entnehmen [4].

1.3 Energieverbrauch in Österreich

Der Bruttoinlandsverbrauch stieg in Österreich in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich an. Lag er im Jahr 1955 bei rund 451 PJ, stieg er 1970 auf 796 PJ und 1980 auf 990 PJ. Im Jahr 2013 betrug der österreichische Bruttoinlandsverbrauch 1425 PJ. Die Entwicklung des Bruttoinlandsverbrauchs mit der Zuordnung fossiler und erneuerbarer Energie ist in der Abb. 1.5 [5] dargestellt.

Die größten Primärenergieträger in Österreich sind die fossilen Energieträger wie z. B. Erdöl, Erdgas, Kohle etc. Sie alle zusammen machen 67,1 % des Bruttoinlandsverbrauchs aus. Die zweitgrößten Primärenergieträger sind die erneuerbaren Energien wie z. B. biogene Brenn- und Treibstoffe, Wasserkraft, etc. Die Anteile der einzelnen primären Energieträger in Österreich sind in Abb. 1.6 ersichtlich [4]. In Österreich werden für die industrielle Prozesswärmebereitstellung sowie die Wärmebereitstellung für Raumheizung und Trinkwarmwassererwärmung 53 % der End-

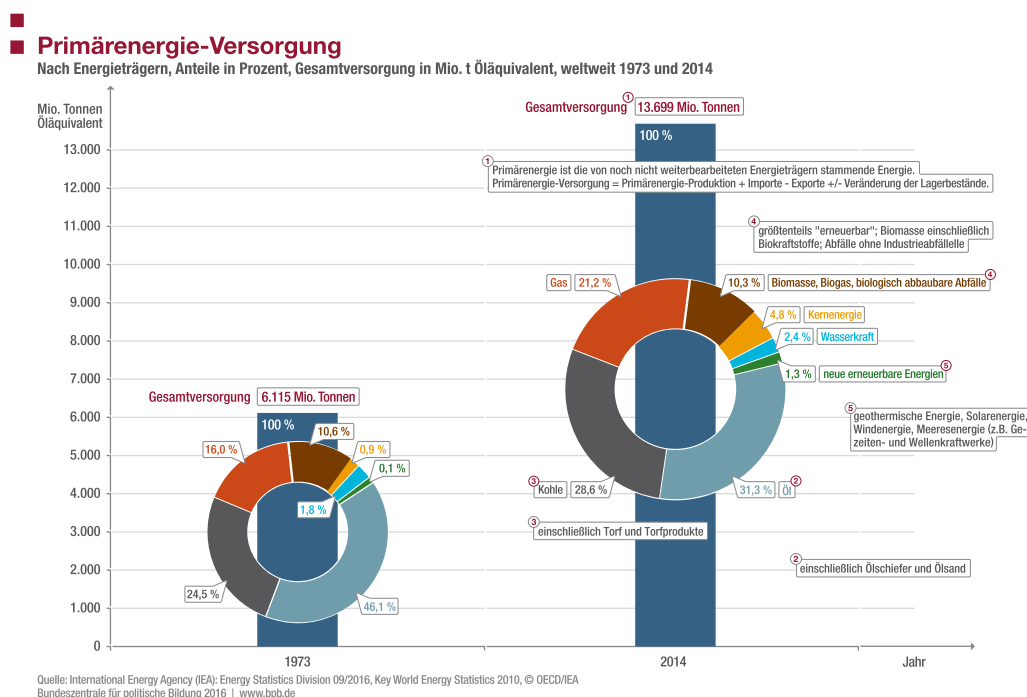


Abbildung 1.3: Primärenergieversorgung weltweit [1]

energie verbraucht [6].

1.4 Klimatische Veränderungen

Das Klima auf der Erde ändert sich. Der Grund dafür ist höchstwahrscheinlich die vom Menschen verursachte Steigerung der Treibhausgasemissionen in der Atmosphäre. Das Klimasystem der Erde reagiert träge, daher werden viele Folgen der Steigerung der Treibhausgasemissionen Jahrzehnte später gemessen. Viele Wissenschaftler sehen heute einen starken Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Treibhausgasemissionen und der Durchschnittstemperatur. Der Klimawandel auf der Welt hat Auswirkungen auf die Eisschilde in Grönland und der Antarktis, Meeresspiegel, Meeresspiegel, Permafrost, Gebirgsgletscher, Niederschlag, Wasserwirtschaft, Pflanzen- und Tierwelt, u.v.m. Der Klimawandel zeigt auch seine Folgen in Österreich: Im vergangenen Jahrhundert ist die Temperatur im Jahresmittel um ca. 2 °C gestiegen, weltweit um nur 0,85 °C. Bis zur Mitte dieses Jahrhunderts erwarten die Klimaforscher, abhängig vom jeweils verwendeten Klimamodell, eine Temperaturzunahme von ca. 2 °C im Vergleich zu den Zeitraum 1971-2000. Die Szenarien bis zum Ende dieses Jahrhunderts liegen von 2,3 bis 4,5 °C sogar noch höher. Dabei prägt sich der Klimawandel regional und jahreszeitlich sehr unterschiedlich aus. Insgesamt wird es weniger Frosttage und mehr heiße Tage mit Höchsttemperaturen über 30 °C geben. Auch wird die Zahl der Tropennächte steigen, d. h. Nächte, in denen die Temperaturen nicht unter 20 °C sinken. Die Auswirkungen der klimatischen Veränderungen sind nicht abzuschätzen.

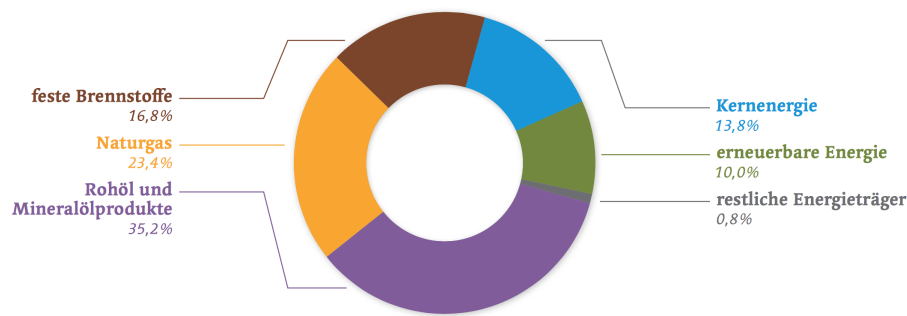


Abbildung 1.4: Energieträger EU 27

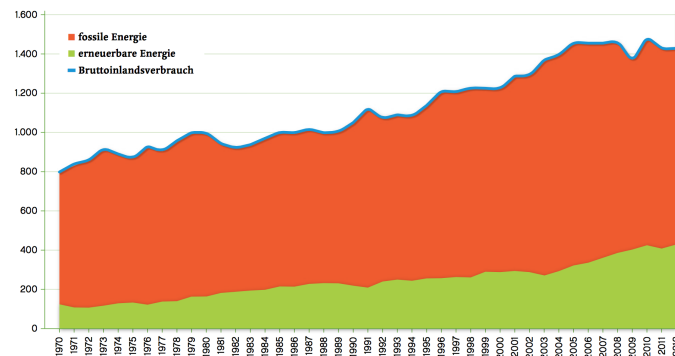


Abbildung 1.5: Bruttoinlandsverbrauch Österreich

1.5 Erneuerbare Energien

Die erneuerbaren Energieträger zeigen ein großes Potenzial zur Lösung des Klimaproblems und sind ein wichtiger Aspekt für eine nachhaltige Energiepolitik. Ihr großer Nachteil ist das volatile bzw. saisonale Angebot. Die Umsetzung der Strategien mit alternativen Energieträgern ist nur mit Speichertechnologien zu bewerkstelligen. Nur durch Speicher ist es möglich die zeitliche Differenz zwischen Nachfrage und Angebot auszugleichen. Diese müssen folgenden Anforderungen gerecht werden:

- Speicherung der Energie für einige Stunden oder gar einige Monate,
- hoher Wirkungsgrad,
- hohe Speicherdichte,
- ökologisch und
- wirtschaftlich

Die EU greift auch zu Maßnahmen zu Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie und in den privaten Haushalten.

1.6 Ziel der Diplomarbeit

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die Entwicklung eines Drehrohrreaktors, der für die Durchführung thermochemischer Speicherreaktionen geeignet ist. Hierbei soll ein Kaltmodell des Reaktors konzipiert werden, um Bewegungsabläufe, Mischungsverhalten und Gas-Feststoff-Kontakt des Speichermaterials unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu untersuchen. Alle Versuche mit dem

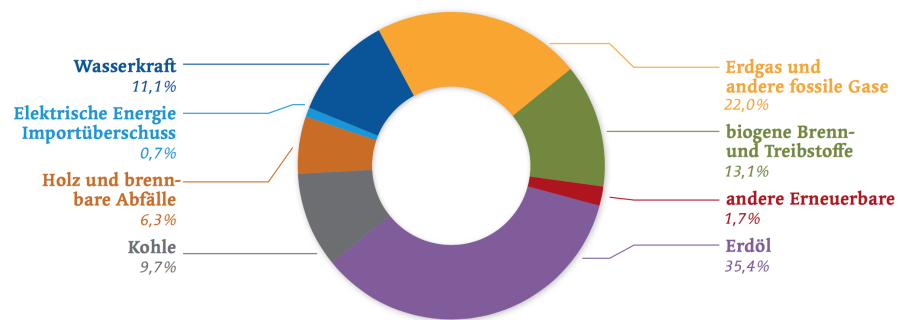


Abbildung 1.6: Energieträger Österreich

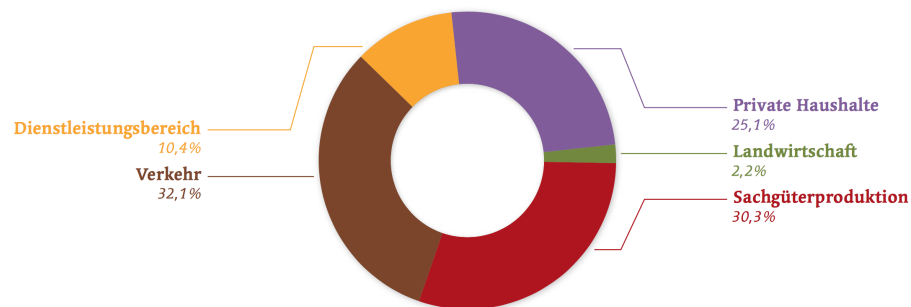


Abbildung 1.7: Sektoraler Endverbrauch

Kaltmodell werden mit Quarzsand durchgeführt.

Aus den Erkenntnissen und Erfahrungen dieser Diplomarbeit soll anschließend die Grundlage für ein Heißmodell abgeleitet werden.

Die Diplomarbeit besteht aus folgenden Kapiteln:

- Grundlagen
- Berechnungen
- Konstruktion des Drehrohrreaktors
- Diskussion und Erkenntnisse

Kapitel 2

Grundlagen

Energiespeicher werden zur Entkopplung von Angebot und Nachfrage eingesetzt. Die Energie wird zu einem beliebigen Zeitpunkt bereitgestellt und bei Bedarf eingesetzt. Dies ist besonders bei alternativen Energieanlagen von Bedeutung, da hier die Energieerzeugung stark schwankt. Auf diese Weise können Energiequellen, die starken tages-zeitlichen oder jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen, effektiver genutzt, Lastspitzen besser ausgeglichen und die Versorgungssicherheit erhöht werden. Energiespeicher können durch die folgenden Parameter quantifiziert werden:

- **Speicherkapazität:** Wird definiert als gespeicherte Energie im System. Diese hängt vom Speicherprozess, dem Medium und der Größe des Systems ab.
- **Spezifische Leistung:** Beschreibt die Energieübertragung pro Zeit und ist somit ein Maß für die Größe der Wärmeaustauschsysteme.
- **Effizienz:** Definiert sich als das Verhältnis der Energie, die der Verbraucher erhält, zu der Energie, die benötigt wird, um das Speichersystem zu laden.
- **Speicherdauer:** Beschreibt wie lange Energie gespeichert werden kann.
- **Kosten:** Definiert die Kosten für das jeweilige Speichersystem (z. B.: in €/kWh) [7].

2.1 Einteilung der thermischen Energiespeicher

Thermische Energiespeicher speichern Wärme nach thermodynamischen Prinzipien und zählen zu den sekundären Energiespeichern. Sie werden nach Eigenschaften und Einsatzgebieten unterteilt in:

- sensible Wärmespeicher
- latente Wärmespeicher
- thermochemische Wärmespeicher

oder nach

- Temperaturbereich
- zentrale/dezentrale Speicher
- stationäre/mobile Speicher

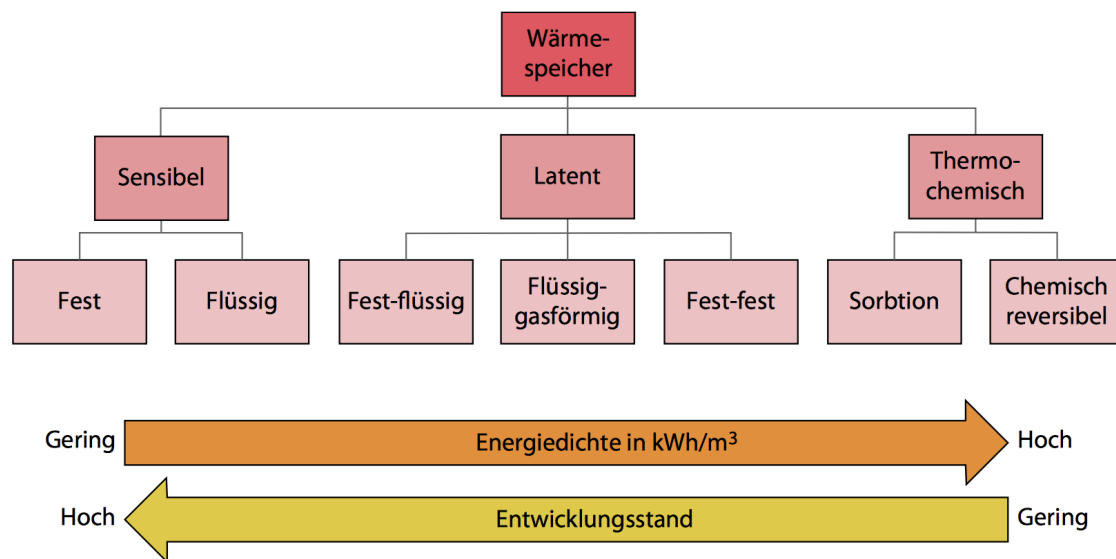


Abbildung 2.1: Übersicht über die verschiedenen Technologien zur Speicherung thermischer Energie [8]

2.1.1 Sensible Wärmespeicher

Bei der sensiblen Speicherung thermischer Energie erfolgt eine fühlbare Änderung der Temperatur. Ein Speichermedium wird erhitzt oder abgekühlt. Die Menge der gespeicherten Energie ist abhängig von der spezifischen Wärmekapazität (c_p -Wert) des Stoffes. Da bei sensiblen Energiespeichern die Temperaturdifferenzen zwischen Speichermedium und Umgebung in der Regel größer sind als bei den anderen Speicherarten, spielt die Wärmedämmung eine große Rolle. Da Wasser eine hohe spezifische Wärmekapazität besitzt und über weitere Vorteile wie gute Umweltverträglichkeit, hohe Verfügbarkeit und geringe Kosten verfügt, werden viele sensible Wärmespeicher mit Wasser betrieben. Die meisten Anwendungen dieser Speicherart befinden sich in der Heizungstechnik beim Betrieb von Pufferspeichern. Aber auch über mittlere und lange Zeiträume (saisonal) werden sensible Wärmespeicher verwendet. Dabei kann Wasser als Wärmeträgermedium z. B. zur Frostschutzsicherung durch Zugabe von Alkoholen modifiziert oder substituiert werden. So finden auch Feststoffe wie Kies oder Eisenoxidsteine bei sensiblen Wärmespeichern Verwendung [8]. Verschiedene Materialien mit Temperaturbereich, Wärmekapazität, Dichte und Anwendungsbereiche sind in der Abb. 2.2 aufgelistet.

Medium	Temperaturbereich	Spezifische Wärmekapazität	Volumetrische Wärmekapazität	Dichte	Anwendungen
Einheit	°C	kJ/(kg K)	kJ/(m ³ K)	kg/m ³	
Wasser	0–100	4,19	4175	998	Brauchwasser, Heizungsanlagen
Sand, Kies, Gestein	0–800	0,71	1278–1420	1800–2000	Erdreich-Wärmespeicher
Granit	0–800	0,75	2062	2750	Erdreich-Wärmespeicher
Beton	0–500	0,88	1672–2074	1900–2300	Thermisch aktive Bauteile
Ziegelstein	0–1000	0,84	1176–1596	1400–1900	
Eisen	0–800	0,47	3655	7860	Speichermaterial bei solaren Speichern
Thermoöl	0–400	1,6–2,1	1360–1620	850–900	Solaranlagen mit Parabolrinnenkollektor
Kies-Wasser-Schüttung	0–100	1,32	2904	2200	Erdreich-Wärmespeicher
Salz-schmelze	150–450	1,3	1970–1725	2561–2243	Solarturmkraftwerken
Natrium	100–800	1,3	925–750	1203–975	Solarturmkraftwerken

Abbildung 2.2: Übersicht über die verschiedenen Materialien zur sensiblen Speicherung [8]

2.1.2 Latente Wärmespeicher

Bei Latentwärmespeichern wird zusätzlich zur sensiblen Wärme die für einen Phasenwechsel notwendige Energie gespeichert. In der Praxis wird üblicherweise der Phasenübergang fest - flüssig genutzt. Bei diesem Phasenwechsel liegt die Volumenänderung in der Regel bei unter 10 % und ist somit technisch zu beherrschen. Die Übergangsenthalpie ist ebenfalls ausreichend hoch. Der Phasenwechsel flüssig - gasförmig ist aufgrund der hohen Volumenänderung nur schwer zu beherrschen und wird daher eher nicht genutzt. Prinzipiell sind drei Varianten der Speicherung denkbar. Zum einen sind dies die isochore Speicherung, wobei sich der Druck mit der Temperatur erhöht und damit gleichzeitig die Verdampfungstemperatur. Bei der isobaren Speicherung müsste ein sehr großes Ausgleichsgefäß zur Verfügung stehen, diese Variante wird nicht verwendet. Die dritte Möglichkeit zur Nutzung des Phasenübergangs von flüssig zu gasförmig ist die Speicherung in einem offenen System bei Umgebungsdruck [8]. Einige Materialien zur latenten Wärmespeicherung sind in der Abb. 2.3 aufgelistet.

Material- klasse	Material	Summen- formel	Schmelz- temperatur [°C]	Schmelz- enthalpie [kJ/kg]	Wärmeleit- fähigkeit [W/m²K]	Dichte [kg/m³]
Eutektische Salzwasser- mischung	Wasser/Nat- riumchlorid	H ₂ O/NaCl	– 21	222	–	1165 (flüssig 20 °C)
Wasser	Wasser	H ₂ O	0	334	0,597 (flüs- sig, 20 °C)	998 (flüssig, 20 °C) 917 (fest)
Salzhhydrate	Calcium- chlorid Hexahydrat	CaCl ₂ *6H ₂ O	29	171	0,54 (flüssig, 39 °C)	1562 (flüssig, 32 °C)
	Di-Natrium- hydrogen- phosphat Dodekahy- drat	Na ₂ HPO ₄ *12H ₂ O	35–40	280	0,476 (flüs- sig)	1442 (flüssig)
	Natriumthio- sulfat Pent- ahydrat	Na ₂ S ₂ O ₃ *5H ₂ O	48	187	–	1670 (flüssig)
	Natriumace- tat Trihydrat	Na(CH ₃ COO)*3H ₂ O	58	226	–	1280 (flüssig)
	Magnesi- umnitrat Hexahydrat	Mg(NO ₃) ₂ *6H ₂ O	89	149	0,49 (flüssig, 95 °C)	(flüssig)
	Magnesi- umchlorid Hexahydrat	MgCl ₂ *6H ₂ O	117	165	0,57 (flüssig, 120 °C)	(flüssig)
Salze	Natriumnit- rat	NaNO ₃	307	172	0,51 (flüssig)	1900 (flüssig)
	Kaliumnitrat	KNO ₃	333	266	0,5 (flüssig)	1890 (flüssig)
Salzmi- schung	Natriumnit- rat + Kalium- nitrat	KNO ₃ /NaNO ₃	222	100	–	1950 (flüssig)
Paraffin	Oktadekan	C ₁₈ H ₃₈	28	245	0,15 (fest)	777 (flüssig)
Fettsäure	Laurinsäure	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH	43	178	0,15 (flüssig, 50 °C)	870 (flüssig, 50 °C)
	Myristin- säure	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ COOH	58	186	–	861 (flüssig, 55 °C)
Zuckeral- kohol	Erythritol	C ₄ H ₅ (OH) ₆	120	340	0,32 (flüssig, 140 °C)	1300 (flüssig, 140 °C)
PEG	PEG 6000	HO–[CH ₂ –CH ₂ – O] _n –H	60	190		1085 (flüssig, 70 °C)

Abbildung 2.3: Übersicht über die verschiedenen Materialien zur latenten Speicherung [8]

2.1.3 Thermochemische Wärmespeicher

Unter dem Begriff der thermochemischen Wärmespeicherung sind strenggenommen chemisch reversible Reaktionen zu verstehen, bei denen die Reaktionsprodukte getrennt und über lange Zeit

gespeichert werden können. Durch die Trennung treten keine Speicherverluste auf. Erst bei der Entladung gibt die exotherme Reaktion die gespeicherte Energie wieder frei. Thermochemische Energiespeicher erlauben sehr hohe Energiespeicherdichten (s. Abb. 2.5), finden derzeit aber kaum Anwendung in der Praxis, da sich diese Technologie größtenteils noch in der Grundlagenforschung befindet. Auch Sorptionsspeicher werden oft unter dem Begriff thermochemischer Speicher geführt. Der Forschungsschwerpunkt bei den Sorptionsspeichern liegt derzeit auf der Nutzung industrieller Abwärme. Diese Technologie eignet sich besonders für industrielle Trocknungsprozesse. Bei Ab- oder Adsorptionsprozessen handelt es sich vielmehr um einen physikalischen als um einen chemischen Vorgang [8]. Bei der thermochemischen Wärmespeicherung wird die Reaktionsenthalpie einer reversiblen chemischen Reaktion zur Speicherung von Wärme verwendet. Der theoretische Reaktionsablauf sieht folgendermaßen aus: Die Edukte befinden sich in einem stabilen Zustand als eine Verbindung von A und B als AB (s. Gleichung 2.1). Durch das Zuführen eines definierten Energiebetrags wird die Verbindung AB aufgebrochen. Die zugeführte Energie wird in den Produkten A und B als Reaktionsenthalpie ΔH_R gespeichert. Bei manchen Reaktionsarten kann es zu einer Änderung des Aggregatzustands führen, was in bestimmten Fällen wünschenswert ist. Die Aggregatzustandsänderung ermöglicht eine leichtere Separierung der Reaktionprodukte A und B und verhindert eine Rückreaktion der beiden Produkte. Diese Art der chemischen Reaktion wird als eine endotherme Reaktion bezeichnet.



Bei der Rückreaktion werden die beiden getrennten Produkte A und B zusammengeführt und es kommt einer Energiefreisetzung ΔH_R (exotherme Reaktion). Einige Beispiele solcher Reaktionen sind in der Abb. 2.5 mit Gleichungen, Gleichgewichtstemperatur und Energiespeicherdichte aufgelistet.

Im Allgemeinen kann der thermochemischen Energiespeicherung das größte Potenzial zugesprochen werden, da sie über die höchste spezifische Speicherkapazität verfügt und für große Temperaturbereiche eingesetzt werden kann (s. Abb. 2.4). Gleichzeitig zeichnet sie sich durch geringe Wärmeverluste aus. Folgende Kriterien sind entscheidend für den Einsatz eines thermochemischen Energiespeichers (TCS) [7]:

- theoretisch erzielbare Speicherdichte,
- Gleichgewichtstemperatur,
- Verfügbarkeit und Preis,
- Toxizität des TCS und
- Zyklenstabilität.

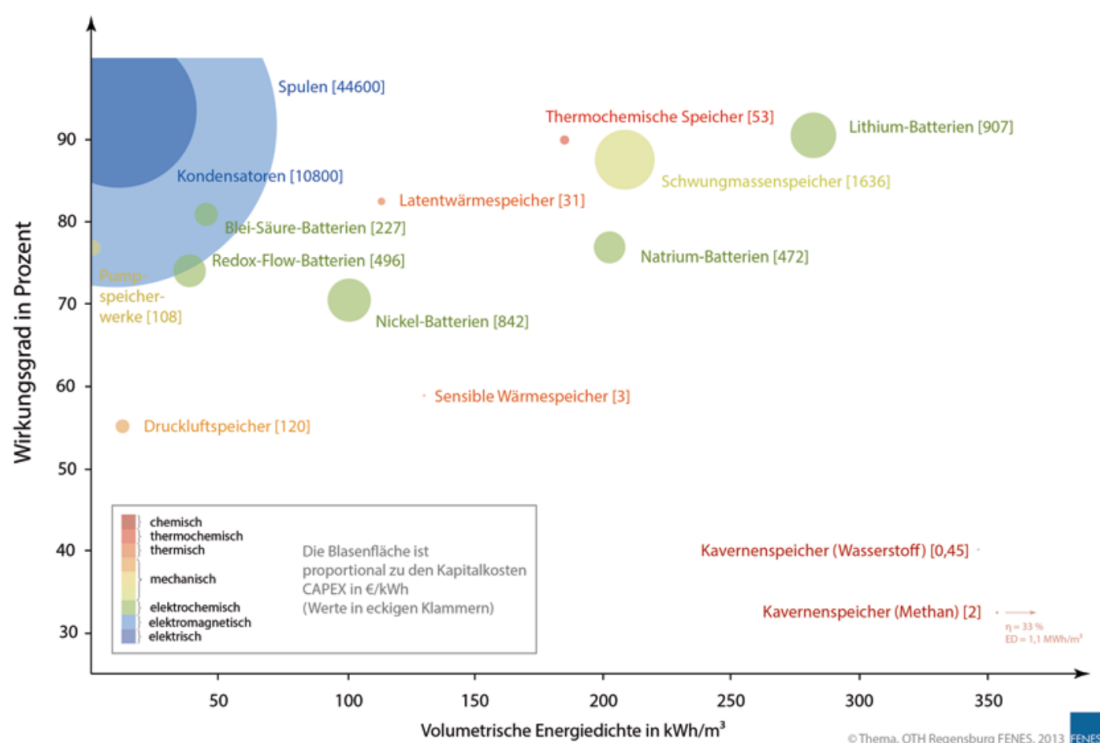


Abbildung 2.4: Volumetrische Energiedichte [8]

Reaktionstyp	Gleichung	Gleichgewichtstempertur (1 bar) [°C]	Energiespeicherdichte [kWh/kg]
Salz Hydrate	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{MgSO}_4 + 7\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	122 174	0,463 0,091
Hydroxide	$\text{Mg}(\text{OH})_2 \Leftrightarrow \text{MgO} + \text{H}_2\text{O}$ $\text{Ca}(\text{OH})_2 \Leftrightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	268 521	0,372 0,373
Carbonate	$\text{CaCO}_3 \Leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ $\text{BaCO}_3 \Leftrightarrow \text{BaO} + \text{CO}_2$	896 1497	0,463 0,298
Metall Hydride	$\text{MgH}_2 \Leftrightarrow \text{Mg} + \text{H}_2$	293	0,834
Katalytische Reaktionen	$\text{SO}_3 \Leftrightarrow \text{SO}_2 + 0,5\text{O}_2$	767	0,340
Dampfpreformierung	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	687	1,672

Abbildung 2.5: Übersicht über die verschiedenen Materialien zur thermochemischen Speicherung [8]

2.2 Drehrohrreaktor

Der Drehrohrreaktor ist vom Konzept her ähnlich wie ein Drehrohrföfen (Abb. 2.6) oder ein Rotationstrommeltrockner (Abb. 2.7). Er besteht aus einem Einlass für die Partikel, Rotor (Trommel), Hubschaufeln, Antrieb, Festlager, Loslager, Dichtungen, Wärmetauschersystem und Auslass für die Partikel. Einige Erkenntnisse und Erfahrungen aus diesen beiden Systemen werden für die vorliegende Arbeit herangezogen.

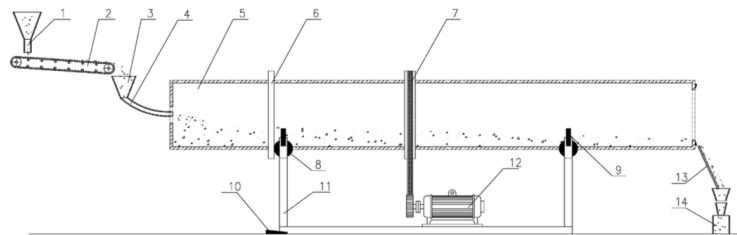


Fig. 1. Schematic of rotary kiln cold simulator ((1) Funnel, (2) Belt conveyor, (3) Tracer addition point, (4) Feed chute, (5) Rotary cylinder, (6) Position plate, (7) Belt wheel, (8) Position wheel, (9) Jockey wheel, (10) Slope angle adjustor, (11) Supportor, (12) Variable motor, (13) Exit chute, (14) Sample collector).

Abbildung 2.6: Schematische Darstellung eines Drehrohrföfens [9]

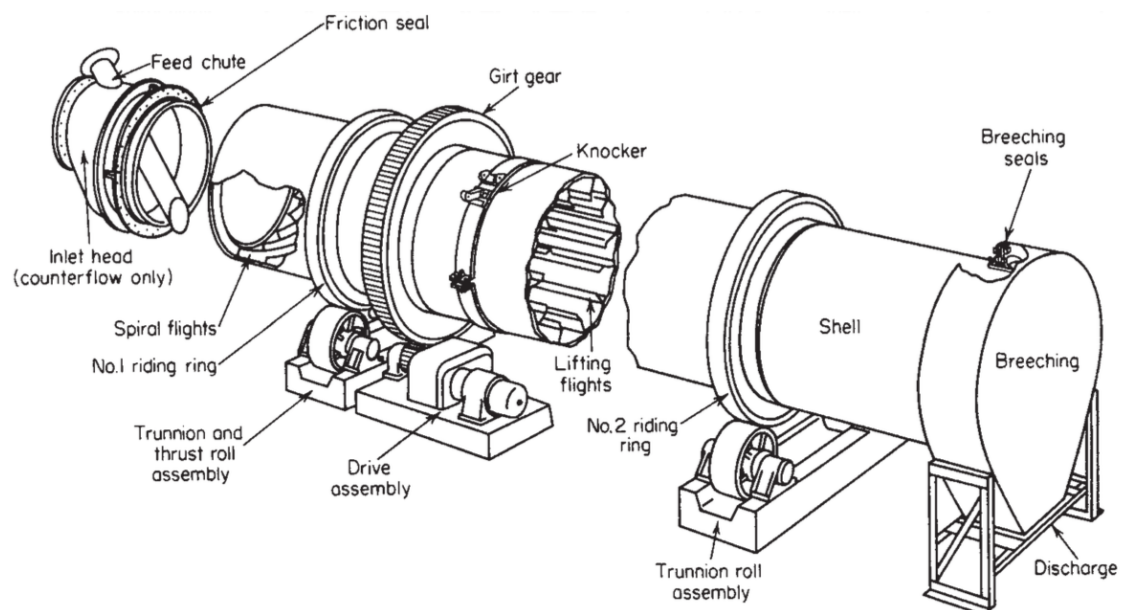


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung eines Rotationstrommeltrockners [10]

2.2.1 Drehrohrföfen

Drehrohrföfen werden zur thermischen Behandlung von granular und stückig anfallenden Materialien eingesetzt. Der Größenbereich der Materialien reicht von einigen μm bis hin zu einem Meter wie beispielsweise bei Abfällen. Zum Transport der Materialien werden diese einem leicht geneigten, sich drehendem Rohr zugeführt, worauf sich der Name gründet. Die Bewegung des Materials ist in Abb. 2.8 veranschaulicht. In Längsrichtung fällt die Betthöhe des Materials kontinuierlich wie bei einer fließenden Flüssigkeit ab. Durch die Abnahme der potenziellen Energie wird die

Reibung überwunden. Die Drehung fördert das Fließen des Materials. An der Wand wird das Material angehoben, wobei es relativ zur Wandbewegung in Ruhe bleibt. Auf einer schmalen Schicht rutscht das Material dann wieder abwärts. Nur während dieses Abwärtsfließens wird das Material aufgrund der Neigung in Längsrichtung transportiert. Zwischen Hubregion und Gleitschicht findet ein Queraustausch des Materials statt, was die Durchmischung fördert [11].

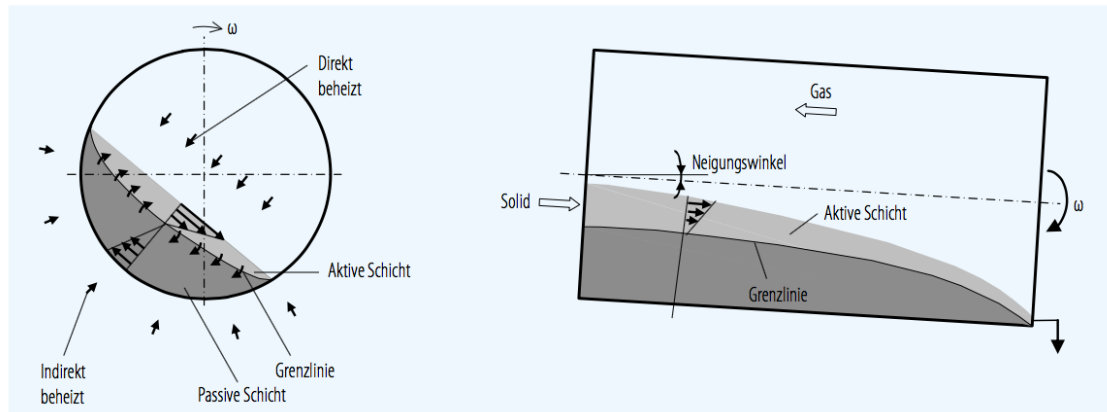


Abbildung 2.8: Stoffbewegung in einem Drehrohrofen [11]

Der konvektive Wärmeübergang zwischen dem Gas im Drehrohrofen und dem Material entsprechend Abb. 2.8 ist relativ gering. Bei Verfahren im Niedertemperaturbereich besitzt die Wand daher Hubschaufeln, die das Material nach oben transportieren und dann zur Verbesserung des Wärmeübergangs über dem gesamten Querschnitt abwerfen, wie beispielhaft in Abb. 2.9 gezeigt ist. Während des Fallens wird dann das Material aufgrund der Neigung ein Stück in Längsrichtung transportiert. Im Hochtemperaturbereich können aus Festigkeitsgründen keine Hubschaufeln eingebaut werden [11].



Abbildung 2.9: Querschnitt in einem Drehrohrofen [11]

In Abhängigkeit von Drehzahl und Durchmesser stellen sich verschiedene Bewegungsformen im Querschnitt ein, wie in Abb. 2.10 veranschaulicht ist. Ist z. B. die Drehzahl zu niedrig, fließt das Material schlecht oder gleitet periodisch. Bei zu hoher Drehzahl haftet das Material zu lange an der Wand. In beiden Fällen wird das Material nicht genügend durchmischt. Die optimale Drehzahl hängt hauptsächlich vom Durchmesser und den Materialeigenschaften ab und liegt im Bereich des Cascadings. Mit steigender Drehzahl wird in einem weiten Bereich der Quertransport und damit der Wärmetransport in das Schüttgut verstärkt. Jedoch wird mit der Drehzahl auch die Durchsatzgeschwindigkeit erhöht und damit die Verweilzeit verkürzt. Über die Verweilzeit werden wiederum die Länge und Neigung des Drehrohres beeinflusst.

Bewegungsformen	Slumping	Rolling	Cascading	Cateracting
Modell-darstellung				
Froude-Zahl	$10^{-4} < Fr < 10^{-3}$	$10^{-4} < Fr < 10^{-2}$	$10^{-3} < Fr < 10^{-2}$	$10^{-2} < Fr < 1$

Abbildung 2.10: Bewegungsformen von Materialien in rotierenden Zylindern [11]

Der Transport des Materials durch einen Drehrohrofen wird in Abb. 2.11 erläutert, die den Längsschnitt eines direkt beheizten Drehrohres ohne Einbauten darstellt. Über eine Dosiereinrichtung, wie z. B. Schnecken und Schüttelrinnen, wird die Materialaufgabe geregelt. Das Gut fällt von oben in das Drehrohr. An dieser Stelle ist der innere Durchmesser in der Regel eingeschnürt, um ein Rückfließen des Materials zu verhindern. Am anderen Ende des Drehrohres tritt das Material über einen sogenannten Ofenkopf wieder aus, der den Ofen gegen die umgebende Atmosphäre abdichtet. Am Austritt ist das Drehrohr oftmals ebenfalls eingeschnürt, um den Füllungsgrad am Ende zu erhöhen.

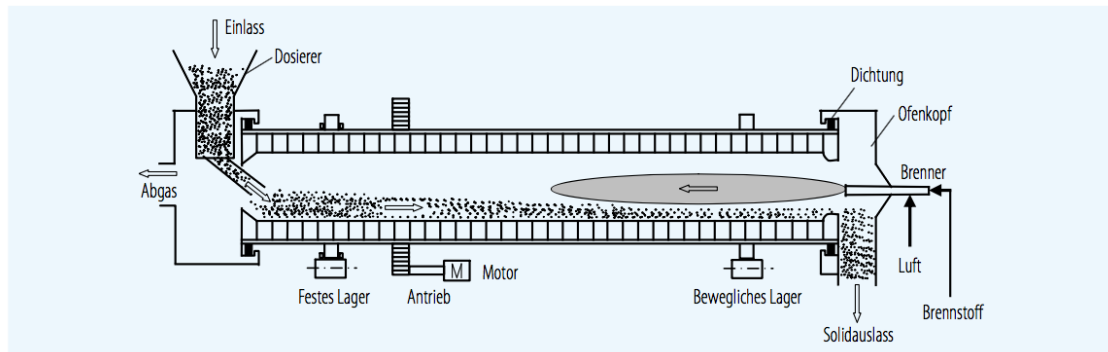


Abbildung 2.11: Längsschnitt eines direkt beheizten Drehrohrofens [11]

2.2.2 Rotationstrommeltrockner

Der Rotationstrommeltrockner (Abb. 2.12) wird zur Trocknung von rieselfähigen Gütern in der chemischen, verfahrenstechnischen Industrie eingesetzt. Er wird charakterisiert durch seine einfache Konstruktion und Funktionsweise. Er besteht prinzipiell aus einem Rohr, das gedreht wird und schwach zur Horizontalen geneigt ist. Das nasse Gut wird dem Trocknereintritt zugeführt und ohne Hilfe von Transportvorrichtungen einfach durch die Drehbewegung und die Neigung zur Horizontalen durch den Trockner transportiert. Im Gegen- oder Gleichstrom zum Produktstrom wird ein Gasstrom zugeführt. Die Trocknerwand wird entweder von dem durchgesetzten heißen Gas (direkt beheizter Trockner) oder durch eine Wandbeheizung (indirekt beheizter Trockner) beheizt. Der Rotationstrommeltrockner kann für jede Partikelform und -größe (Braunkohletrocknung) sowie auch für die Trocknung von pastösen und schlammigen Gütern (Klärschlamm-trocknung) eingesetzt werden. Um einen besseren Kontakt zwischen Trocknungsgas und -gut zu erzielen, werden im Trockner Einbauten eingesetzt [12]. Es existieren wissenschaftliche Arbeiten über Verweilzeiten, Wärmeübertragung bis hin zur Antriebsleistung.

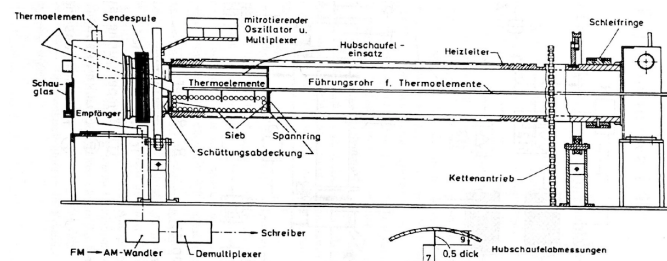


Abbildung 2.12: Schematische Darstellung des Trommeltrockners [12]

Ein Teil der Schüttung wird bei drehender Trommel von den Hubschaufeln mitgenommen und in Umfangsrichtung hochtransportiert (s. Abb. 2.13). Lage um Lage rutschen und rollen dabei die Partikel übereinander weg in Richtung Schaufelspitze und fallen dann durch den freien

Trocknerquerschnitt auf das Schüttungsbett zurück. Es kommt dabei zu einem Wärme- und Stoffaustausch zwischen der durch den Trockner strömenden Luft und den fallenden Partikeln. Die Intensität dieses Austausches hängt von der Partikelüberströmgeschwindigkeit beim Fallen und der Austauschfläche zwischen Luft und fallenden Partikeln ab [12].

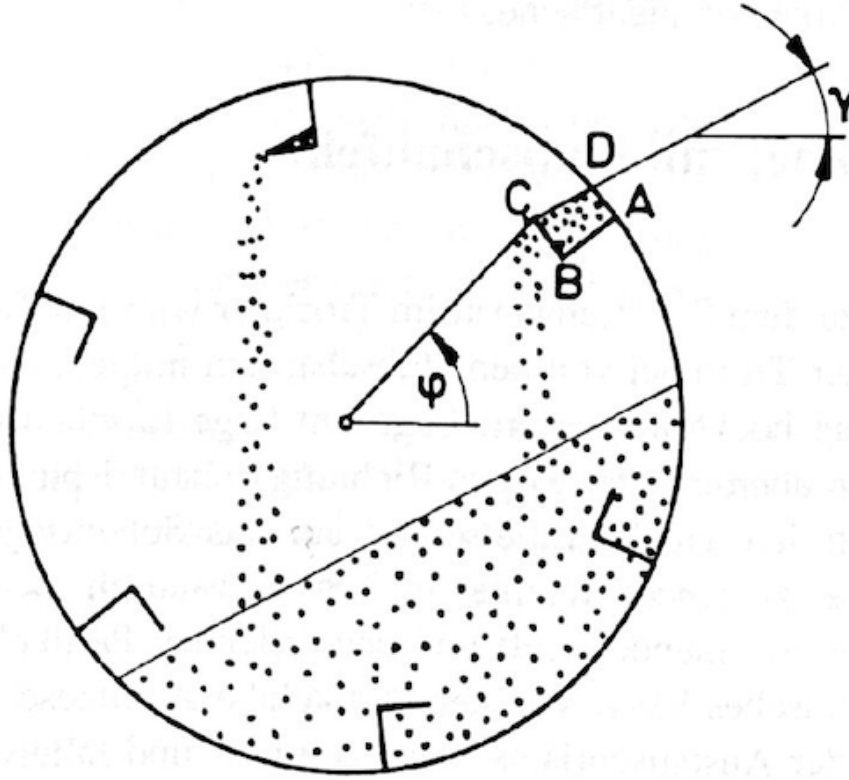


Abbildung 2.13: Gutsbewegung im Trockner mit Hubschaufeln [12]

Die Kenntnis der Partikelanzahl, die bei einer bestimmten Hubschaufelposition durch die Luft fällt, ist eine notwendige Bedingung für die Vorausberechnung der Austauschfläche Luft-Partikel. Das Schüttungsvolumen in einer Hubschaufel ist eine Funktion ihrer Geometrie, ihrer Position ausgedrückt durch den Winkel φ und den Schüttungswinkel γ , der aus der freien Fläche der Partikel und der Horizontalen gebildet wird (s. Abb. 2.13). Bei bekannter Schaufellänge kann der Volumeninhalt einer Schaufel aus der Querschnittsfläche ABCD berechnet werden. Ist das Schüttungsvolumen bekannt, kann leicht die Partikelanzahl bestimmt werden. Für die Festlegung dieser Fläche ABCD wird der Winkel γ benötigt. Für seine Bestimmung wird ein Partikel, kurz bevor es die Schaufel verlässt, betrachtet. Auf die Partikel wirken folgende Kräfte:

- Gewichtskraft F_G
- Zentrifugalkraft F_Z
- Widerstandskraft von der Schüttungsfläche F_W [12].

Gewichtskraft:

$$F_G = m_P g \quad (2.2)$$

Zentrifugalkraft:

$$F_Z = m_P \omega^2 (R - l_1) \quad (2.3)$$

Dabei sind m_P die Partikelmasse, ω die Winkelgeschwindigkeit und l_1 die Schaufellänge in radialer Richtung (s. Abb. 2.14).

Eine Kräftegleichgewicht senkrecht zur Schüttungsoberfläche liefert

Normalkraft:

$$F_N = m_P g \cos \gamma + m_P \omega^2 (R - l_1) \sin(\gamma - \varphi) \quad (2.4)$$

wobei N die Kraft senkrecht zur Schüttungsoberfläche ist. Ein Kräftegleichgewicht parallel zur Schüttungsoberfläche liefert

Widerstandskraft:

$$F_W = m_P g \sin \gamma - m_P \omega^2 (R - l_1) \cos(\gamma - \varphi) \quad (2.5)$$

wobei W die Widerstandskraft parallel zur Schüttungsoberfläche ist. Es gilt weiter:

$$F_W = \mu F_N \quad (2.6)$$

wobei μ der Reibungskoeffizient der Schüttung auf der oberen Partikellage ist.

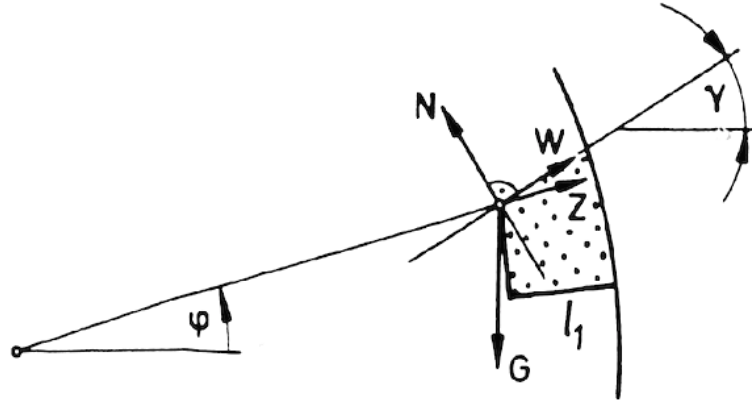


Abbildung 2.14: Bestimmung des Schüttungswinkels [12]

Aus Gleichung 2.5 wird durch Ersetzen von N und W aus Gleichung 2.3 und 2.4 die Berechnungsgleichung für γ ermittelt.

$$\tan \gamma = \frac{\mu - \frac{\mu \omega^2}{g} (R - l_1) \sin \varphi + \frac{\omega^2}{g} (R - l_1) \cos \varphi}{1 - \frac{\mu \omega^2}{g} (R - l_1) \cos \varphi - \frac{\omega^2}{g} (R - l_1) \sin \varphi} \quad (2.7)$$

Der Widerstandskoeffizient μ kann aus der Betrachtung des Winkels γ bei $\varphi = 90^\circ$ ermittelt werden. Aus Gleichung 2.6 ist dann $\tan \mu = \mu$. Aus der Gleichung 2.6 ist zu sehen, dass der Winkel γ eine Funktion der Drehzahl und Hubschaufelposition ist. Bei bestimmter Hubschaufelposition ist durch den Winkel γ die Fläche ABCD festgelegt. Die Flächengeometrie ändert sich je nach Schaufelposition von Viereck zu Dreieck hin, bis die Schaufel leer wird. Für die Berechnung wird sie als Summe bzw. Differenz leicht berechenbarer Flächen gebildet. Der Winkelbereich, in dem die Hubschaufel Partikel enthält, wird in drei Bereiche unterteilt.

In dem Bereich I gilt: $\varphi \leq \gamma$

In diesem Fall resultiert die Fläche A aus der Fläche A_V des Vierecks ABCE und der Fläche A_D des Dreiecks CDE. Für die weitere Betrachtung wird angenommen, dass die Wandkrümmung in dem Bereich, in dem die Schüttung Kontakt mit der Wand hat, vernachlässigt werden kann. Die Fläche A_V wird aus der Differenz der Flächen der Dreiecke OEA und OBC gebildet.

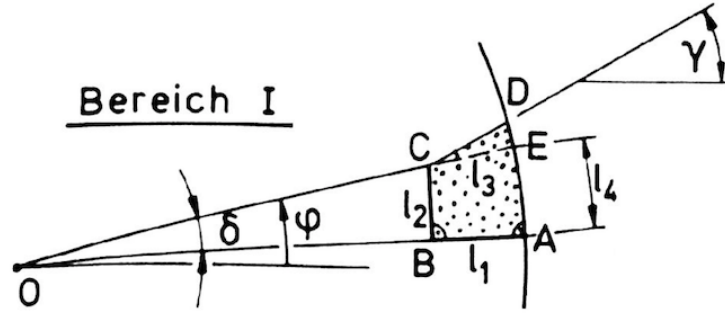


Abbildung 2.15: Schüttungsgeometrie Bereich I [12]

$$A_V = \frac{1}{2} R l_4 - \frac{1}{2} (R - l_1) l_2 \quad (2.8)$$

Für die Länge gilt: $l_4 = R \tan \delta$, wobei $\tan \delta = \frac{l_2}{R - l_1}$ ist und sich daraus ergibt

$$l_4 = \frac{R l_2}{R - l_1} \quad (2.9)$$

Das Einsetzen der Gleichung 2.9 in 2.8 ergibt:

$$A_V = l_1 l_2 \frac{R - l_1/2}{R - l_1} \quad (2.10)$$

Für die Fläche A_D gilt:

$$A_D = \frac{1}{2} l_3^2 \tan(\gamma - \varphi) \quad (2.11)$$

Die Länge l_3 wird als Differenz des Trommelradius R und der Länge CO betrachtet.

$$l_3 = R - \sqrt{(R - l_1)^2 + l_2^2} \quad (2.12)$$

Die Fläche A kann damit aus folgender Gleichung berechnet werden:

$$A = l_1 l_2 \frac{R - l_1/2}{R - l_1} + \frac{1}{2} \left(R - \sqrt{(R - l_1)^2 + l_2^2} \right)^2 \tan(\gamma - \varphi) \quad (2.13)$$

In dem Bereich II gilt: $\varphi > \gamma$ und $\tan(\varphi - \delta - \gamma) < l_2/l_1$.

In diesem Bereich wird die Fläche A aus der Differenz der Flächen des Vierecks ABCE und des Dreiecks CDE berechnet. Es gilt analog zum Bereich I:

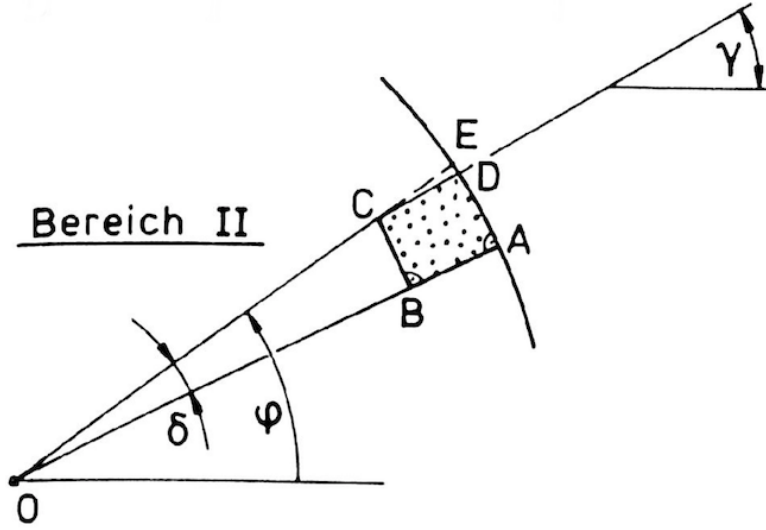


Abbildung 2.16: Schüttungsgeometrie Bereich II [12]

$$A = l_1 l_2 \frac{R - l_1/2}{R - l_1} - \frac{1}{2} \left(R - \sqrt{(R - l_1)^2 + l_2^2} \right)^2 \tan(\varphi - \gamma) \quad (2.14)$$

In diesem Bereich III, $\varphi > \gamma$ und $\tan(\varphi - \delta - \gamma) \geq l_2/l_1$ handelt es sich bei der Fläche A um eine Dreiecksfläche.

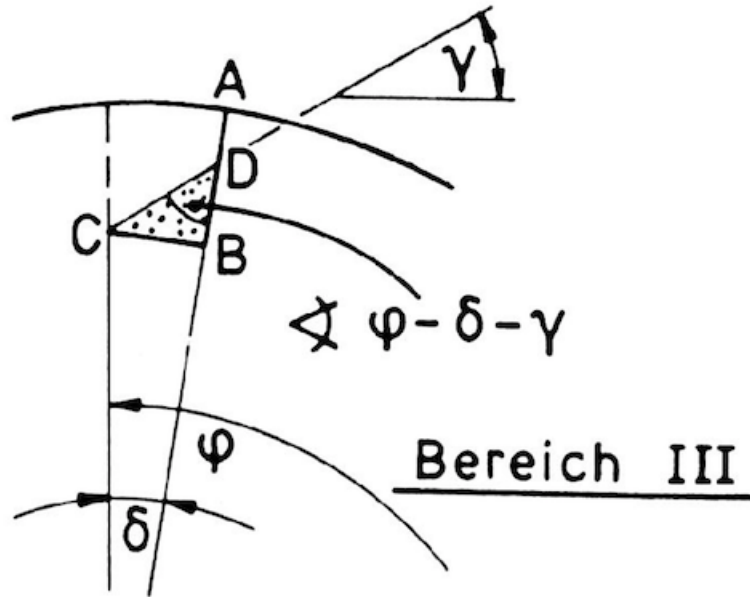


Abbildung 2.17: Schüttungsgeometrie Bereich III [12]

$$A = \frac{1}{2} l_2 \frac{l_2}{\tan(\varphi - \delta - \gamma)} \quad (2.15)$$

Die Hubschaufel wird leer, wenn sich aus Gleichung 2.13 $\varphi - \delta - \gamma = \frac{\pi}{2}$ ergibt. Aus der Berechnung der Fläche A kann die Anzahl an Partikeln n_P , die momentan in der Hubschaufel sind, ermittelt werden.

$$n_P = \frac{AL(1 - \psi_{SO})}{\pi d^3/6} \quad (2.16)$$

Die Anzahl der Partikel, die in einem Winkelbereich aus der Hubschaufel fallen, wird aus dem Unterschied des Inhalts der Hubschaufeln am Anfang und am Ende des Bereichs bestimmt. Daher ist die Bestimmung des Inhalts der Hubschaufeln als Funktion ihrer Position grundlegend für die weitere Berechnung. Es wurde deswegen experimentell die Gültigkeit der hier dargestellten Gleichungen zur Berechnung der Hubschaufelposition überprüft [12].

Kapitel 3

Berechnungen

Die Reaktoren können kontinuierlich, halbkontinuierlich oder diskontinuierlich betrieben werden. Das Reaktionsgemisch wird bei den diskontinuierlich betriebenen Reaktoren zu einem definierten Zeitpunkt eingebracht und nach einer bestimmten Dauer zur Gänze entnommen. Infolgedessen ist die Reaktionsdauer für die gesamte Reaktionsmasse gleich. Im Gegensatz dazu wird bei den kontinuierlich betriebenen Reaktoren zu jedem betrachteten Augenblick ein konstanter Volumenstrom in den Reaktor eingebracht und am Reaktorausgang wiederum entnommen. Die Bedeutung der Verweilzeit ist daher für die Beschreibung eines kontinuierlich betriebenen realen Reaktors substanziell. In dieser Arbeit wird die Verweilzeit mit fünf verschiedenen empirischen Ansätzen, in der Fachliteratur geläufigen Methoden, berechnet. Die eingesetzten Werte für die analytische Berechnung der Verweilzeit sind in der Tab. 3.1 aufgelistet. Zusätzlich zur Verweilzeit sind das Einström- und Mischungsverhalten des Luft-Partikel-Gemisches zu untersuchen. Für diesen Schritt werden die BBO-Gleichungen (Basset, Boussinesq und Osee) und eine CPFD-Simulation (Computational Particle Fluid Dynamics) herangezogen. Zum Schluss wird die für den Antrieb des Reaktors erforderliche Antriebsleistung berechnet.

Drehrohrreaktorlänge L	0,75 m
Drehrohrreaktorinnendurchmesser $\varnothing D_i$	0,35 m
Partikeldurchmesser $\varnothing d_p$	0,0000505 m
Dichte Partikel ρ_p	2650 kg/m ³
Dichte Fluid ρ_{fl}	1,2 kg/m ³
Volumenstrom Fluid \dot{V}_{fl}	120 l/min
Massestrom Partikel \dot{m}_p	0,00027778 kg/s
Dynamische Viskosität Fluid η_{fl}	0,000018232 kg/ms

Tabelle 3.1: Betriebsparameter für den Drehrohrreaktor

3.1 Verweilzeit

Um eine chemische Reaktion im technischen Massstab effektiv und wirtschaftlich durchführen zu können, müssen die Kinetik und die Hydrodynamik einer Reaktion sowie ihre Wirkung auf den Umsatz im Reaktor bestimmt werden. Es muss dabei auch überprüft werden, welcher Reaktortyp, welche Betriebsweise (satzweise, kontinuierlich) für den Umsatz günstig ist und wie die physikalischen Parameter (Konzentration, Druck, Temperatur, Zeit) gewählt werden müssen. Eine Eigenschaft von Reaktoren ist ihr Verweilzeitverhalten. Je nach Strömungs- und Mischungsverhalten im Reaktor haben die Moleküle unterschiedliche Verweilzeiten. Die mittlere Verweilzeit ist definiert als:

$$\tau = \frac{V_R}{\dot{V}_0} \quad (3.1)$$

Ein in den Reaktor eintretendes Volumselement kann auf verschiedenen Wegen zum Reaktorausgang gelangen und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten den Reaktor durchströmen. Die Verweilzeit der Volumselemente im Reaktor ist daher nicht einheitlich, es kommt zu einer Verweilzeitverteilung [13].

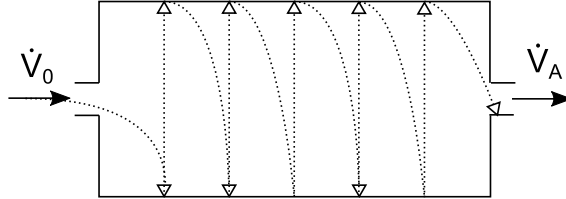


Abbildung 3.1: Idealer Partikelbewegung

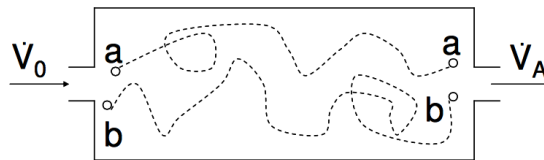


Abbildung 3.2: Realer Partikelbewegung [13]

Die Funktion $E(t)$ gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Teil der zum Zeitpunkt $t=0$ in den Reaktor gelangten Menge n_0 diesen nach der Zeit t am Ausgang wieder verlassen hat [13].

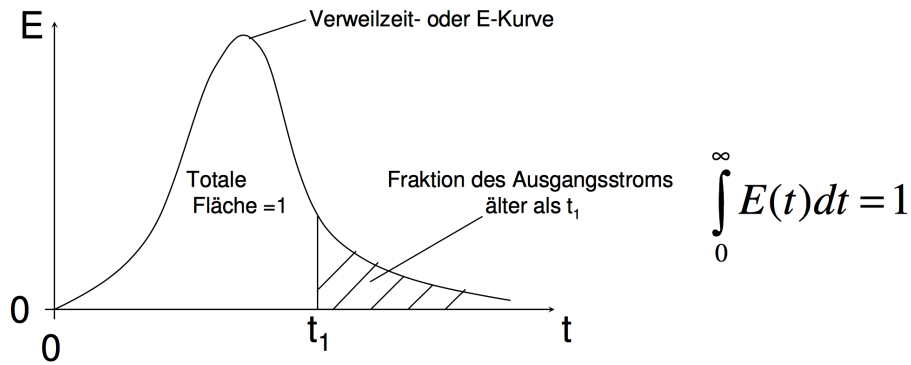


Abbildung 3.3: Verweilzeit in einem realen Reaktor [13]

Nach einer unendlich langen Beobachtungszeit ist die Wahrscheinlichkeit gleich eins, dass alle Volumselemente, die zum Zeitpunkt $t=0$ zugeführt wurden, den Reaktor wieder verlassen haben [13].

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad (3.2)$$

Der Anteil des Fluids, der am Ausgang jünger ist als t_1 , beträgt $\int_0^{t_1} E(t) dt$, derjenige, der älter ist, $\int_{t_1}^{\infty} E(t) dt = 1 - \int_0^{t_1} E(t) dt$ [13].

3.1.1 Experimentelle Bestimmung der Verweilzeitverteilung

Um die Verweilzeit eines realen Reaktors zu bestimmen, wird dem Reaktor am Eingang mittels einer Markierungssubstanz (Indikator, Spurstoff, Tracer) ein Signal aufgezwungen, und die durch das System hervorgerufenen Veränderungen des Eingangssignals am Ausgang des Reaktors vermessen (Antwortsignal). Diese Substanzen dürfen die physikalischen Eigenschaften des Systems nicht beeinflussen, z. B. müssen Viskosität und Dichte gleich bleiben. Auch müssen sie inert sein und nicht an Reaktorteilen adsorbiert werden. Bevorzugte Markierungssubstanzen sind Farbstoffe, Elektrolyte oder radioaktive Materialien. Letztere werden häufig in industriellen Anlagen aufgrund hoher Nachweisempfindlichkeit und der Möglichkeit, Messung von γ -Strahlung durch Reaktorwände durchzuführen, eingesetzt. Die Tracer-Zugabe erfolgt nach bekannten Funktionen; meist Sprung-, Puls- oder auch Sinusfunktion [13].

Sprungfunktion

Am Reaktoreingang wird die Konzentration eines Spurstoffes sprunghaft zur Zeit $t=0$ geändert. Die Antwort des Systems wird am Reaktorausgang gemessen, dabei wird die momentane Tracer-Konzentration $c(t)$ auf die konstante Eingangskonzentration c_0 bezogen [13].

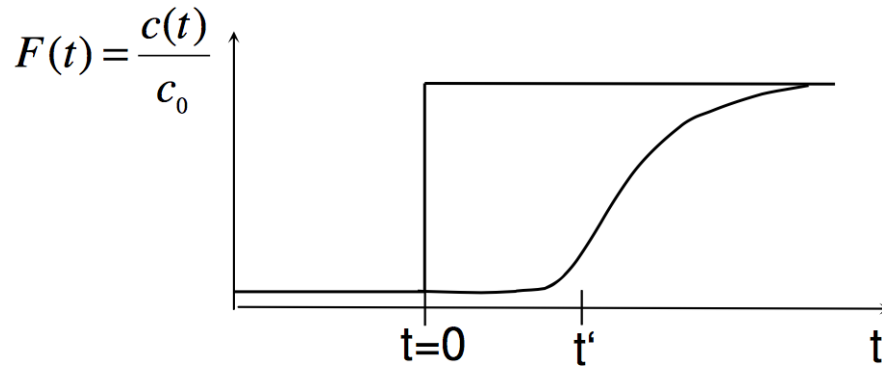


Abbildung 3.4: Antwort auf Sprungfunktion [13]

Die dimensionslose Antwortkurve wird als F-Kurve bezeichnet und nimmt Werte zwischen 0 und 1 an. Der Zusammenhang zwischen der aufgegebenen Größe E und der Antwortkurve F ist wie folgt gegeben:

$$F = \int_0^t E(t) dt \quad (3.3)$$

bzw. differenziert

$$\frac{dF}{dt} = E \quad (3.4)$$

Pulsfunktion

Hier wird am Reaktoreingang die gesamte Markierungssubstanz innerhalb einer sehr kurzen Zeit aufgegeben (Puls), dabei soll die Eingabezeit Δt sehr klein sein gegenüber der mittleren Verweilzeit τ . Die Antwort des Systems am Ausgang wird als C-Kurve bezeichnet.

3.1.2 Verweilzeit nach Friedmann und Marshall

Eines der meist zitierten Verweilzeitmodelle ist das von Friedmann und Marshall [14]. Es ist eine Funktion von Rotorlänge L , Massenstrom des Fluids \dot{m}_{fl} , Neigungswinkel ξ , Rotordurchmesser D , Rotordrehzahl n , Partikelgröße d_p und Massenstrom der Partikel \dot{m}_p . Sie wurde immer wieder modifiziert und versucht zu verbessern. Eines der modifizierten Modelle ist jenes von Arruda. Es wird in der Arbeit von Fernandes und Barrozo [15] zitiert [13].

Verweilzeit nach Friedmann und Marshall

Die Ergebnisse für verschiedene Neigungswinkel ξ werden in Abb. 3.5 dargestellt. Es ist ein indirekt proportionales Verhalten der Verweilzeit über der Drehzahl zu erkennen.

$$\tau = L \left(\frac{0,23}{\xi D_i n^{0,9}} \pm \frac{3,6 \cdot 10^{-4} \dot{m}_{fl}}{d_p^{0,5} \dot{m}_p} \right) \quad (3.5)$$

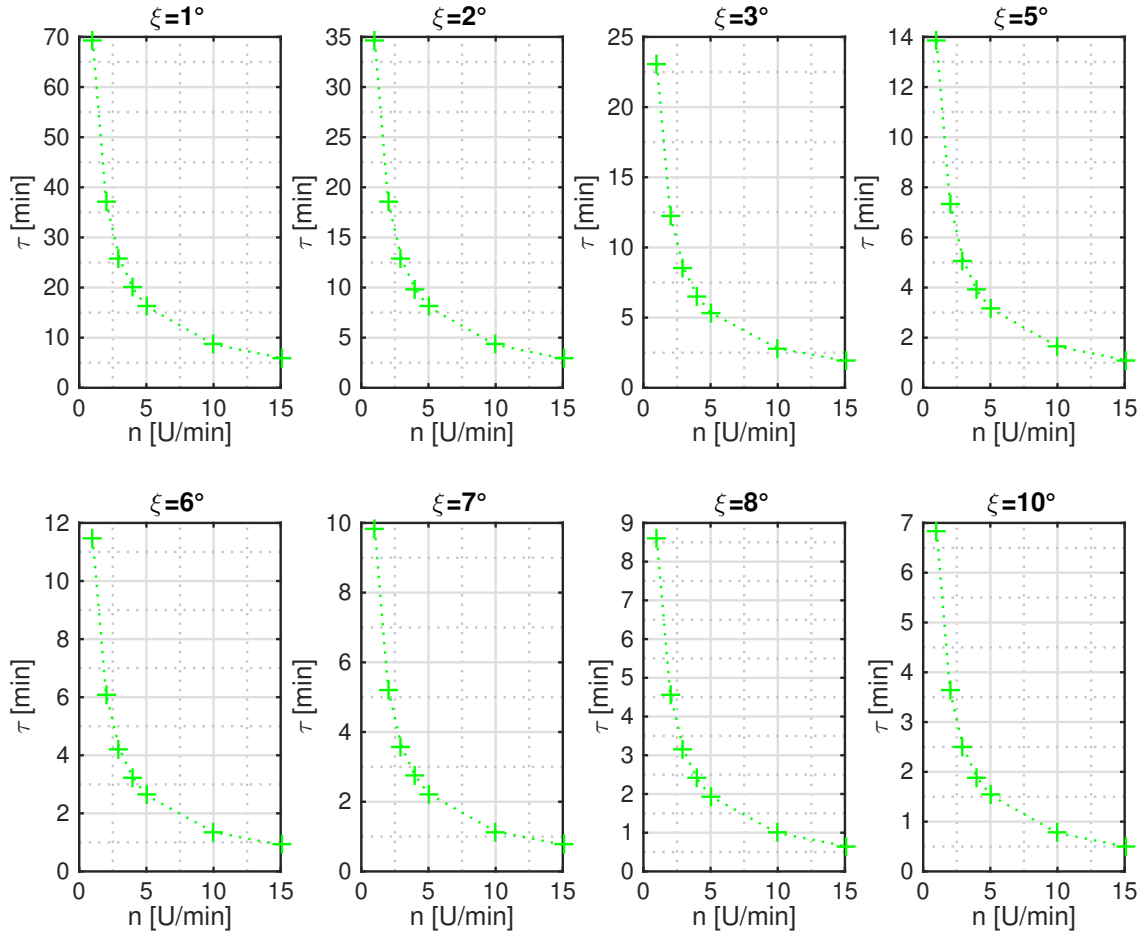


Abbildung 3.5: Verweilzeiten nach Friedmann und Marshall für verschiedene Neigungswinkel

Verweilzeit nach Friedmann und Marshall modifiziert von Arruda

Dieses Modell von Arruda ist analog zu dem von Friedmann und Marshall. Die Ergebnisse für verschiedene Neigungswinkel ξ werden in Abb. 3.6 dargestellt. Es ist hier auch ein indirekt proportionales Verhalten der Verweilzeit zur Drehzahl zu erkennen.

$$\tau = L \left(\frac{0,162}{\xi D_i n^{0,9}} \pm \frac{3,6 \cdot 10^{-4} \dot{m}_{fl}}{d_p^{0,5} \dot{m}_p} \right) \quad (3.6)$$

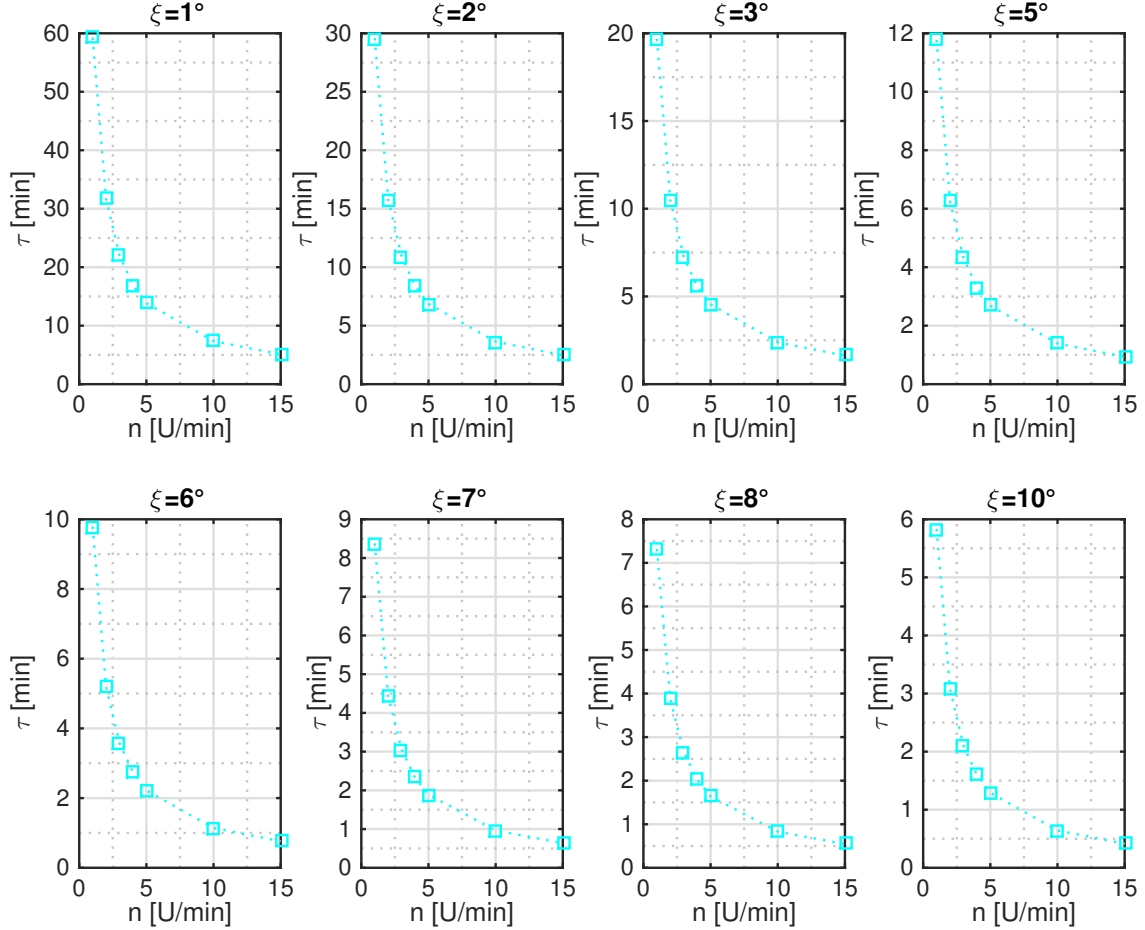


Abbildung 3.6: Verweilzeiten nach Friedmann und Marshall modifiziert von Arruda für verschiedene Neigungswinkel

3.1.3 Verweilzeit nach Thibault, Alvarez, Blasco und Vega

Das Verweilzeitmodell von Thibault et al., Alvarez, Blasco und Vega [16] wird mit der Gleichung 3.7 beschrieben. Diese ist eine Funktion von Steigung s , Massenstrom Fluid \dot{m}_{fl} , Drehzahl n , Massenstrom Partikel \dot{m}_p und der Dichte der Partikel ρ_p .

$$\tau = \rho_p \left(\frac{0,151}{\dot{m}_p^{0,81} n^{0,60}} \right) (1 - 11,97s)(1 - 5,4\dot{m}_{fl}) \quad (3.7)$$

Das Verweilzeitmodell von Thibault, Alvarez, Blasco und Vega [16] hat den großen Vorteil gegenüber den anderen Modellen, dass es bei einer horizontalen Lage (Neigungswinkel $\xi = 0^\circ$) auch entsprechende Ergebnisse liefert. Es ist hier auch indirekt proportionales Verhalten zu erkennen. Wobei ab dem Neigungswinkel $\xi = 3^\circ$ die Verweilzeit negativ wird. Die Ergebnisse variieren stark im Vergleich zu den anderen Verweilzeitmodellen. Die Ergebnisse werden in der Abb. 3.7 dargestellt.

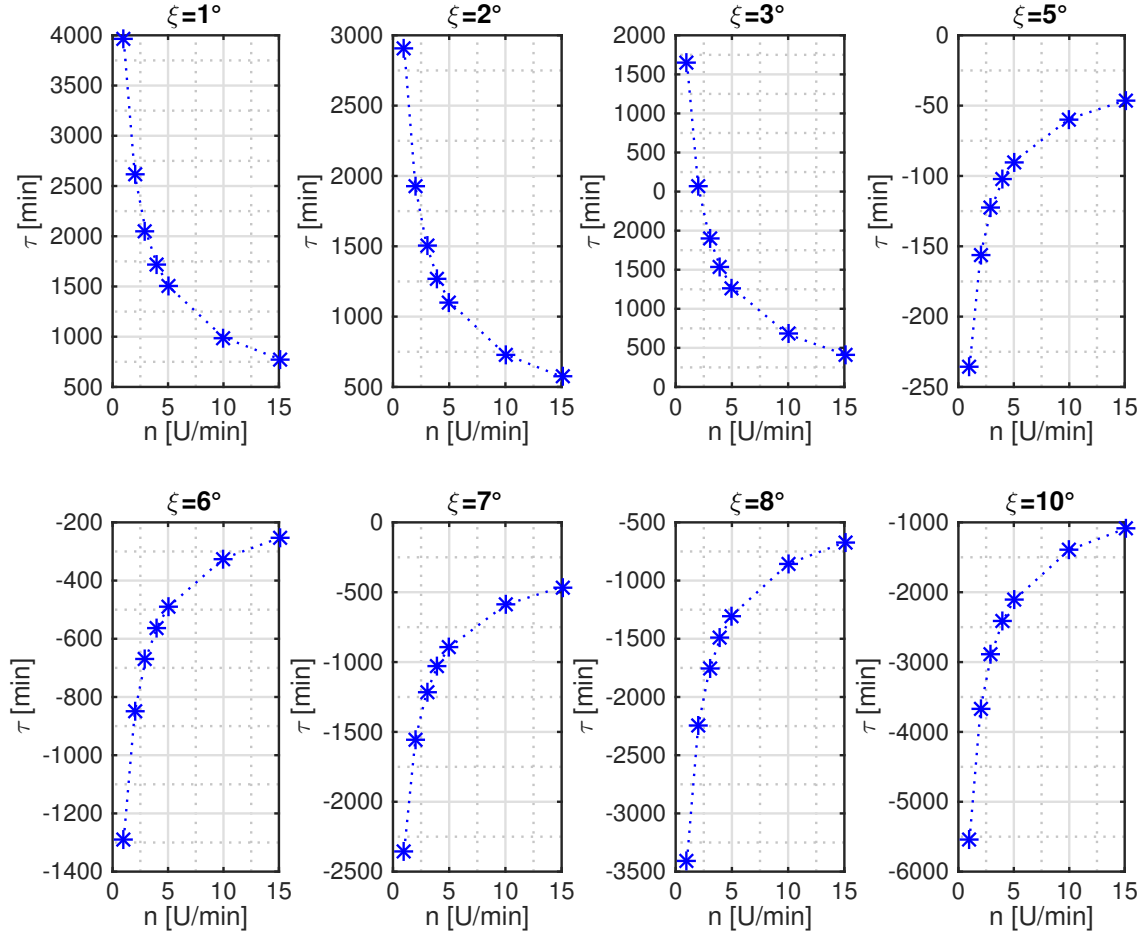


Abbildung 3.7: Verweilzeiten nach Jules Thibault, Pedro I. Alvarez, Roman Blasco und Rolando Vega für verschiedene Neigungswinkel

3.1.4 Verweilzeit nach Matchett und Baker

Das Verweilzeitmodell von Matchett und Baker ist sehr ähnlich zu dem von Seaman und Mitchell Verweilzeitmodell [10]. Bei diesem Modell wird die Verweilzeit in eine Gasphase und Feststoffphase unterteilt $\tau = \tau_G + \tau_S$. Verweilzeit in der Gasphase ist jene Zeit in der sich ein Partikel in freiem Fall befindet. Verweilzeit in der Feststoffphase ist jene Zeit, die ein Partikel in Kontakt mit anderen Partikeln im Schüttgut und in den Hubschaufeln verbringt.

$$\tau = \frac{1,1L}{nD_i[\tan\xi \frac{K_K}{K_{fl}}\sqrt{2} + a) + \frac{1}{K_{fl}}\sqrt{\frac{1}{gD_i}}U_{P1}]} \quad (3.8)$$

Partikelgeschwindigkeit in der Gasphase $Re \leq 220$:

$$U_{P1} = 7,45 \times 10^{-4} Re^{2,2} \frac{\eta U_{Gsuper} t_f}{\rho_p d_p^2} \quad (3.9)$$

Partikelgeschwindigkeit in der Gasphase $Re \geq 220$:

$$U_{P1} = 125 \frac{\eta U_{Gsuper} t_f}{\rho_p d_p^2} \quad (3.10)$$

Fallzeit der Partikel:

$$t_f = \left(\frac{2D}{g \cos \alpha} \right)^{1/2} K_{fall} \quad (3.11)$$

Partikel-Reynolds-Zahl

$$Re = \frac{U_{Gsuper} d_p \rho}{\eta} \quad (3.12)$$

$$\tau = \tau_S + \tau_G \quad (3.13)$$

$$\frac{\tau_S}{\tau_G} = \frac{K_{fl}}{n} \sqrt{\frac{g}{D_i}} \quad (3.14)$$

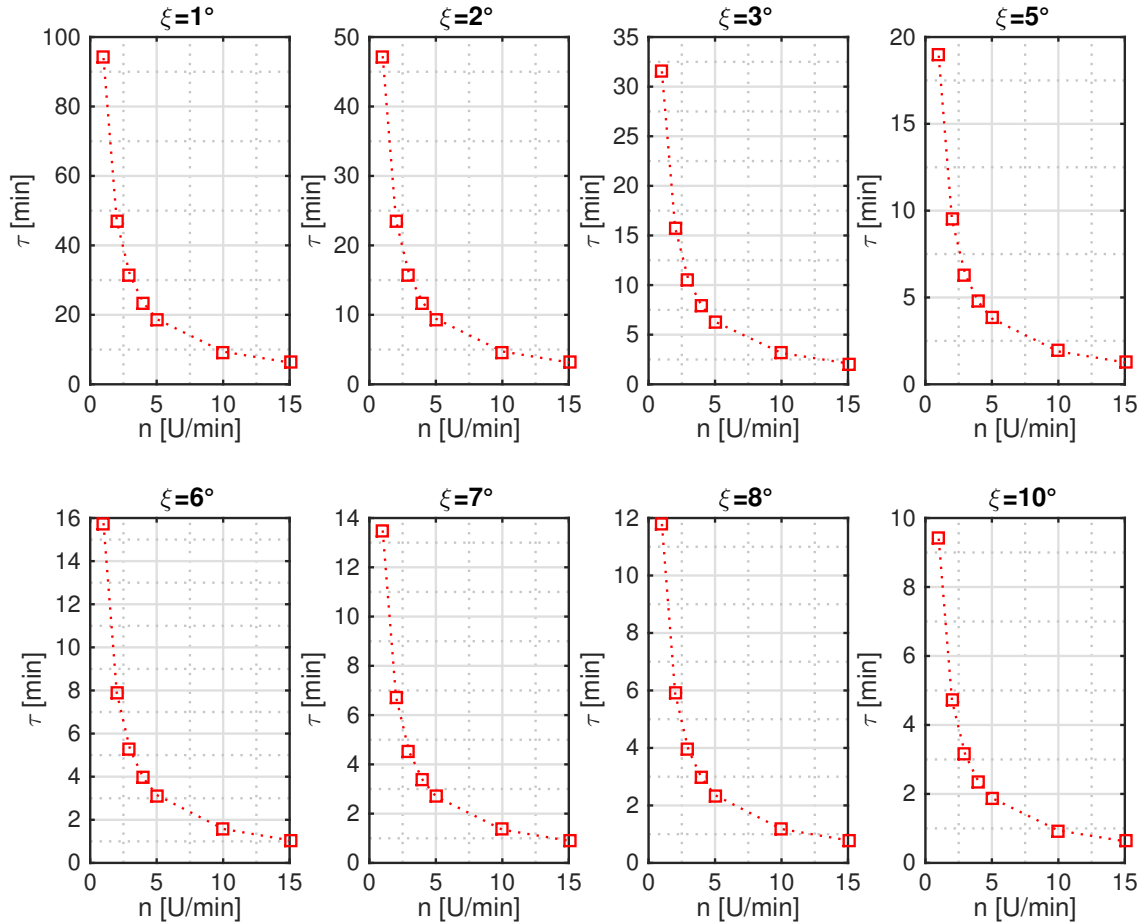


Abbildung 3.8: Verweilzeit nach Matchett und Baker für verschiedene Neigungswinkel

3.1.5 Verweilzeit nach AIChE

Das Verweilzeitmodell vom American Institute of Chemical Engineers (im weiteren Verlauf nur noch AIChE genannt), [17], ist analog zu dem in Abschnitt 3.1.2 angeführten Modell von Friedmann und Marshall. Es ist eine Funktion von Rotorlänge L , Partikelgröße d_p , Rotorinnendurchmesser D_i , Steigung s , Drehzahl n , dem Massenstrom der Partikel \dot{m}_p und dem Massenstrom des Fluids \dot{m}_{fl} . Es zeigt sich auch hier ein indirekt proportionales Verhalten der Verweilzeit τ zur Drehzahl n an. Die Ergebnisse werden in der Abb. 3.9 dargestellt.

$$\tau = \frac{0,3L}{sD_i n^{0,9}} \pm \frac{118BL\dot{m}_p}{\dot{m}_{fl}} \quad (3.15)$$

$$B = 5d_p^{-0,5} \quad (3.16)$$

Die Ergebnisse werden in der Abb. 3.9 dargestellt.

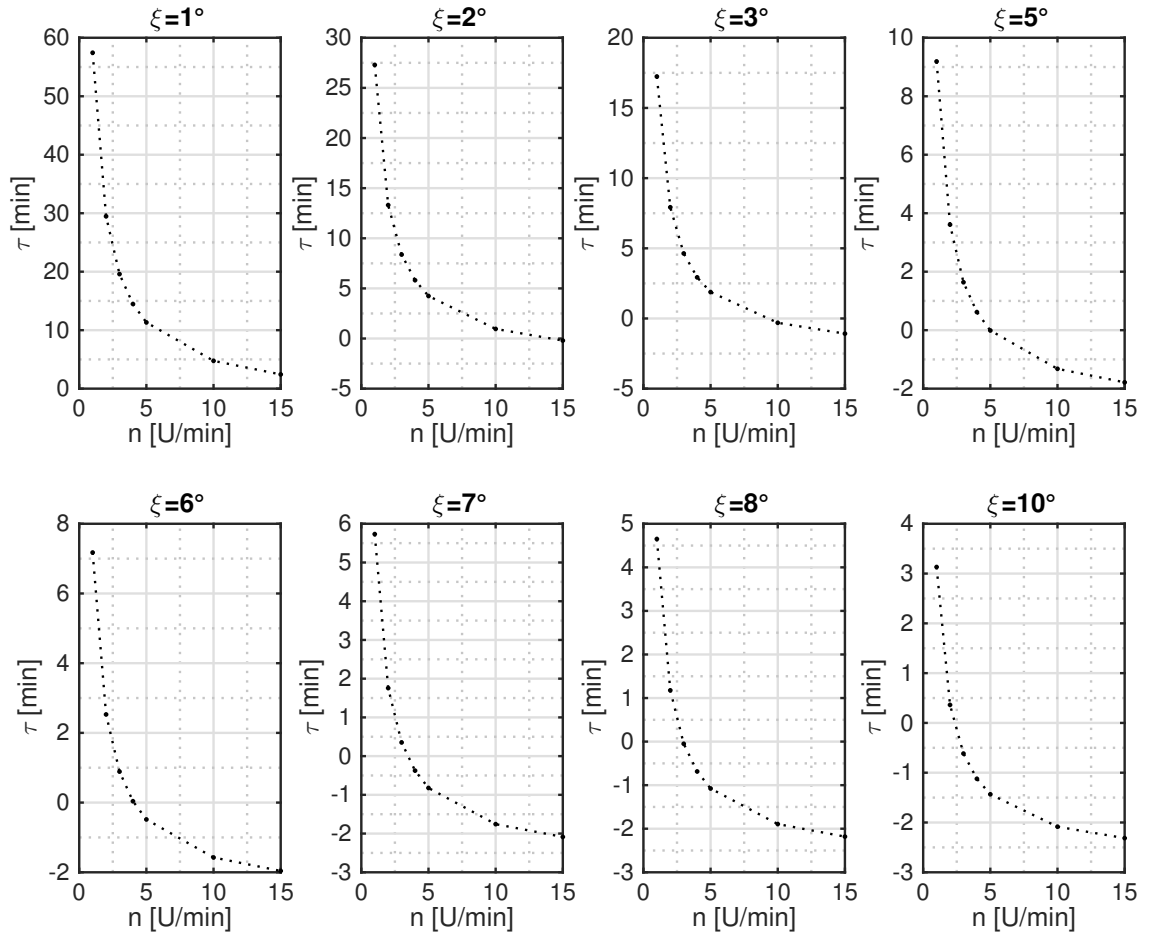


Abbildung 3.9: Verweilzeit nach AIChE für verschiedene Neigungswinkel

3.1.6 Verweilzeit nach Alvarez und Shene

Das Verweilzeitmodell von Alvarez und Shene [18] ist eine Funktion von Partikelgröße d_p , Fluid-dichte ρ_f , Massenstrom des Fluids \dot{m}_{fl} , Massenstrom der Partikel \dot{m}_p , Drehzahl n und der Steigung

s. Es zeigt auch hier ein indirekt proportionales Verhalten wie bei all den anderen Modellen. Die Ergebnisse werden in der Abb. 3.10 dargestellt.

$$\tau = \frac{0.05659d_p^{0.032}\rho_f^{0.956}}{\dot{m}_p n(18,95s+1)} + \frac{411d_p^{-0.065}\rho^{0.02}}{27,22s+1} - \frac{6,5\dot{m}_{fl}^{0.5}}{29,19s+1} \quad (3.17)$$

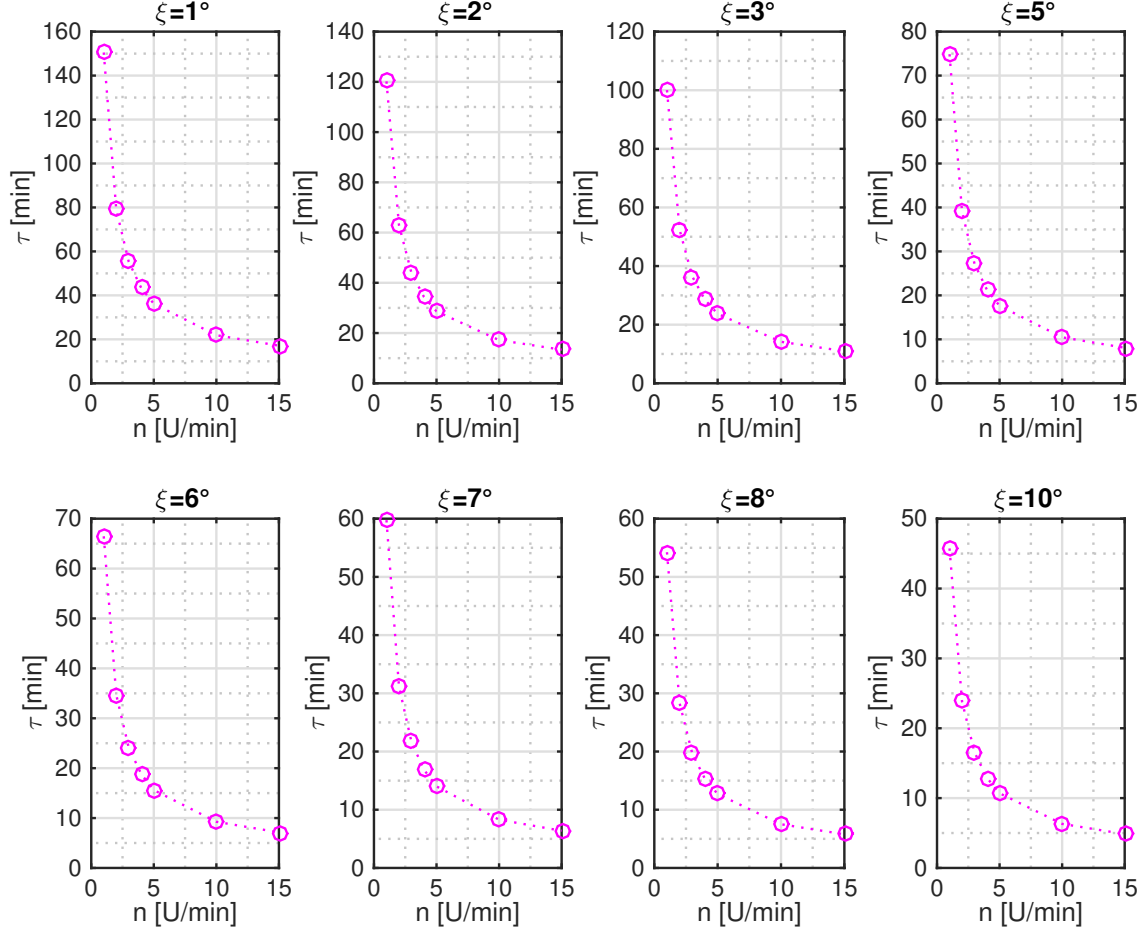


Abbildung 3.10: Verweilzeit nach Alvarez und Shene für verschiedene Neigungswinkel

3.1.7 Vergleich der Verweilzeit-Modelle mit experimentellen Daten

In Thibault et al. [16] werden die einzelnen Verweilzeitmodelle mit experimentellen Daten verglichen. Es wurden 192 Experimente mit vier verschiedenen Partikelarten (Sand, Holzspäne, Fischmehl und Sojaschrot), verschiedenen Hubschaufelgeometrien und zusätzlicher Variation von Drehzahl N , Massenstrom Fluid \dot{m}_{fl} , Massenstrom Partikel \dot{m}_p und Neigungswinkel ξ durchgeführt. Für jede Partikelart sind zwei unterschiedliche Partikelmassenströme \dot{m}_p (F), zwei Neigungen ξ (0 und 0,035m/m), drei Drehzahlen (5, 9 und 14 U/min) und vier Fluidmassenströme \dot{m}_{fl} (G) (0, 0,0076, 0,0137 und 0,0222 kg/s) als Parameter eingestellt worden. Alle möglichen Kombinationen aus diesen vier Parametern führten zu 48 Experimenten für eine Partikelart und in Summe 192 Experimente für alle Partikelarten. Die Experimente werden mit trockenen Partikeln durchgeführt. Der Rotationstrommeltrockner (s. Abb. 3.11), der für die Experimente zum Einsatz kam, ist ein Direktkontakttrockner mit Gleichstromtrockenprozess. Das Drehrohr hat einen Durchmesser von 0,3 m und ist 3 m lang. Das Äußere des Drehrohrs ist mit Glaswolle isoliert, um Wärmeverluste

zu minimieren [16].

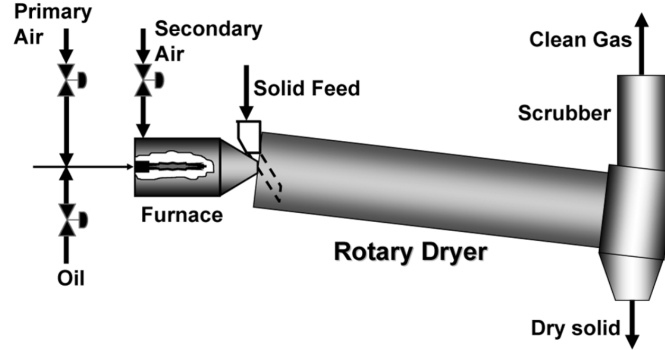


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung eines Rotationstrommeltrockners [16]

Das Drehrohr ist in sechs gleichmäßige Abschnitte unterteilt. In jedem dieser Abschnitte befinden sich vier unterschiedliche Hubschaufelgeometrien (s. 3.12), die gleichmäßig am Umfang verteilt sind. Die vier Hubschaufelgeometrien sind entweder gerade oder abgewinkelte Hubschaufeln mit 75° , 90° oder 105° [16].

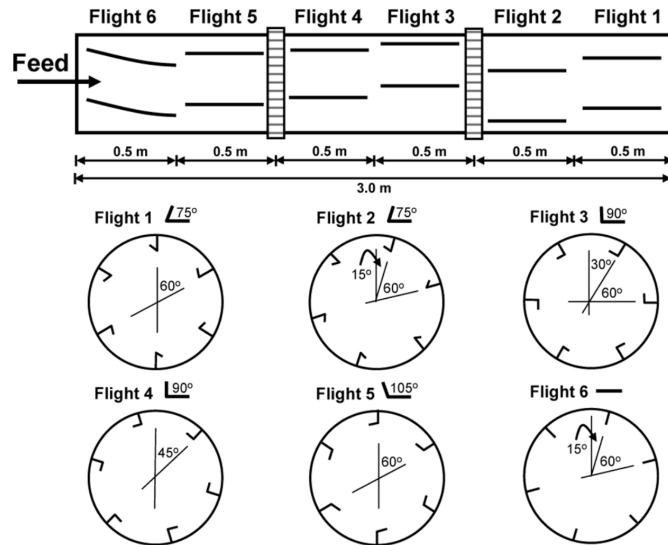


Abbildung 3.12: Darstellung des Querschnitts mit verschiedenen Hubschaufeln [16]

Diskussion und Erkenntnisse

Mit den Ergebnissen aus den Experimenten mit den vier unterschiedlichen Partikelarten werden Beziehungen zwischen der Verweilzeit τ und den physikalischen Eigenschaften der Partikel sowie der höchsten Korrelation gesucht. Die vier Parameter mit den höchsten Korrelationskoeffizienten zu der Verweilzeit τ sind der Neigungswinkel ξ , die Drehzahl der Trommel N , der Massenstrom der Partikel \dot{m}_p (F) und der Massenstrom des Fluids \dot{m}_{fl} (G) mit Korrelationskoeffizienten von 0.640, 0.586, 0.261 und 0.12 [16].

$$\tau = \rho_p f_1(1/\dot{m}_p n) f_2(\xi) f_3(\dot{m}_{fl}) \quad (3.18)$$

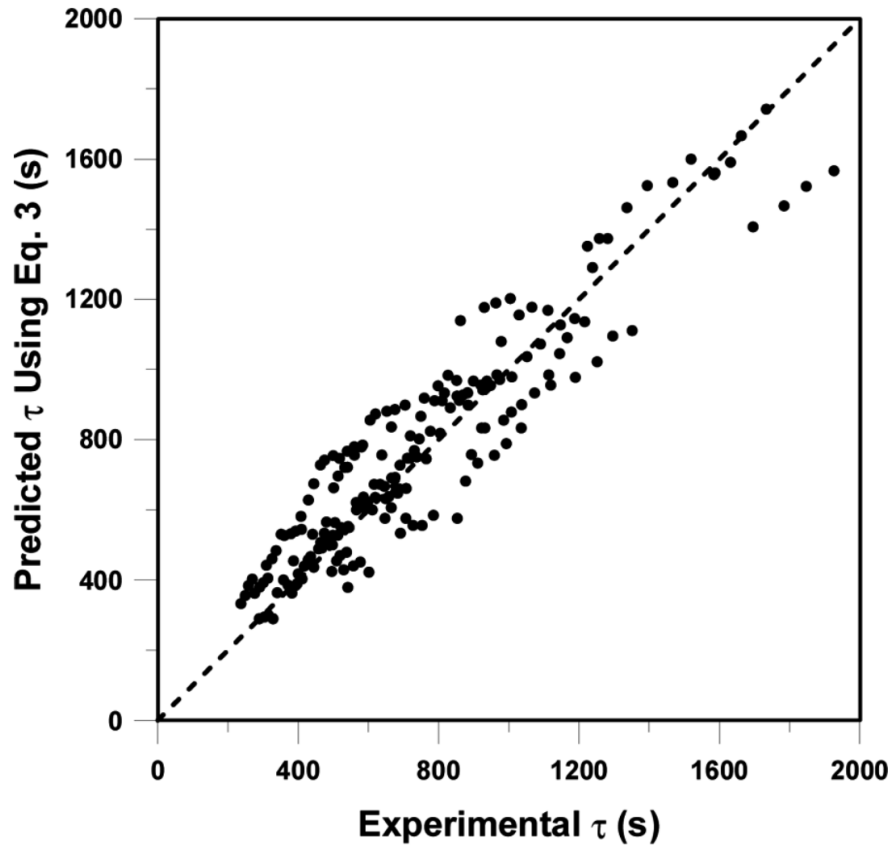


Abbildung 3.13: Paritätsdiagramm des Verweilzeitmodells von Thibault, Alvarez, Blasco und Vega [16]

Das Paritätsdiagramm in Abb. 3.13 vergleicht die empirisch ermittelten Verweilzeiten mit der Gleichung 3.7 von Thibault et al. mit den experimentell ermittelten Verweilzeiten, die mithilfe einer Markierungssubstanz (Indikator, Spurstoff, Tracer) gemessen werden. [16].

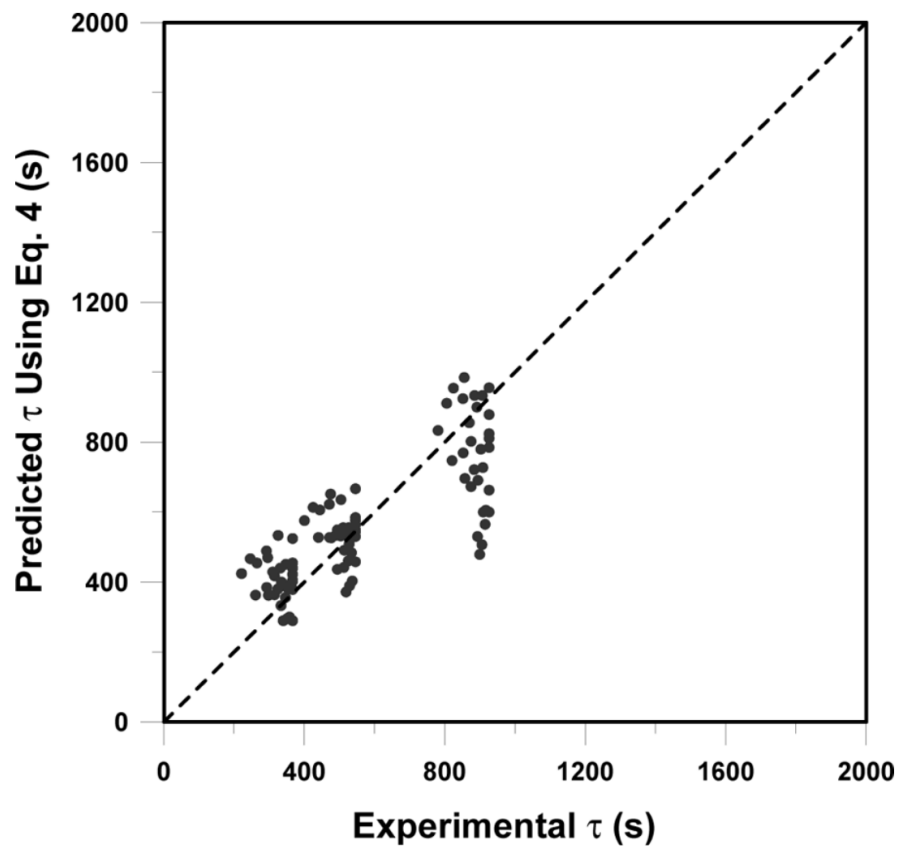


Abbildung 3.14: Paritätsdiagramm des Verweilzeitmodells von Friedmann und Marshall modifiziert von Perry und Green [16]

Das Paritätsdiagramm in Abb. 3.14 vergleicht ähnlich wie oben erwähnt die empirisch ermittelten Verweilzeiten mit dem von Perry und Green modifizierten Modell von Friedmann und Marshall mit den experimentell ermittelten Verweilzeiten [16]. Aus den beiden Diagrammen Abb. 3.13 und Abb. 3.14 ist zu erkennen, dass die empirisch ermittelten Verweilzeiten von den experimentell ermittelten abweichen. Das Verweilzeitmodell von Thibaut et al. weist eine bessere Korrelation als das Modell von Friedmann und Marshall auf.

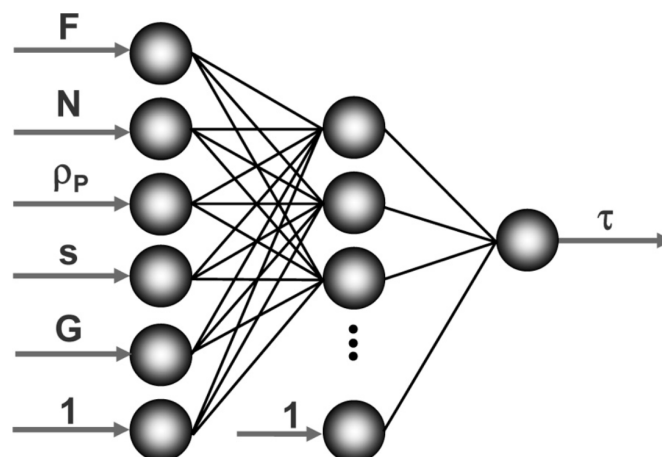


Abbildung 3.15: Feedforward-Neural-Network-Struktur [16]

Ein vorwärtsgerichtetes neuronales Netzwerk (FNN) ist ein gerichtetes, azyklisches Netz bestehend aus einer Eingabeschicht, einer Ausgabeschicht und mindestens einer verborgenen Schicht (s. Abb. 3.15). In diesem Netz wandert die Aktivierung von der Eingabeschicht zur Ausgabeschicht und die Einheiten (Perzeptronen) in einer Schicht sind mit jeder anderen Einheit in der nächsthöheren Schicht verbunden. Die gesamte mittlere Schicht wird als versteckte Schicht bezeichnet, da sie nicht direkt Eingaben von der Umgebung aufnimmt und auch keine Ausgaben an die Umgebung abgibt. Aufgabe des vorwärtsgerichteten neuronalen Netzwerks ist es, eine gegebene mehrdimensionale Funktion möglichst gut zu approximieren [19].

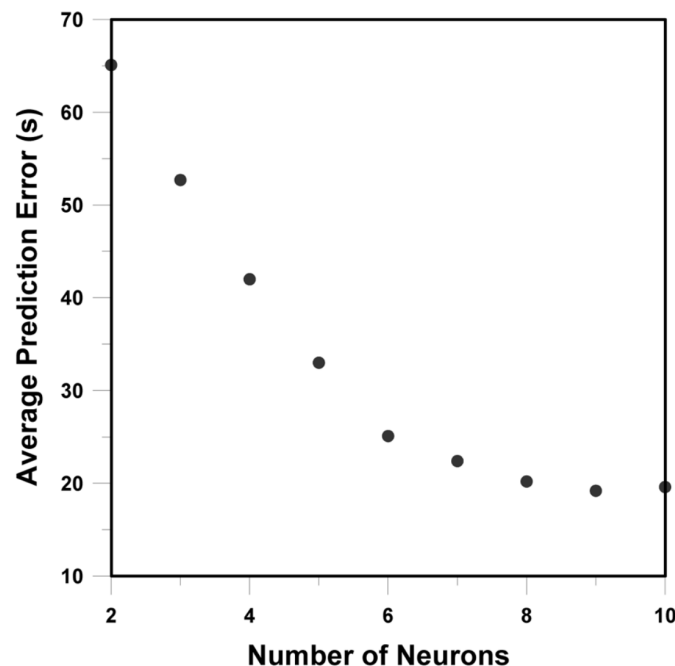


Abbildung 3.16: Durchschnittliche Vorhersagefehler über Anzahl der Neuronen [16]

Die Bestimmung der Anzahl der Eingangs- und Ausgangsneuronen für die FNN-Methode ist relativ einfach, weil diese mit der empirischen Modelle übereinstimmt. Allerdings muss die Auswahl der geeigneten Anzahl von Neuronen in der versteckten Schicht mit der Trial-and-Error-Methode bestimmt werden. In Abb. 3.16 werden die Vorhersagefehler der Verweilzeiten als Funktion über der Anzahl der Neuronen dargestellt. Die Vorhersagefehler der FNN-Methode sind geringer als bei den bisher beschriebenen Verweilzeitmodellen. Die Anzahl der versteckten Neuronen ist umgekehrt proportional zu den durchschnittlichen Vorhersagefehler. Jedoch wird die Abnahme der durchschnittlichen Vorhersagefehler vernachlässigbar ab einer bestimmten Anzahl von versteckten Neuronen. Im vorliegenden Modell sind fünf oder sechs versteckte Neuronen vollkommen ausreichend, um eine gute Vorhersage über die Verweilzeiten zu erreichen [16].

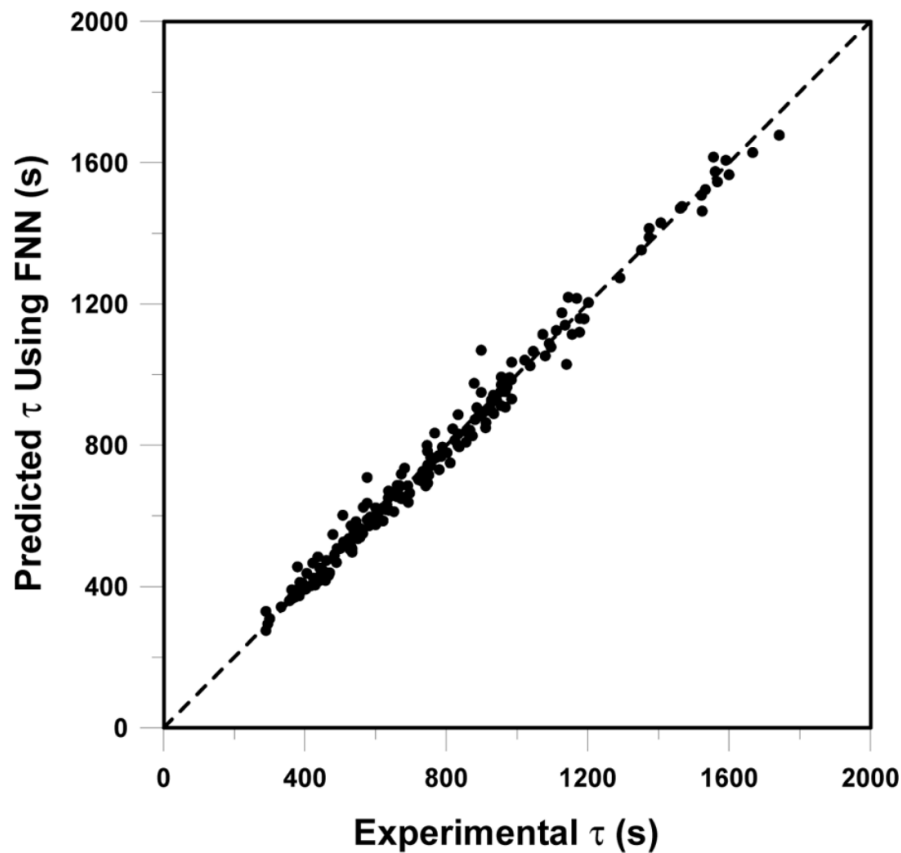


Abbildung 3.17: Paritätsdiagramm eines Verweilzeitmodells erstellt mithilfe der FNN-Methode mit fünf versteckten Neuronen [16]

In Abb. 3.17 wird das Paritätsdiagramm von der vorwärtsgerichteten neuronalen Netzwerk (s. Abb. 3.15) mit fünf versteckten Neuronen dargestellt. Ein Vergleich zu den vorherigen Paritätsdiagrammen zeigt, dass das Verweilzeitmodell, welches mit Hilfe des vorwärtsgerichteten neuronalen Netzwerk (FNN) erstellt worden ist viel näher an die experimentell ermittelten Verweilzeiten herankommen. Darüber hinaus ist es viel einfacher, ein repräsentatives Modell unter Verwendung der FNN-Methode abzuleiten, als zu versuchen, eine richtige Struktur einer empirischen Gleichung zu finden. Weiteres ist zu erwähnen dass die Implementierung des FNN-Modells viel einfacher ist.

3.2 Bewegung fester Partikel in Gasen

Die Partikel gelangen durch ein Rohr in den Stator und werden durch die in die Rotor eingeblasene Strömung mitgerissen. Unter Berücksichtigung der Partikeleigenschaften stellt sich die Frage, welche Strömungssituation sich im Rotor einstellt.

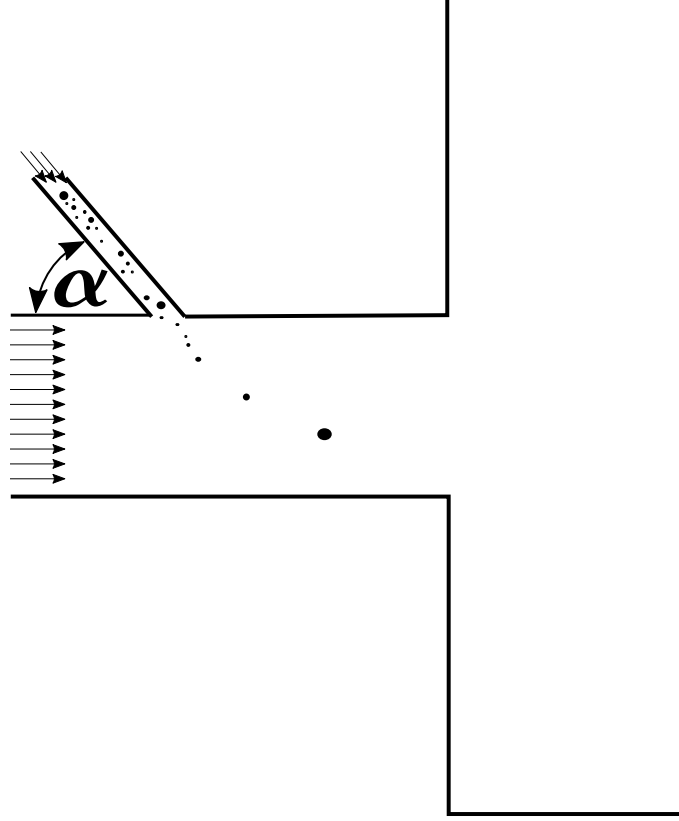


Abbildung 3.18: Mischung der Partikel mit Strömung

Die Berechnung der instationären Partikelbewegung in einer gegebenen Strömung lässt sich sehr anschaulich mit einem Lagrangeschen Verfahren durchführen, wobei die Partikelbahn durch die Änderung der Partikelgeschwindigkeit aufgrund der angreifenden Kräfte berechnet wird. Es werden also mindestens zwei gewöhnliche Differenzialgleichungen für den Ort und die Geschwindigkeit gelöst [20]. Nach Sommerfeld lauten die Bewegungsgleichungen für die Bewegung von festen Partikeln in Gasen:

$$\frac{d\vec{x}_p}{dt} = \vec{u}_p \quad (3.19)$$

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \sum \vec{F}_i \quad (3.20)$$

Die Bewegungsgleichung für sphärische Partikel in ruhenden Fluiden und bei geringen Partikel-Reynolds-Zahlen basiert auf den Arbeiten von Basset, Boussinesq und Osee und wird daher auch vielfach BBO-Gleichung genannt. Die Bewegungsgleichung wurde von Maxey und Riley für den

Stokes-Bereich hergeleitet, welche die Terme Trägheitskraft, Widerstandskraft, Druckkraft, virtuelle Massenkraft, Basset-Kraft und Schwerkraft enthält [20].

Die auf den Partikel angreifenden Kräfte setzen sich aus Widerstandskraft \vec{F}_W , Druck- und Auftriebskraft \vec{F}_P , Feldkräften wie z. B. Schwerkraft, Zentrifugalkraft, thermophoretischen Kräften und elektrischen oder magnetischen Kräften, virtueller Massenkraft \vec{F}_V und Basset-Kraft \vec{F}_B zusammen. Es werden nur die Widerstandskraft \vec{F}_W und die Schwerkraft \vec{F}_G berücksichtigt. Virtuelle Masse \vec{F}_V und Basset-Kraft werden nicht berücksichtigt, weil $\frac{\rho_f}{\rho_p} \simeq 10^{-3}$.

Widerstandskraft:

$$\vec{F}_W = \frac{\rho_f}{2} \frac{\pi}{4} d_p^2 C_W (\vec{u}_f - \vec{u}_p) |\vec{u}_f - \vec{u}_p| \quad (3.21)$$

Gewichtskraft:

$$\vec{F}_G = m_p \vec{g} \quad (3.22)$$

Partikel-Reynolds-Zahl:

$$Re_p = \frac{\rho_f d_p |\vec{u}_f - \vec{u}_p|}{\eta_{fl}} \quad (3.23)$$

Widerstandsbeiwert:

$$C_w = \frac{24}{Re_p} (1 + 0,15 Re_p^{0,687}) \quad 0,5 \leq Re_p \leq 1000 \quad (3.24)$$

Zur numerischen Lösung der gewöhnlichen Differentialgleichung wird ein Euler-Verfahren erster Ordnung verwendet. Die Berechnung der Fallzeit des Partikels ist für die Ermittlung der Anzahl der Rechenschritte erforderlich.

Fallzeit:

$$t_{fall} = \sqrt{\frac{2h}{9,81 \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right)}} \quad (3.25)$$

Der Zeitschritt wird mithilfe der Partikelrelaxationszeit festgelegt [20].

$$\Delta_t = 0,1 \frac{4}{3} \frac{\rho_p d_p^2}{Re_p C_w \eta_{fl}} \quad (3.26)$$

Die Gesamtanzahl der Rechenschritte wird durch

$$n_{\text{Schritteanzahl}} = \frac{t_{\text{fall}}}{\Delta_t} \quad (3.27)$$

bestimmt. Die Lösung der gewöhnlichen Differentialgleichung wird in der Abb. 3.19 dargestellt. Es ist zu erkennen dass bei einem Rohrdurchmesser von $D_i = 0.142$ m die größten Partikel eine Distanz von ca. $x_p = 0.16$ m weit fliegen. Je größer der Partikeldurchmesser d_p desto weiter fliegen die untersuchten Partikel.

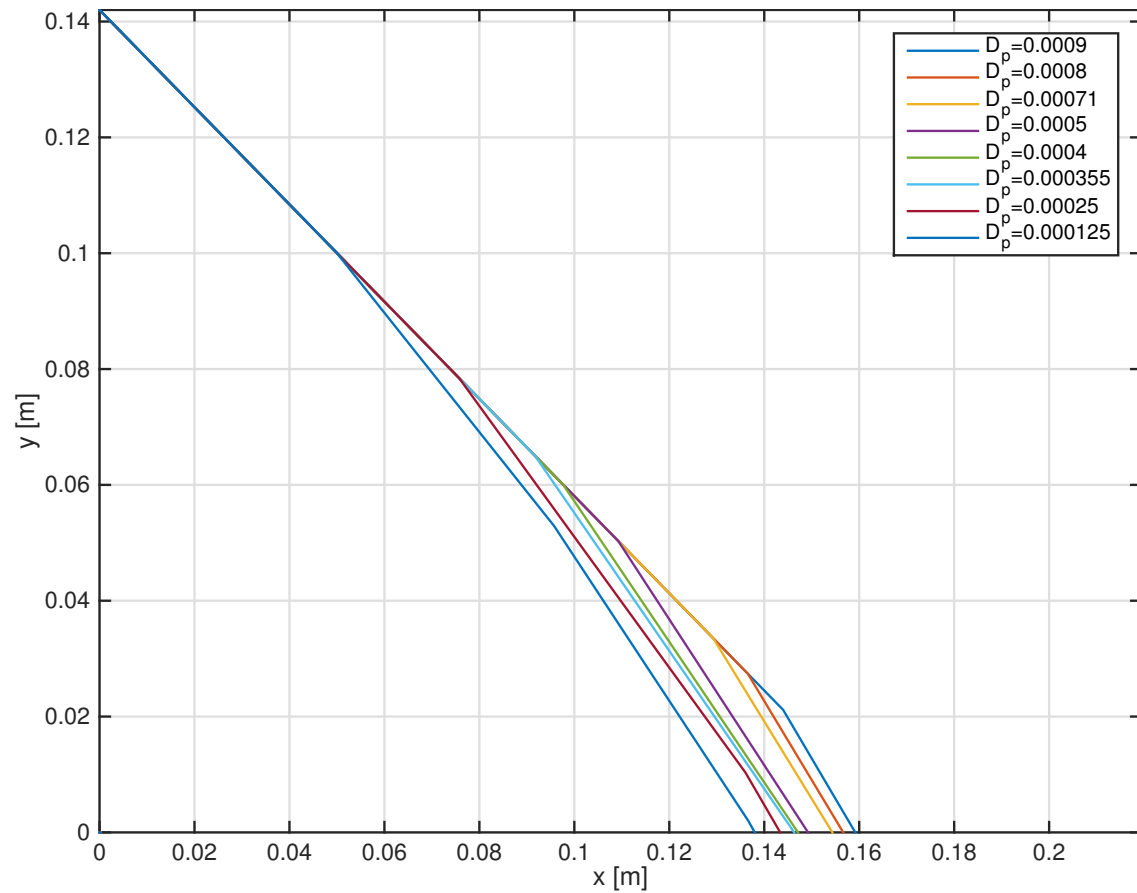


Abbildung 3.19: Partikelweg aller Partikelgrößen im Drehrohrreaktor

Die Ergebnisse der gewöhnlichen Differentialgleichung für die einzelnen Partikelgrößen werden in der Abb. 3.20 dargestellt.

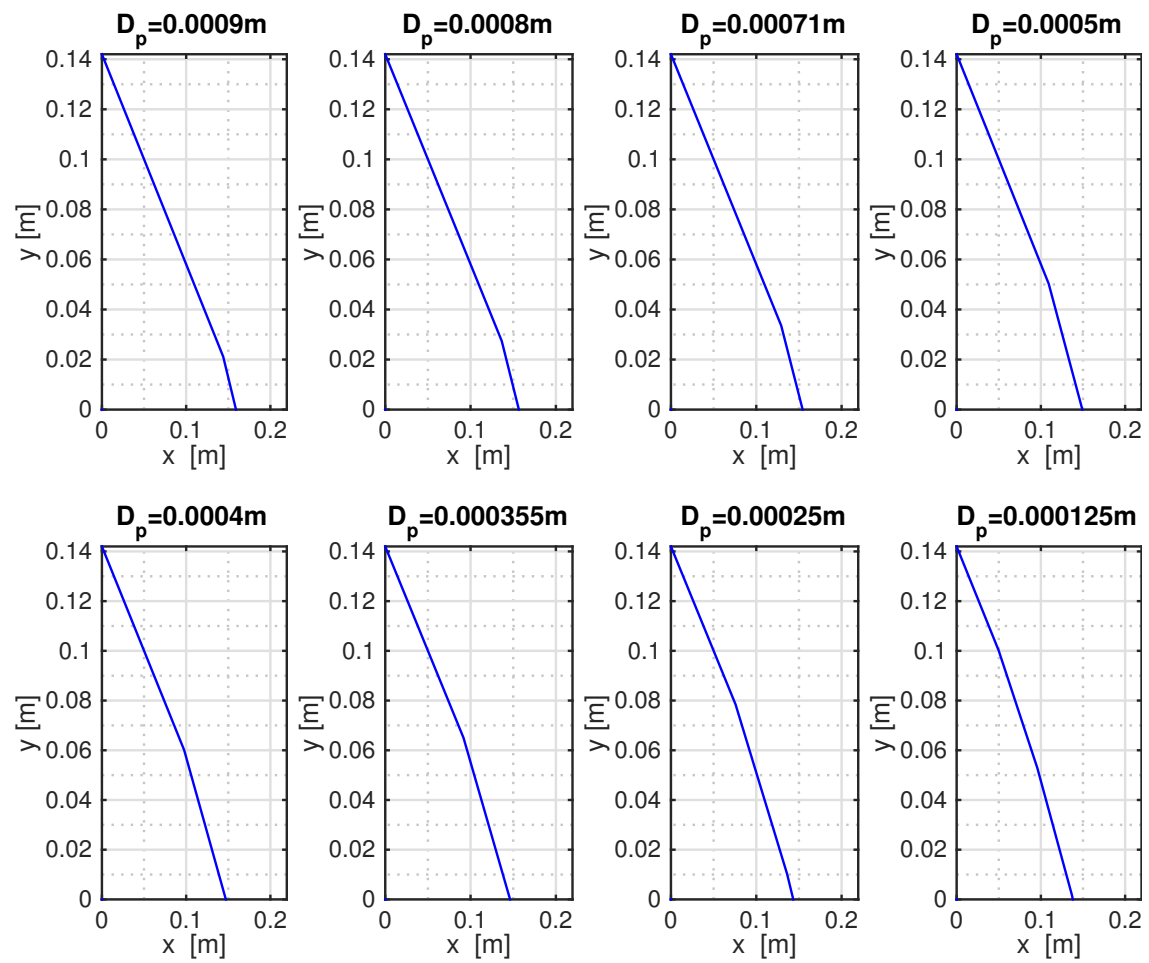


Abbildung 3.20: Partikelweg einzelner Partikel

3.3 Simulation mit Barracuda

Die numerische Simulation mithilfe von Barracuda im Rahmen dieser Arbeit wurde durchgeführt, um einerseits Aussagen über das Verhalten der Partikel in der Luftströmung zu finden und andererseits einen Vergleich zum analytisch berechneten Partikel-Fluid-Verhalten zu gewinnen. Ein großes Augenmerk liegt auf der Einströmung des Partikel-Fluid-Gemisches in den Drehrohrreaktor. Gelingen die Partikel in den Drehrohrreaktor oder landen sie größtenteils im Rohr?

3.3.1 Netzgeometrie

Die Modellgeometrie wurde mithilfe der Konstruktionssoftware Catia erstellt (s. Abb. 3.21). Modelliert wurde der Drehrohrreaktor als ein zweidimensionales Objekt, um den Rechenaufwand zu minimieren. Das Rechenetz wurde mit der Software Barracuda CPFD erstellt.



Abbildung 3.21: Modellgeometrie

3.3.2 Randbedingungen

Als globale Einstellung wurde eine isothermische Strömung mit einer Temperatur von $T_{luft} = 300K$ gewählt. Für die Mehrphasenströmung wurden als Partikel Sand mit folgenden Eigenschaften gewählt.

Chemische Zusammensetzung	SiO_2
Dichte ρ_p	2200 kg/m ³
Molekulargewicht M	60,0843 g/mol
Wärmeleitfähigkeit λ_p	1,45617 J/smK
Spezifische Wärmekapazität c_p	745,318 J/kgK

Tabelle 3.2: Physikalische Eigenschaften Sand

Partikeldurchmesser [m]	Anteil am gesamten Sand [%]
0,0009 m	1 %
0,0008 m	3 %
0,00071 m	28 %
0,0005 m	49 %
0,0004 m	15 %
0,000355 m	3 %
0,00025 m	1 %

Tabelle 3.3: Partikelgrößenverteilung Sand

Eine Simulationszeit $t_{simulation} = 4s$ und eine Zeitschritt $\Delta t = 0,001s$ wurden für die Simulation gewählt. Die Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl CFL (CFL-Zahl oder auch kurz Courant-Zahl) gibt an, um wie viele Zellen sich die betrachtete Größe pro Zeitschritt maximal fortbewegt. Motiviert

wird dies durch die sogenannte Courant-Bedingung, die aussagt, dass das explizite Differenzenverfahren nur stabil ist, wenn

$$CFL = c \frac{\Delta t}{\Delta x_{Zelle}} \leq 1 \quad (3.28)$$

für explizite Verfahren [21]. Im Gegensatz hierzu sind implizite Verfahren auch noch bei weit größeren CFL-Zahlen stabil (10-1000), je nach Lösungsverfahren und Komplexität des Strömungsproblems.

3.3.3 Simulationsergebnisse

Ein großer Vorteil der numerischen Strömungssimulation ist die Visualisierung der zu untersuchenden Partikel-Fluid-Interaktionen. Mithilfe der Strömungssimulation ist es möglich, die Erkenntnisse aus den Ergebnissen in den Konstruktionsprozess einfließen zu lassen. Bei der Visualisierung der Partikel-Fluid-Strömung lässt sich das Verhalten der Partikel farblich erkennbar machen.

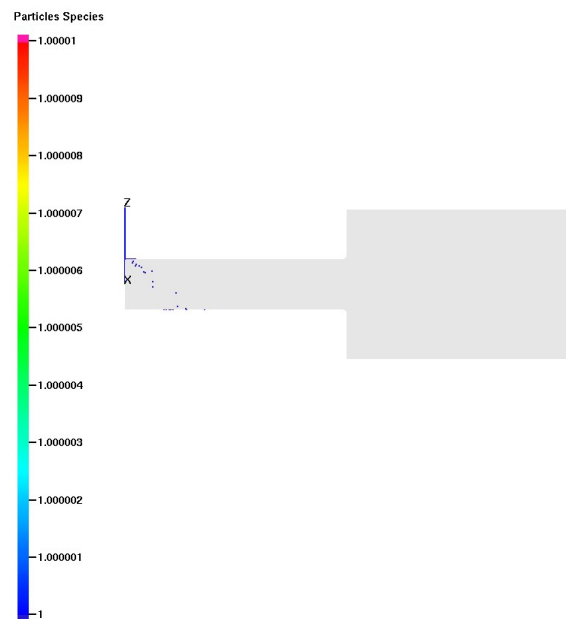
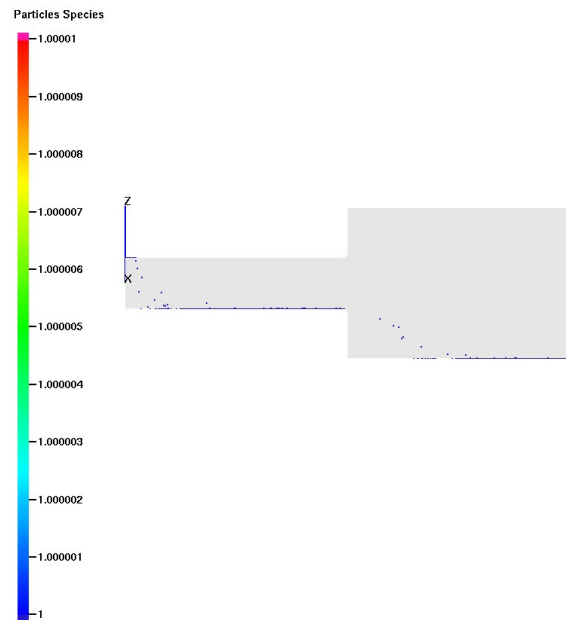
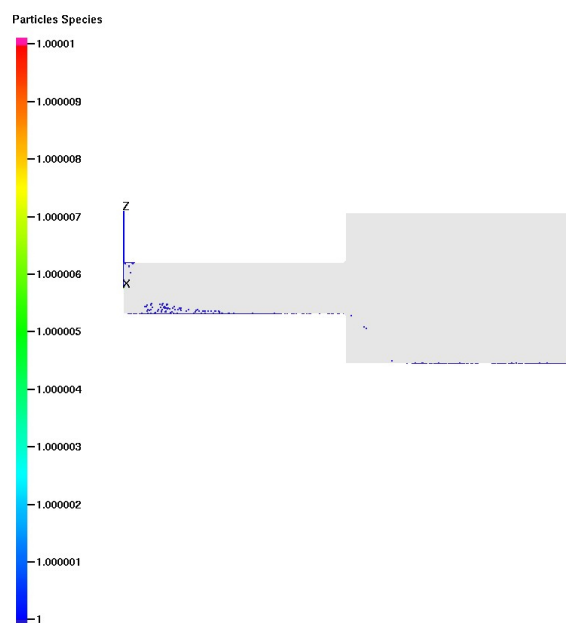
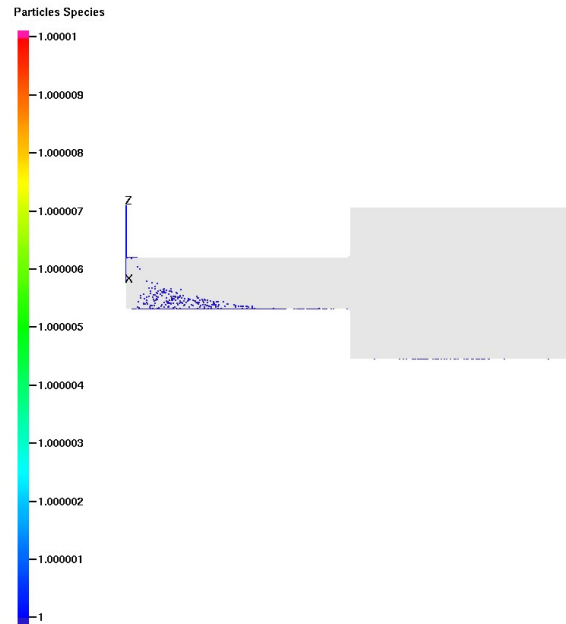
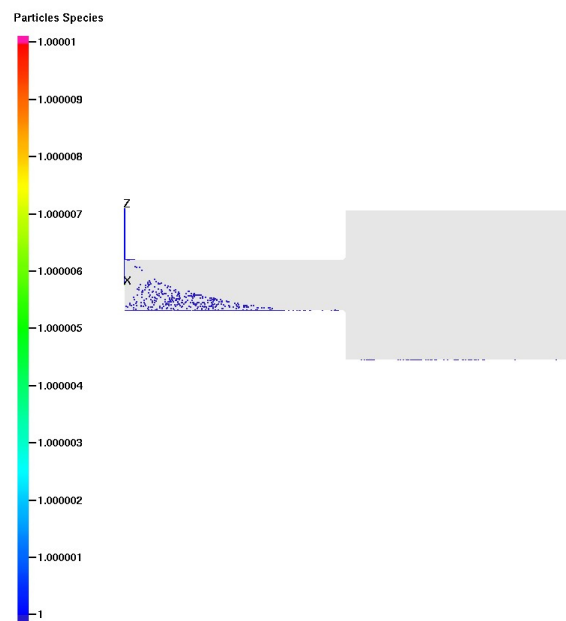


Abbildung 3.22: 2D-Partikelweg nach $t = \frac{1}{10} s$

Abbildung 3.23: 2D-Partikelweg nach $t = 1s$ Abbildung 3.24: 2D-Partikelweg $t = 2s$

Abbildung 3.25: 2D-Partikelweg $t = 3s$ Abbildung 3.26: 2D-Partikelweg $t = 4s$

3.4 Antriebsleistung

Für die Berechnung der Antriebsleistung gibt es empirisch ermittelte Formeln von D.J. van Dyk und L. Pretorius [22] für Drehrohröfen. Empirische Formeln für Rotationstrommeltrockner gibt es von C.M. van't Land [23] und dem AIChE [17].

3.4.1 Antriebsleistung nach D.J. van Dyk und L. Pretorius

Die Antriebsleistung nach Van Dyk und Pretorius [22] wird unterteilt in zwei Betrachtungen: Haft- und Gleitzustand. Am Beginn des Drehvorgangs wird die Ladung im Drehrohr mitgeschleppt (Stick-Condition), bis die Ladung den Winkel der maximalen Haftgrenze, die durch den Haftgrenzkoeffizienten μ_H gegeben ist, erreicht hat. Beim Überschreiten dieses Winkels beginnt die Ladung im Drehrohr zu rutschen (Slip-Condition).

Stick-und Slip-Condition:

Tangentialer Anteil der Gewichtskraft von der Ladung (Tangentialkraft):

$$F_t = m_v g \sin(\pi - \phi) \quad (3.29)$$

Ausbrechkraft:

$$F_{bf} = \mu_s m_v g \cos(\pi - \phi) \quad (3.30)$$

Solange der tangential Anteil der Gewichtskraft F_t kleiner als die Ausbrechkraft F_{bf} ist, wird die Ladung im Drehrohr mitgeschleppt und kann nicht im Drehrohr rutschen.

$$F_w = -F_t \quad F_t \leq F_{bf} \quad (3.31)$$

Wenn der tangentialer Anteil der Gewichtskraft F_t die Ausbrechkraft F_{bf} überschreitet, gilt:

$$F_w = \mu_c m_v g \cos(\pi - \phi) \quad F_t > F_{bf} \quad (3.32)$$

Die Formel für die Berechnung der Antriebsleistung als Betrachtungsfall der Stick-Condition lautet dann folgendermaßen:

Stick-Condition:

$$P_{stick} = \omega \left([J_m + \frac{1}{n^2}(J_0 + J_v)]\ddot{\theta}_m + \frac{1}{n}F_t L + \frac{1}{n}T \right) \quad (3.33)$$

Die Formel für die Berechnung der Antriebsleistung für den Betrachtungsfall Slip-Condition lautet dann folgendermaßen:

Slip-Condition:

$$P_{slip} = \omega \left([J_m + \frac{1}{n^2}J_0]\ddot{\theta}_m + \frac{1}{n}F_w R + \frac{1}{n}T \right) \quad (3.34)$$

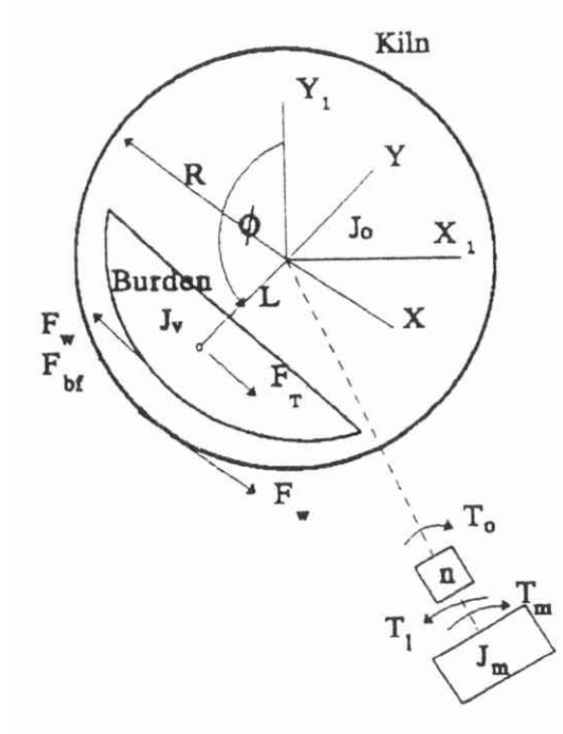


Abbildung 3.27: Drehrohröfen mit Ladung und Antriebsstrang [22]

Reibungsmoment der Wälzlager:

$$T = 2\mu_{brg} \frac{P}{2} \cos(30^\circ) \frac{l+k}{2} \quad (3.35)$$

3.4.2 Antriebsleistung nach C.M. van't Land

Die Antriebsleistung für einen Rotationstrommeltrockner mit Hubschaufeln lautet nach Gleichung 3.36. Für die Berechnung mit der empirischen Formel sind nur Drehzahl n , Trommeldurchmesser D , Gesamtgewicht von Trommel und Schüttgut sowie die Beladung der Hubschaufeln nötig [23].

$$P = \frac{n[34,3D_i w + 1,39(D_i + 0,6)W + 0,73W]}{134040} \quad (3.36)$$

3.4.3 Antriebsleistung nach AIChE

Sehr ähnlich zu C.M. van't Land gibt es eine empirische Formel vom AIChE [17] zur Berechnung der Antriebsleistung eines Rotationstrommeltrockners. Für die Berechnung mit der empirischen Formel sind nur Drehzahl N , Trommelaußendurchmesser D_a , Trommelinnendurchmesser D_i , Gesamtgewicht von Trommel und Schüttgut sowie die Beladung der Hubschaufeln nötig.

$$P = \frac{n(34,3D_i w) + (1,29D_a W) + (0,73W)}{2234} \quad (3.37)$$

3.4.4 Vergleich der Antriebsmomente

Das Antriebsmomentformel für Drehrohrofen nach Van Dyk und Pretorius [22] wird in Abb. 3.28 und Abb. 3.29 dargestellt. Das Ergebnis liefert ein lineares Verhalten der Drehzahl, die direkt proportional zum Drehmoment ist. Im Diagramm in Abb. 3.28 ist der Betrachtungsfall Stick-Condition und im Diagramm in Abb. 3.29 der Betrachtungsfall Slip-Condition dargestellt. Es ist zu erkennen dass der Betrachtungsfall Slip-Condition ein fast zehnfach höheres Drehmoment bei gleicher Drehzahl benötigt als der Betrachtungsfall Stick-Condition.

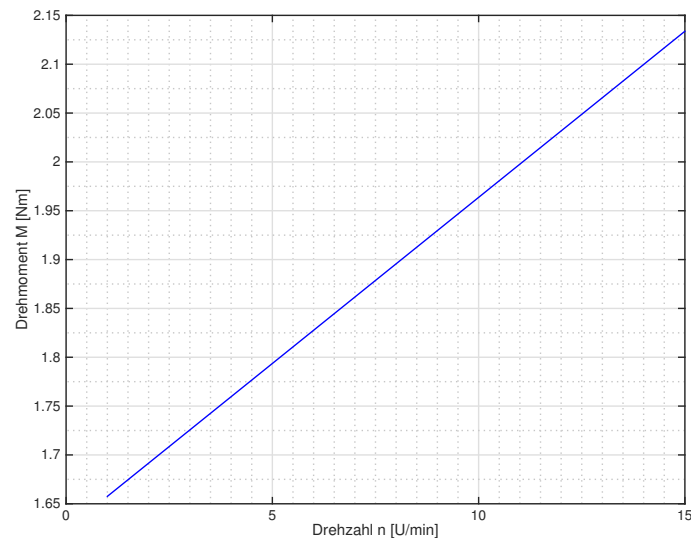


Abbildung 3.28: Antriebsmoment Betrachtungsfall Stick-Condition

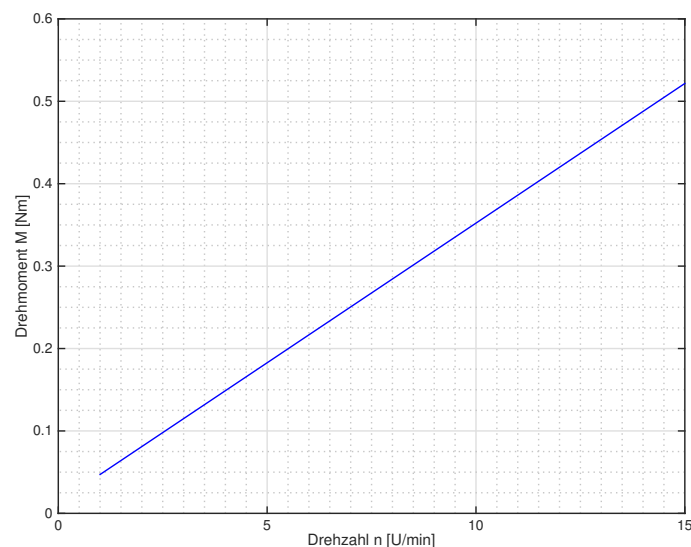
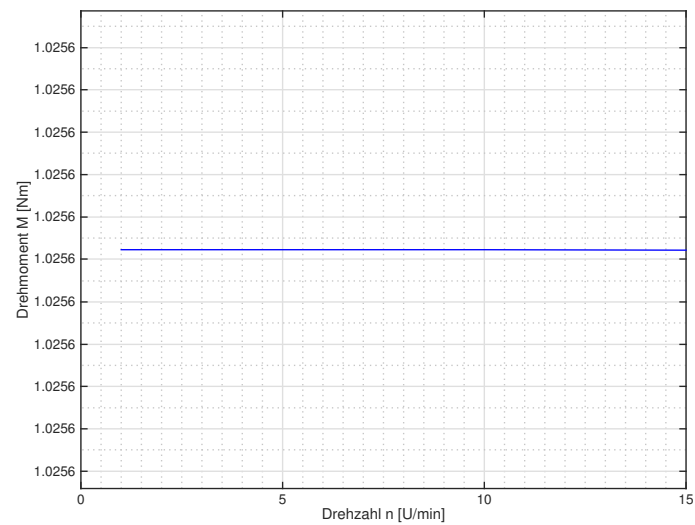
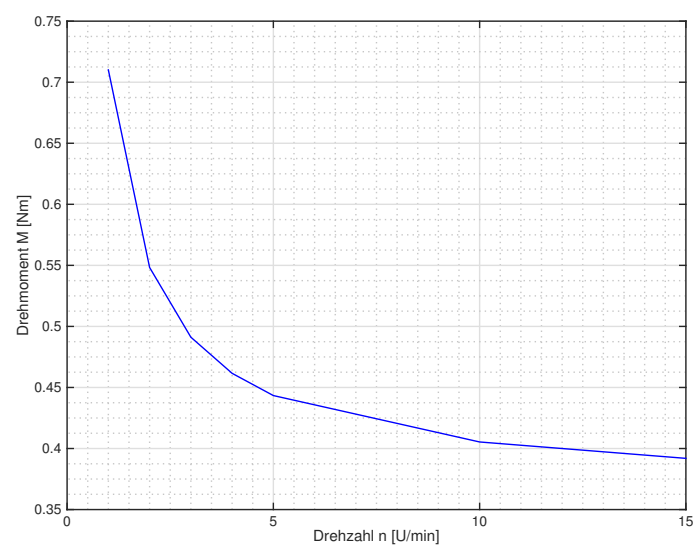


Abbildung 3.29: Antriebsmoment Betrachtungsfall Slip-Condition

Die Formel für die Antriebsleistung nach C.M. van't Land [23] (s. Abb. 3.30) zeigt ein konstantes Verhalten des Antriebsmomentes über der Drehzahl. Das Ergebnis ist gegenüber der Drehzahl konstant, weil die empirische Formel 3.36 keine Drehzahlabhängigkeit vorweist.

**Abbildung 3.30:** Antriebsmoment nach C.M. van't Land

Die Antriebsmomentformel für Rotationstrommeltrockner nach AIChE [17] ist in Abb. 3.31 dargestellt. Das Antriebsmoment zeigt hier ein indirekt proportionales Verhalten gegenüber der Drehzahl an. Die Formel ist ähnlich zu der von C.M. van't Land aufgebaut.

**Abbildung 3.31:** Antriebsmoment nach AIChE

Kapitel 4

Konstruktion Drehrohrreaktor

Unter Berücksichtigung folgender Rahmenbedingungen wurde der Drehrohrreaktor konstruiert. Der Übergang von der Eingangseinheit (Stator) zum Drehrohr (Rotor) und vom Drehrohr zur Ausgangseinheit (Stator) muss mit geringer Leckage abdichten und zugleich einen geringen Reibungswiderstand aufweisen. Als Rotorgehäuse ist durchsichtiges Material zu verwenden, um eine visuelle Beobachtung und Beurteilung der Bewegung der Partikel zu ermöglichen. Aufgrund der im Vergleich zu herkömmlichem Glas hohen Festigkeit sowie der geringen Sprödigkeit wurde Acrylglas verwendet. Als weitere Vorteile sind eine einfachere Verarbeitbarkeit sowie die geringeren Materialkosten zu nennen. Der Anforderung eines flexiblen Versuchsstandes mit variabler Schau-
felposition und -anzahl wurde durch einen inneren Käfig Rechnung getragen. Die Dimensionierung des Drehrohrreaktors ist so zu gestalten, dass er auf einem bereits vorhandenen Untergestell montiert werden kann. Das Untergestell stammt von einer Vorgänger-Diplomarbeit[24].

Der Versuchsreaktor ist als Kaltreaktor konzipiert. Mit dem Kaltreaktor sollen keine chemischen Reaktionen durchgeführt werden, sondern die physikalischen Eigenschaften des Kaltreaktors untersucht werden, um Informationen über Verweilzeiten, Gas-Feststoff-Kontakt und Mischverhalten in einem Drehrohrreaktor zu sammeln. Aus den Versuchswerten und Erkenntnissen des Kaltreaktors wird der Heißreaktor ausgelegt und konstruiert. Die Versuche werden mit Quarzsand und herkömmlicher Druckluft ausgeführt. Der Neigungswinkel der Rotorachse vom Drehrohrreaktor ist verstellbar. Dadurch ändern sich die Verweilzeiten der Partikel sowie der Gas-Feststoff-Kontakt. Mit dieser Konstruktion können Versuche in horizontaler und in geneigter Förderrichtung durchgeführt werden. Der Drehrohrreaktor besteht aus wesentlichen Hauptbaugruppen wie fahrbares Traggestell, Dosiereinheit, Drehrohr, Haupt- und Nebenantrieb, Ausgangseinheit und einem Schaltschrank. Als Antrieb für das Drehrohr dient ein stufenlos regelbarer Getriebemotor. Die Kraftübertragung erfolgt über einen Zahnriemen. In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Bauteile und deren Funktion näher erläutert.

4.1 Dosiereinheit

Die Dosiereinheit (s. Abb. 4.3) besteht aus dem Dosiergefäß, Sekundärtrieb (Nebenantrieb), Schneckenwelle und Trog. Die Förderschnecke dient zur definierten Dosierung der Partikel, welche in die einströmende Luft vermischt werden. Die Schneckenwelle ist auf Flanschlager gelagert und wird über einen Zahnriemen angetrieben. Als Sekundärtrieb (Nebenantrieb) wird ein Schrittmotor verwendet. Die Schnecke fördert die Partikel entlang des Trogs in einen Trichter, dessen Ende über ein Rohr mit dem Drehrohr verbunden ist.

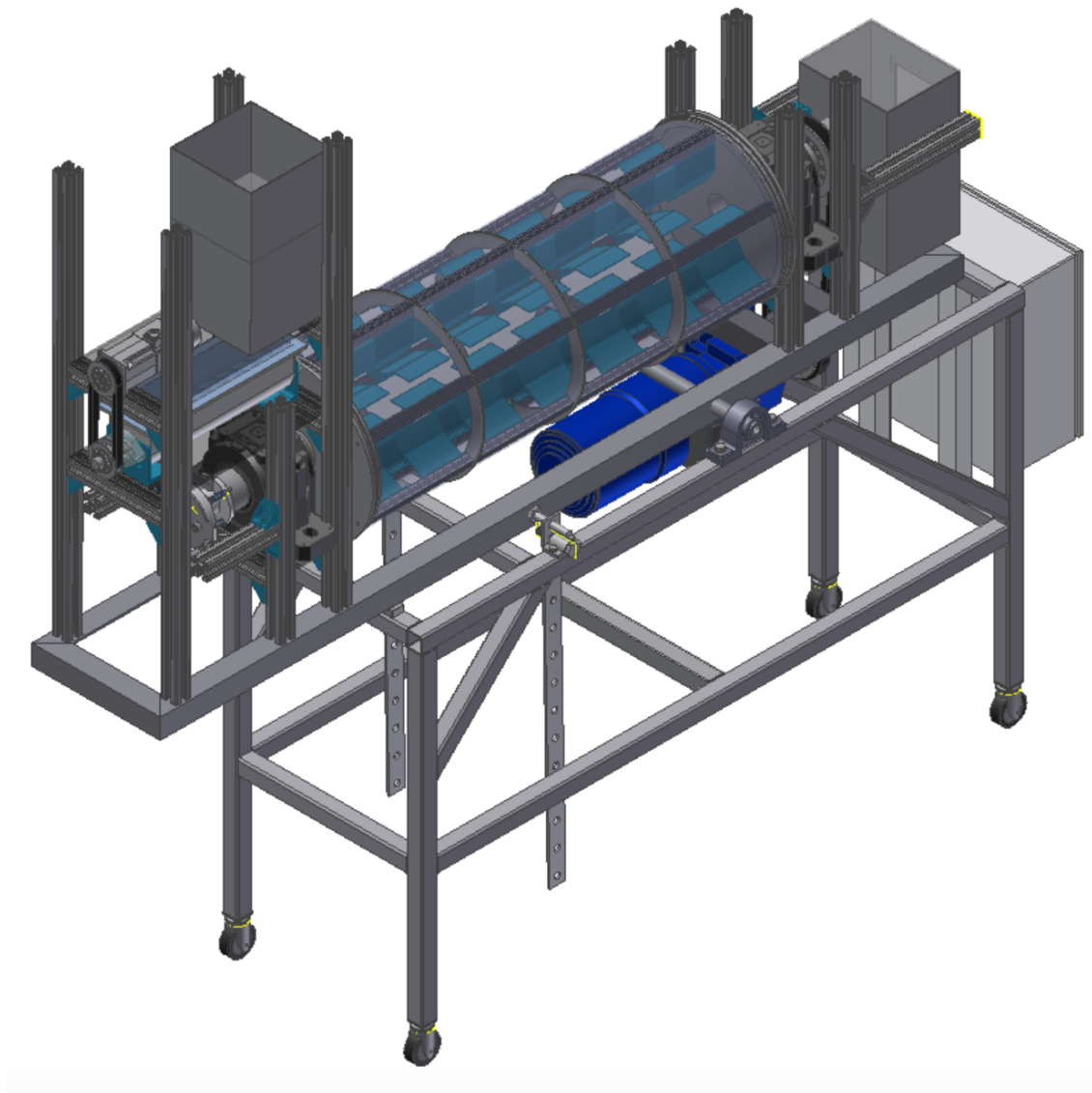


Abbildung 4.1: Drehrohrreaktor

4.2 Drehrohr

Das Drehrohr besteht aus dem Käfig, Hubschaufeln, Flanschen und dem Acrylglasgehäuse (s. Abb. 4.4). Die Profilstreben sind mit Winkeln an den Kreisringen verschraubt. Der Eingangs- und Ausgangsflansch sind über den Käfig miteinander verbunden. Der Käfig dient zur Steigerung der Steifigkeit und soll somit die mechanische Hauptlast tragen. Das Acrylglas darf aus Festigkeitsgründen nicht zu stark belastet werden. Das Drehrohr ist über die Hohlwellen der Eingangs- und Ausgangsflansche auf Stehlager gelagert. Die Geometrie und die Position der Hubschaufeln sind durch die Befestigung an den Profilstreben variabel gestaltbar. Sie dienen zur Steuerung der Verweilzeit der Partikel in der Luft.

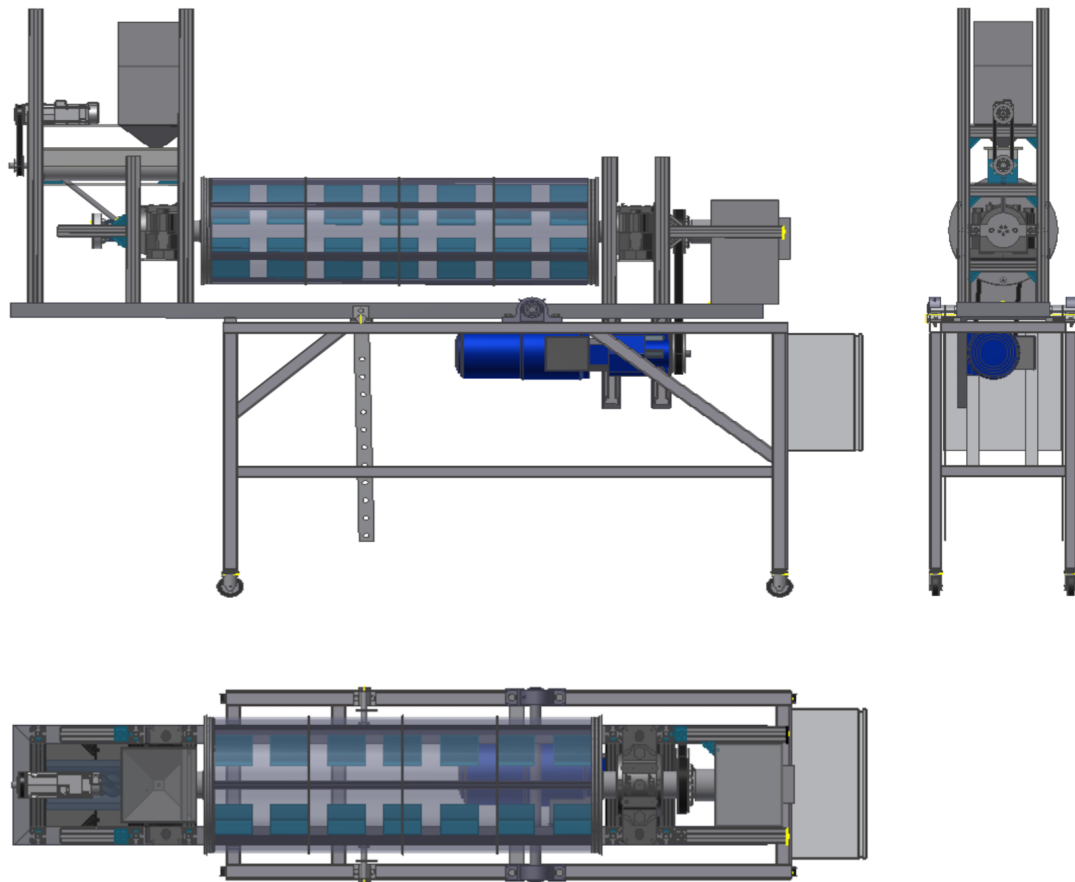


Abbildung 4.2: Drehrohrreaktor von verschiedenen Blickwinkeln

4.2.1 Hubschaufel

Die Hubschaufel wird aus Stahlblech gefertigt. Die Geometrie der Hubschaufeln besteht aus drei zueinander gebogenen Flächen (s. Abb. 4.6). Die erste und zweite Fläche sind mit einem stumpfen Winkel zueinander gebogen. Die zweite und dritte Fläche sind rechtwinklig zueinander gebogen. An der dritten Fläche sind Bohrungen für die Montage der Hubschaufeln an den Profilstreben des Käfigs vorgesehen. Die Position und Anzahl der Hubschaufeln sind dadurch variabel.

4.3 Ausgangseinheit

Die Ausgangseinheit besteht aus einem Sammelbehälter, der mittels eines Luftfilters das Entweichen der Kleinstpartikel mit der ausströmenden Luft verhindert (s. Abb. 4.7). Das Ende des Drehrohrs ist mit der Ausgangseinheit verbunden. Die Dichtung zwischen Drehrohr und Ausgangseinheit hat einerseits die Aufgabe, Strömungsverluste zu minimieren, und andererseits den Austritt des feinen Staubs aus dem Reaktor zu verhindern.

4.4 Lagerung

Die Lagerung des Drehrohrs wird als Fest-Los-Lagerung angeordnet. Es wird ein Stehlager von der Firma SKF mit der Modellbezeichnung SNL 517 verwendet. Das Stehlagergehäuse besteht

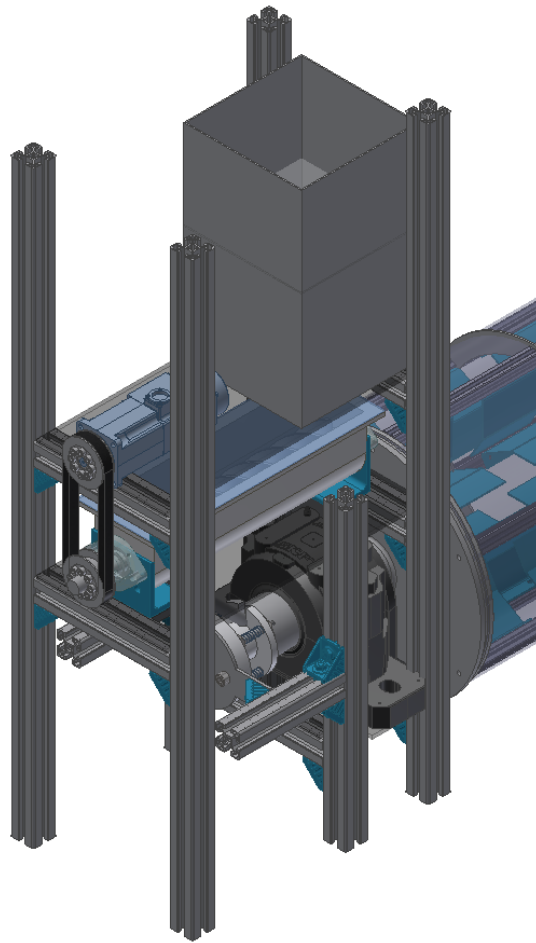


Abbildung 4.3: Dosiereinheit

aus einem Gehäuseunter- und oberteil. Der wesentliche Vorteil von geteilten Stehlagergehäusen ist die Möglichkeit, eine komplett vormontierte Welle einfach einzubauen. Die Welle wird mit einer Spannhülse im Lager befestigt. Diese Kombination ermöglicht ein einfaches Ein- und Ausbauen des Rotors.

4.5 Dichtung

Als rotatorische Abdichtung wird eine Stopfbuchsendichtung gewählt, die eine berührende Schutzdichtung ist. Sie wird mit einem federgelagerten Flansch (Stator) auf die Hohlwelle (Rotor) gedrückt. Somit ist eine konstante Anpresskraft gewährleistet. Durch die geringen Drehzahlen am Rotor sind der Verschleiß und die Wärmeentwicklung minimal. Die Stopfbuchsendichtung kommt in der Eingangs- sowie Ausgangseinheit zur Anwendung.

4.6 Obergestell

Das Untergestell wurde aus der bestehenden Vorgängerdiploarbeit übernommen. Das Obergestell ist aus Aluminiumstrebenprofilen der Firma Bosch-Rexroth konstruiert. Das Baukastensystem der Strebenprofile ermöglicht eine einfache und flexible Konstruktion und bietet eine unbegrenzte Ge-

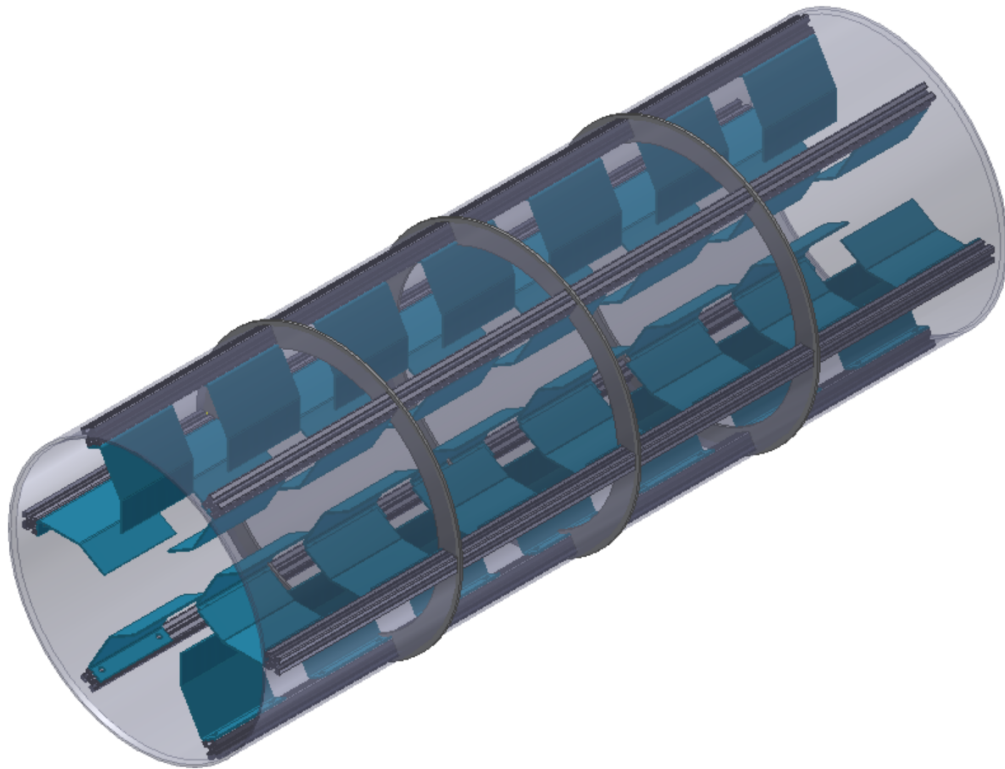


Abbildung 4.4: Rotor mit Schaufeln

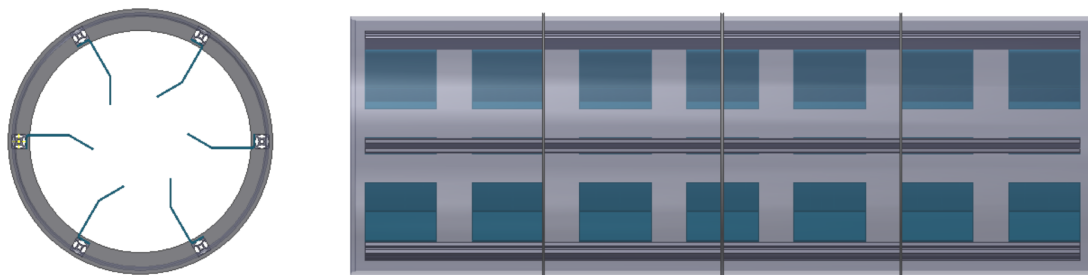


Abbildung 4.5: Rotor von verschiedenen Blickwinkeln

staltungsfreiheit im Vergleich zu einer Schweißkonstruktion. Auch ohne fachmännische Kenntnisse ist der Zusammenbau solch eines Gestells einfach zu realisieren. Die Konstruktion ist zu jeder Zeit veränderbar und erweiterbar. Der Nachteil bei solchen Systemen sind die Anzahl der Freiheitsgrade sowie die geringe Steifigkeit im Vergleich zu einer Schweißkonstruktion.

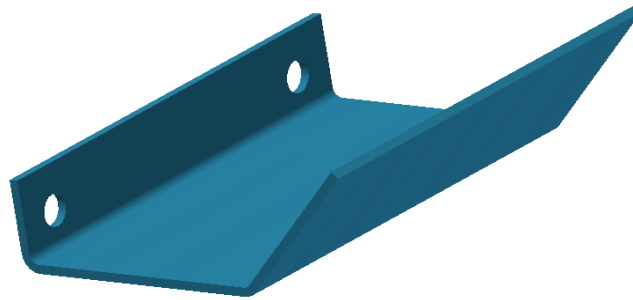


Abbildung 4.6: Hubschaufel

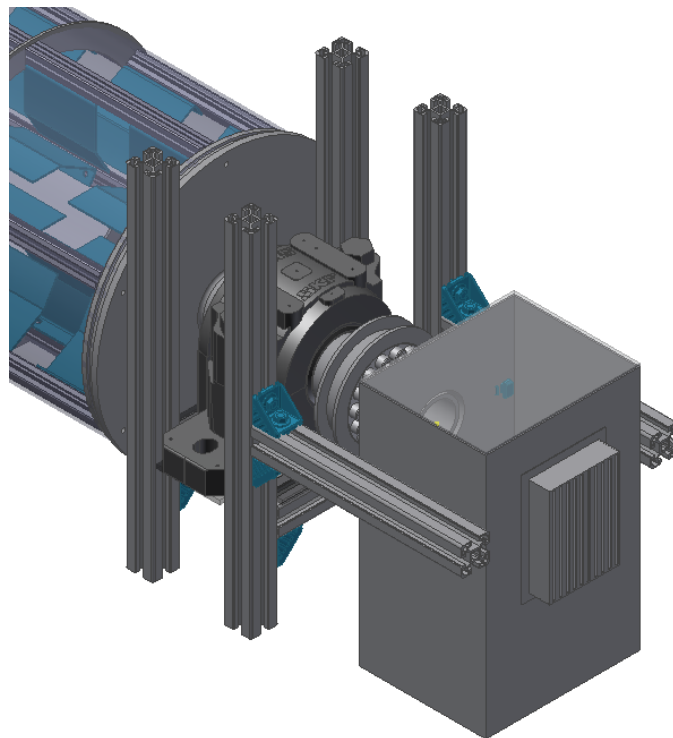


Abbildung 4.7: Ausgangseinheit

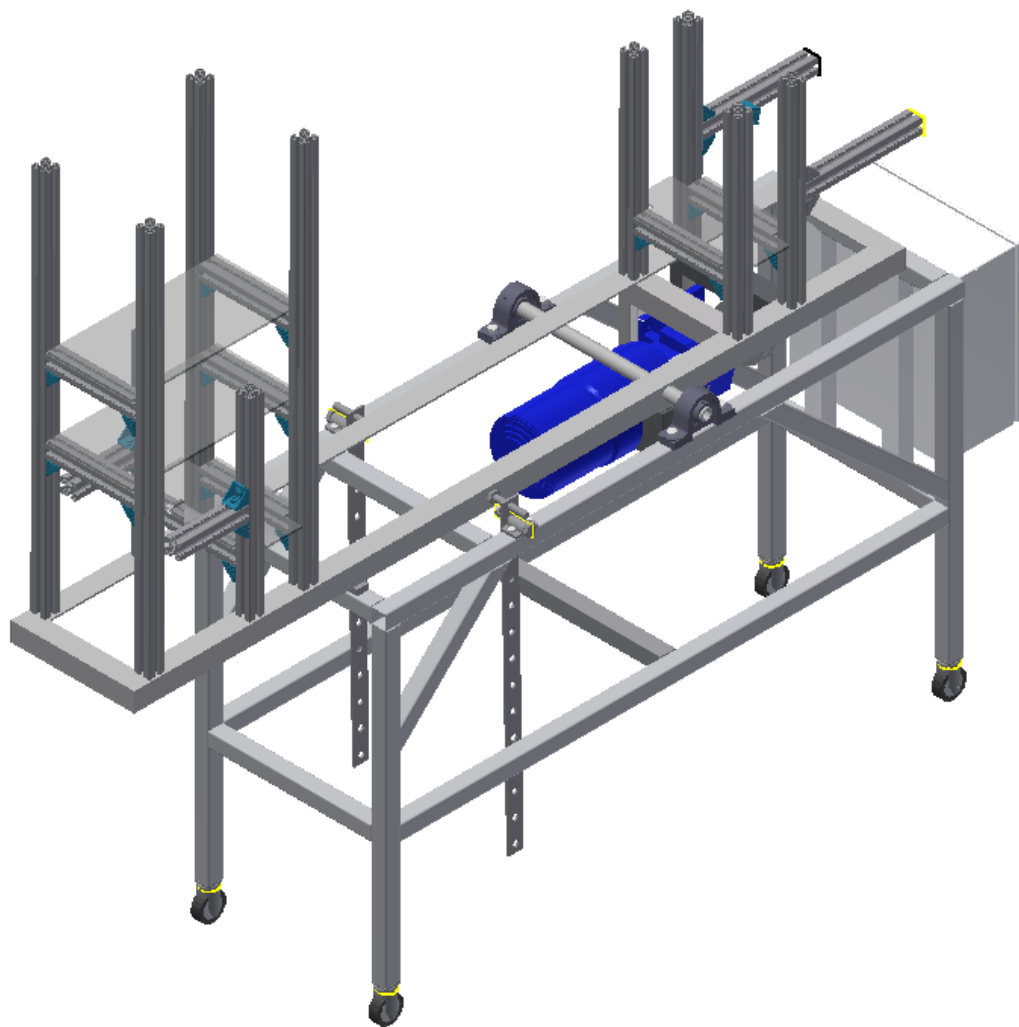


Abbildung 4.8: Obergestell

Kapitel 5

Diskussion und Erkenntnisse

Antriebsleistung

Die Ergebnisse der Berechnungen für die erforderliche Antriebsleistung zeigen sehr geringe Werte. Viele Vereinfachungen und Idealisierungen könnten das Resultat von der tatsächlich erforderlichen Antriebsleistung stark abweichen lassen. Da der Antriebsstrang mit einem Frequenzumrichter und einem Asynchronmotor von der Diplomarbeit von Adrian Rauch vorhanden ist, ist die genaue Berechnung der erforderlichen Antriebsleistung nicht ausschlaggebend.

Verweilzeit

Die Recherchen zeigen, dass die Verweilzeit in einem Drehrohrreaktor steuerbar ist. Alle Modelle geben annähernd gute Ergebnisse für die Berechnung der Verweilzeit bis auf jenes von Matchett und Baker. Der Einfluss des Neigungswinkels ξ kann bei diesem Modell nicht berücksichtigt werden. Viele Eingangsparameter beeinflussen die Verweilzeit. Die größten Auswirkungen haben der Neigungswinkel ξ , die Drehzahl n der Rotationstrommel (Drehrohr) sowie der Massenstrom der Partikel m_p . Um aber eine exakte Aussage machen zu können muss eine bestimmte Anzahl von Versuchen mit der Variierung der Einflussgrößen durchgeführt werden. Die exakteste Methode zur Vorhersagbarkeit der Verweilzeit ist das vorwärtsgerichtete neuronale Netzwerk (FNN). Der Rechenaufwand ist aber im Vergleich zu den herkömmlichen empirischen Formel viel größer. Je nach Anforderung an die Genauigkeit der Vorhersagbarkeit ist es möglich zwischen diesen beiden Ansätzen zu wählen.

Konstruktion

Viele Erkenntnisse aus der Diplomarbeit von Adrian Rauch flossen in die Konstruktion des Drehrohrreaktors ein. Sie wurde nach mehrmaliger Absprache mit dem Personal von der Werkstatt entwickelt und verbessert.

Umsetzung und Inbetriebnahme

Die letzte Phase der Diplomarbeitungssetzung und die Inbetriebnahme des thermochemischen Speichers mussten, nachdem sich der Fokus der Forschung auf andere Reaktortypen verschoben hatte, gestrichen werden.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Entwicklung des Primärenergieverbrauchs weltweit [3]	7
1.2	Primärenergieverbrauch weltweit [1]	8
1.3	Primärenergieversorgung weltweit [1]	9
1.4	Energieträger EU 27	10
1.5	Bruttoinlandsverbrauch Österreich	10
1.6	Energieträger Österreich	11
1.7	Sektoraler Endverbrauch	11
2.1	Übersicht über die verschiedenen Technologien zur Speicherung thermischer Energie [8]	13
2.2	Übersicht über die verschiedenen Materialien zur sensiblen Speicherung [8]	14
2.3	Übersicht über die verschiedenen Materialien zur latenten Speicherung [8]	15
2.4	Volumetrische Energiedichte [8]	17
2.5	Übersicht über die verschiedenen Materialien zur thermochemischen Speicherung [8]	17
2.6	Schematische Darstellung eines Drehrohrofens [9]	18
2.7	Schematische Darstellung eines Rotationstrommeltrockners [10]	18
2.8	Stoffbewegung in einem Drehrohrföfen [11]	19
2.9	Querschnitt in einem Drehrohrföfen [11]	20
2.10	Bewegungsformen von Materialien in rotierenden Zylindern [11]	20
2.11	Längsschnitt eines direkt beheizten Drehrohrrofens [11]	21
2.12	Schematische Darstellung des Trommeltrockners [12]	21
2.13	Gutsbewegung im Trockner mit Hubschaufeln [12]	22
2.14	Bestimmung des Schüttungswinkels [12]	23
2.15	Schüttungsgeometrie Bereich I [12]	24
2.16	Schüttungsgeometrie Bereich II [12]	25
2.17	Schüttungsgeometrie Bereich III [12]	26
3.1	Idealer Partikelbewegung	28
3.2	Realer Partikelbewegung [13]	28
3.3	Verweilzeit in einem realen Reaktor [13]	28
3.4	Antwort auf Sprungfunktion [13]	29
3.5	Verweilzeiten nach Friedmann und Marshall für verschiedene Neigungswinkel	30
3.6	Verweilzeiten nach Friedmann und Marshall modifiziert von Arruda für verschiedene Neigungswinkel	31
3.7	Verweilzeiten nach Jules Thibault, Pedro I. Alvarez, Roman Blasco und Rolando Vega für verschiedene Neigungswinkel	32
3.8	Verweilzeit nach Matchett und Baker für verschiedene Neigungswinkel	33
3.9	Verweilzeit nach AIChE für verschiedene Neigungswinkel	34
3.10	Verweilzeit nach Alvarez und Shene für verschiedene Neigungswinkel	35
3.11	Schematische Darstellung eines Rotationstrommeltrockners [16]	36
3.12	Darstellung des Querschnitts mit verschiedenen Hubschaufeln [16]	36

3.13	Paritätsdiagramm des Verweilzeitmodells von Thibault, Alvarez, Blasco und Vega [16]	37
3.14	Paritätsdiagramm des Verweilzeitmodells von Friedmann und Marshall modifiziert von Perry und Green [16]	38
3.15	Feedforward-Neural-Network-Struktur [16]	38
3.16	Durchschnittliche Vorhersagefehler über Anzahl der Neuronen [16]	39
3.17	Paritätsdiagramm eines Verweilzeitmodells erstellt mithilfe der FNN-Methode mit fünf versteckten Neuronen [16]	40
3.18	Mischung der Partikel mit Strömung	41
3.19	Partikelweg aller Partikelgrößen im Drehrohrreaktor	43
3.20	Partikelweg einzelner Partikel	44
3.21	Modellgeometrie	45
3.22	2D-Partikelweg nach $t = \frac{1}{10}s$	46
3.23	2D-Partikelweg nach $t = 1s$	47
3.24	2D-Partikelweg $t = 2s$	47
3.25	2D-Partikelweg $t = 3s$	48
3.26	2D-Partikelweg $t = 4s$	48
3.27	Drehrohrföfen mit Ladung und Antriebsstrang [22]	50
3.28	Antriebsmoment Betrachtungsfall Stick-Condition	51
3.29	Antriebsmoment Betrachtungsfall Slip-Condition	51
3.30	Antriebsmoment nach C.M. van't Land	52
3.31	Antriebsmoment nach AIChE	52
4.1	Drehrohrreaktor	54
4.2	Drehrohrreaktor von verschiedenen Blickwinkeln	55
4.3	Dosiereinheit	56
4.4	Rotor mit Schaufeln	57
4.5	Rotor von verschiedenen Blickwinkeln	57
4.6	Hubschaufel	58
4.7	Ausgangseinheit	58
4.8	Obergestell	59

Tabellenverzeichnis

3.1	Betriebsparameter für den Drehrohrreaktor	27
3.2	Physikalische Eigenschaften Sand	45
3.3	Partikelgrößenverteilung Sand	45

Symbols

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	–	Dichtestromkoeffizient
A	m ²	Querschnittfläche der Schüttung
c_0	–	Anfangstracekonzentration
$c(t)$	–	Tracerkonzentration in Zeitabhängigkeit
CFL	–	Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl
c_p	J/kg K	spez. isobare Wärmekapazität
C_W	–	Widerstandsbeiwert
D_a	m	Durchmesser Außen Rotationstrommeltrockner
D_i	m	Durchmesser Innen Rotationstrommeltrocknert
d_p	m	Durchmesser Partikel
$E(t)$	–	Wahrscheinlichkeitsfunktion
F_B	N	Basset-Kraft
F_{bf}	N	Ausbrechkraft
F_G	N	Gewichtskraft
F_N	N	Normalkraft
F_P	N	Auftriebskraft
F_T	N	Tangentialer Anteil der Gewichtskraft
F_V	N	Virtuelle Massekraft
F_W	N	Widerstandskraft
F_w	N	Widerstandskraft der Schüttung
F_Z	N	Zentrifugalkraft
$F(t)$	–	Sprungfunktion
Fr	–	Froude-Zahl
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
h	m	Fallhöhe
J_0	kgm ²	Massenträgheitsmoment Rotor
J_m	kgm ²	Massenträgheitsmoment Motor
J_v	kgm ²	Massenträgheitsmoment Inhalt
K_{Fall}	–	Fallkoeffizient
K_{fl}	–	Koeffizient Matchett & Baker Model
K_K	–	Koeffizient Matchett & Baker Model
L	m	Rotationstrommellänge
l_1	m	Schaufellänge
M	g/mol	Molekulargewicht
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
\dot{m}_{fl}	kg/s	Massenstrom Fluid

(wird fortgesetzt)

Zeichen	Einheit	Bedeutung
\dot{m}_p	kg/s	Massenstrom Partikel
m_p	kg	Masse Partikel
n	U/min	Rotordrehzahl
n_p	–	Anzahl Partikel
$n_{Schritteanzahl}$		Anzahl der Rechenschritte
P	W	Leistung
P_{slip}	W	Leistung bei Slip-Condition
P_{stick}	W	Leistung bei Stick-Condition
p	Pa	Druck
R	m	Radius Rotationstrommel
Re	–	Reynolds-Zahl
Re_p	-	Partikel-Reynolds-Zahl
s	-	Steigung
T	K	Kelvin-Temperatur
T	Nm	Antriebsmoment
t	s	Zeit
t_f	s	Durchschnittliche Fallzeit Partikel
t_{fall}	s	Fallzeit Partikel
\vec{u}_f	m/s	Geschwindigkeitsvektor Fluidstrom
U_{Gsuper}	m/s	Geschwindigkeit Fluidstrom
\vec{u}_p	m/s	Geschwindigkeitsvektor Partikel
U_{p1}	m/s	Partikelgeschwindigkeit in der Gasphase
U_{p2}	m/s	Partikelgeschwindigkeit in der Feststoffphase
\dot{V}	m ³ /s	Volumenstrom
\dot{V}_0	m ³ /s	Volumenstrom Eingang
\dot{V}_A	m ³ /s	Volumenstrom Ausgang
V_R	m ³	Reaktionsvolumen
W	kg	Gesamtgewicht der Partikel im Rotationstrom- meltrockner
w	kg	Gesamtgewicht der Partikel in den Schaufeln
\vec{x}_p	m	Ortsvektor Partikel xyz

Symbol	Maßeinheit	Physikalische Größe
γ	–	Schüttungswinkel
Δ_t	s	Zeitschritt
Δ_x	m	Zellengröße
δ	–	Winkel
η	Pa s	dynamische Viskosität
λ	W/m K	Wärmeleitfähigkeit
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Celsius-Temperatur
μ	–	Reibungskoeffizient
μ_{brg}	–	Reibungskoeffizient Wälzlager
μ_s	–	Reibungskoeffizient Schüttung
ξ	–	Neigungswinkel Rotor
ϱ	kg/m^3	Dichte
ϱ_{fl}	kg/m^3	Dichte des Fluids
ϱ_p	kg/m^3	Dichte der Partikel
τ	min	durchschnittliche Verweilzeit Partikel
τ_G	min	Verweilzeit Partikel während Gasstoffphase
τ_S	min	Verweilzeit Partikel während Feststoffphase
φ	–	Hubschaufelposition
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit

Index hochgestellt	Bedeutung
–	Mittelwert
T	transponiert
\rightarrow	Vektor

Literaturverzeichnis

- [1] Bundeszentrale für politische Bildung. Primärenergieversorgung. <http://www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/globalisierung/52740/energie>, 11 2016.
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Energiestatistiken. <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiestatistiken-internationaler-energiemarkt,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, 12 2016.
- [3] Das Statistik-Portal. Weltweiter primärenergieversorgungrenergieverbrauch in den jahren von 1980 bis 2015. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/42226/umfrage/welt-insgesamt---verbrauch-an-primaeenergie-in-millionen-tonnen-oelaequivalent/>, 12 2016.
- [4] Energy Economics Group (EEG) Peter Biermayr, Technische Universität Wien. Erneuerbare energie in zahlen. http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_231905.pdf, 09 2015.
- [5] Statistik Austria. Energiebilanzen. http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html, 09 2015.
- [6] Wolfgang Streicher Martin Kaltschmitt. *Regenerative Energien in Österreich*. Vieweg+Teubner, 2009.
- [7] Johannes Widhalm. *Die thermochemische Energiespeicherung bezogen auf realitätsnahe Anwendungsfälle*. PhD thesis, Technische Universität Wien, 2016.
- [8] Tingo Stadler Micheal Sterner. *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Number ISBN 978-3-642-37379-4. Springer Vieweg, 2014.
- [9] R.-D. Li Y. Chi K.-F. Cen S.-Q. Li, J.-H. Yan. Axial transport and residence time of msw in rotary kilns. *Elsevier, Powder Technology*, 126:217–227, 2002.
- [10] Don W. Green Robert H. Perry. *Perry's Chemical Engineers's Handbook*. The McGraw-Hill Companies, 2008.
- [11] E. Specht; Magdeburg; F. H. Becker; Wendelstein. *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbauer*. Springer Vieweg, 2013.
- [12] Ioannis Evripidis. *Kombinierte Kontakt- und Konvektionstrocknung in einem Trommeltrockner*. VDI Verlag, 1991.
- [13] David Fast Verena Kaltenhauser. Skriptum reaktionstechnik. http://ictm.tugraz.at/files/attachments/6848/312647_Skriptum_Reaktionstechnik_SS2013.pdf, 06 2016.
- [14] W. R. Marshall S. J. Friedmann. Studies in rotary drying. *Chem.Eng. Prog.*, 45(8):482–573, 1949.

- [15] M. A. S. Barrozo N. J. Fernandes, C. H. Ataíde. Modeling and experimental study of hydrodynamic and drying characteristics of an industrial rotary dryer. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 26(2):331 – 341, 06 2009.
- [16] Roman Blasco Rolando Vega Jules Thibault, Pedro I. Alvarez. Modeling the mean residence time in a rotary dryer for various types of solids. *Drying Technology*, 28(10):1136–1141, 2010.
- [17] AIChE. *Continuous Direct-Heat Rotary Dryers - A Guide to Performance Evaluation*. John Wiley & Sons, 2006.
- [18] C. Shene P.I. Alvarez. Experimental study of residence time in a direct rotary dryer. *Drying Technology*, 12(7):1629–1651, 1994.
- [19] Agnes Koschmider. *Ähnlichkeitsbasierte Modellierungsunterstützung für Geschäftsprozesse*. KIT Scientific Publishing, 2007.
- [20] Martin Sommerfeld. *Bewegung fester Partikel in Gasen und Flüssigkeiten*, VDI-Wärmeatlas. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, 2013.
- [21] Reinhard Willinger. *Numerische Methoden für thermische Energiesysteme*. 2011.
- [22] L. Pretorius D.J. van Dyk. *Analysis of dynamic effects in a rotary kiln system used for iron production*, volume II. John Wiley & Sons, 1994.
- [23] C.M. van't Land. *Drying in the Process Industry*. John Wiley & Sons, 2012.
- [24] Adrian Rauch. Thermochemische energiespeicherung: Planung und aufbau eines schneckenreaktors für kaltversuche. Master's thesis, Technische Universität Wien, 2014.