



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Konzeptentwicklung für die Nutzung der thermischen Energie, die bei der Kompostierung frei wird

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Ponweiser

(E302 Institut für Energietechnik und Thermodynamik)

Univ.Prof. Dipl.-Ing.Proj. Dr.techn. Tobias Pröll

(E166 Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Michael Peitl, BSc

0828331 (482)

Unterstinkenbrunn 40, 2154 Unterstinkenbrunn

Unterstinkenbrunn, im März 2015

Unterschrift



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiteres erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Unterstinkenbrunn, im März 2015

Unterschrift

Danksagung

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich während der Erstellung meiner Masterarbeit unterstützt haben:

Dabei gilt mein besonderer Dank für die Betreuung Dr. Karl Ponweiser und Dr. Tobias Pröll, die immer, unterstützend durch ihr fachliches Wissen, wertvolle Hinweise zur Erstellung der Arbeit gaben.

Dr. Klemens Schulmeister für die praktischen Hinweise auf die Konstruktion, DI Erwin Binner für die Hinweise zum Kompostierprozess und DI Klaus Engelhart für die Unterstützung bei der Zusammenstellung des Projektteams.

Nicht zuletzt gebührt meinen Eltern Dank, weil Sie mir das Studium ermöglicht haben.

Kurzfassung

In Zeiten ständig steigenden Energieverbrauches müssen umweltschonende „Energieerzeugungskonzepte“ erarbeitet werden. Beim Kompostieren von aerobem Material setzen Mikroorganismen Wärme frei, welche bis jetzt auf den Kompostieranlagen nicht genutzt wird.

Es wurde ein Konzept entwickelt, welches dem Prozess die Wärme entzieht und damit Wasser erwärmt. Dieses Konzept wurde thermodynamisch ausgelegt. Ein Versuchsreaktor wurde geplant, welcher für Feldversuche erste Erkenntnisse bezüglich Durchmischung, Verstopfung, Brückenbildung, Luftdurchlässigkeit und Kraftaufwand geben soll.

Dabei wurden zuerst der Kompostierprozess sowie die optimalen Prozessbedingungen, welche im Reaktor vorherrschen sollten, betrachtet. Feuchte Luft dient dabei einerseits die Wärmemenge zu entziehen, andererseits auch gleich dazu, um dem Kompostierprozess mit frischer Luft zu versorgen.

In der Auslegung des Reaktors wurde ersichtlich, dass Kondensat wieder zurück in den Reaktor geleitet werden muss, da sonst der Feuchtegehalt des Materials zu stark abnehmen würde. Auch ein Abscheider und Mischer musste eingebaut werden, welcher die zirkulierende Luft austauscht, da der Sauerstoffgehalt abnimmt und Kohlendioxid entsteht. Die Wärmetauscher wurden grob ausgelegt. Dabei ist auffallend, dass die Flächen aufgrund der geringen Temperaturunterschiede sowie dem geringen Wärmedurchgangskoeffizienten sehr groß sein müssen. Der Reaktor benötigt keinen Ventilator, da mithilfe eines Kamins genügend Druckunterschied vorhanden ist, um durch natürliche Konvektion einen Naturluftzug zu erhalten.

Für den Versuchsreaktor liegen alle Zeichnungen sowie Stücklisten bei, um den Reaktor zu bauen und verschiedenste Untersuchungen durchzuführen. Der Versuchsreaktor wurde so konzipiert, dass er mit geringen Mitteln herstellbar ist.

Errechnet wurde bei diesem Konzept, dass sich pro kg Trockenmasse Rottegut rund $4,8 \cdot 10^6$ J in Form von erwärmtem Wasser in 4 Wochen entziehen lassen.

Abstract

In times of rising energy consumption, there must be developed environmentally friendly „energy generation“ concepts. During the process of composting aerobic material heat is released, which was not used in compost work so far.

A concept which extracts the heat from the process has been developed and causes that water gets heated. This concept was designed thermodynamically. An experimental reactor was planned, which should give first field trials insights into the bioturbation, constipation, bridge construction and air permeability.

First, the composting process and the ideal process conditions that should prevail in the reactor were considered. On the one hand moist air is used to escape the heat and on the other hand to supply the compost with fresh air. Several potential problems such as bioturbation, air permeability, corrosion, clogging and bridge were incorporated in the concept.

Considering the design of the reactor it has become apparent that the condensate must be fed back into the reactor again, otherwise the moisture content of the compost would decline sharply. A separator had to be built in, which exchanges the air as the oxygen content decreases and carbon dioxide arises. The heat exchangers were designed roughly. It is essential that the surfaces must be very large due to the small differences in temperature and the low heat transfer coefficient. The reactor does not require a ventilator since through the stack-effect sufficient pressure differential exists to obtain a natural draft.

For the experimental reactor all drawings and parts lists are included in order to build the reactor and perform a variety of tests. The experimental reactor was designed in a way that it can be fabricated by little resources.

Results from this concept are that per kg dry matter rotted material around $4.8 \cdot 10^6$ J in the form of heated water can escape in 4 weeks.

Nomenklatur

Lateinische Formelbuchstaben

Bezeichnung	Einheit	Beschreibung
A	m^2	Fläche
c_p	J/kgK	spezifische isobare Wärmekapazität
d	m	Durchmesser
d_p	m	Sauter-Durchmesser
Eu	-	Euler-Zahl
h_i	J	spezifische Enthalpie
k	W/m ² K	Wärmedurchgangskoeffizient
L	m	Länge
M	kg/mol	Molare Masse
m	kg	Masse
p	Pa	Druck
Q	J	Wärmemenge
\dot{Q}	W	Wärmestrom
R_L	J/kgK	spezifische Gaskonstante
Re	J/kgK	Reynolds-Zahl
T	K	Temperatur
u	m/s	Geschwindigkeit
t	s	Zeit
X	-	Wasserbeladung feuchter Luft
x_i	-	Wassergehalt eines Stoffes i

Griechische Formelbuchstaben

Bezeichnung	Einheit	Beschreibung
Δh_{Dtr}	J/kg	spezifische Verdampfungsenthalpie am Tripelpunkt
ΔT_m	K	thermodynamische Mitteltemperatur der Wärmeaufnahme
η	Pa s	kinematische Viskosität
ρ	kg/m ³	Dichte
ξ_i	-	Massenanteil der Komponente i
φ	-	relative Feuchte
Φ	-	Druckverlustformfaktor
Ψ	-	Porosität
v	m/s	Leerrohrgeschwindigkeit

Indices

Index	Beschreibung
1,2,..	Zustände
12, 23,..	Von Zustand 1 zu Stand 2
A,E	Ausgang bzw. Eingang
A	Abscheider
C	Kohlenstoff
D	Wasserdampf
Gl	Glucose
K	Kondensat
KP	Kugelige Partikeln
L	trockene Luft
Lv	Längenverhältnis
M	Mittel
MK	Mittlere Komposttemperatur
NKP	Nicht kugelige Partikeln
Quarz	Quarzsand
R	Reaktor, Rottegut
S	Sättigung
T	Tauscher
Tr	Tripelpunkt
U	Umgebungsluft
u	Leerrohrgeschwindigkeit
W	Wasser
WT	Wärmetauscher

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	iii
Abstract	iv
Nomenklatur	v
Inhaltsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen- / Theorieteil	2
2.1 Die Kompostierung	2
2.2 Reaktoranforderungen.....	11
2.3 Thermodynamische Grundlagen	12
3 Konzeptentwicklung	23
3.1 Analysieren des Materiales	23
3.2 Verschiedene Lösungsansätze.....	24
3.3 Bewertung der Konzepte	29
4 Ausarbeitung Streuerkonzept.....	31
4.1 Thermodynamische Auslegung	31
4.2 Versuchsreaktor: Zeichnungen und Stückliste.....	44
5 Zusammenfassung.....	60
6 Anhang.....	62
Literaturverzeichnis	114
Abbildungsverzeichnis	117
Tabellenverzeichnis	118

1 Einleitung

Gemäß dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik kann Energie weder erzeugt noch vernichtet werden, sondern nur die Erscheinungsform ändern. Daher sollten vorhandene Energieformen, welche für den Menschen leicht zur Verfügung stehen, bestmöglich genutzt werden.

Allein in Österreich fallen jährlich in etwa 1,5 Millionen Tonnen getrennt gesammelter organischer Abfall für die Kompostierung an (2011). Das Potential liegt in etwa bei dem Doppelten.¹ Diese organischen Abfälle weisen teilweise hohe Feuchtigkeitsgehalte auf, weshalb sie für eine Verbrennung ungeeignet sind. Der Kompostierprozess setzt Wärme frei, die jedoch bisher meist nicht genutzt werden kann und damit an die Umgebung unnütz „verloren“ geht.

Für einen optimalen Kompostierprozess sind wichtige Einflussgrößen wie zum Beispiel der Wassergehalt, das Kohlenstoff/Stickstoffverhältnis oder auch die Sauerstoffversorgung von großer Bedeutung. Durch regelmäßiges Durchmischen des Materials (man spricht von „Umsetzen“) wird der Prozess ebenfalls positiv beeinflusst. Probleme können bei geschlossenen Anlagen unter anderem aufgrund starker Korrosion (phasenweise niedrigerer pH-Wert, wasserdampfgesättigte Atmosphäre) auftreten.

Primäres Ziel dieser Arbeit ist es, ein Konzept für die Nutzung der thermischen Energie, die bei der Kompostierung frei wird, zu entwickeln. Negative Auswirkungen auf den Kompostierprozess müssen dabei vermieden werden. Wesentlich ist auch ein ausreichender Kaminzugeffekt, der einerseits für den Gasaustausch (Zufuhr von Sauerstoff, Abfuhr von Stoffwechselprodukten) und andererseits für die Wärmeabfuhr von Bedeutung ist. Durch Ausnutzung dieses Naturluftzuges kann der Energieverbrauch eines sonst erforderlichen Ventilators reduziert werden. Die genaue Auslegung der benötigten Komponenten wie zum Beispiel der Wärmetauscher ist nicht Teil dieser Arbeit.

Aus dem in dieser Arbeit erarbeiteten Konzept soll ein Versuchsreaktor konstruiert werden, welcher erste Tests rund um die Durchmischung, Luftdurchlässigkeit, Verstopfung und Brückenbildung zulässt. Dieser soll mittels des 3D CAD Programm CATIA gezeichnet und daraus Werkstattzeichnungen sowie Stücklisten erstellt werden. Der Versuchsreaktor soll leicht und günstig herzustellen sein.

¹ Vgl. Binner (2012), S. 1

2 Grundlagen- / Theorieteil

Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen der Kompostierung, erforderliche Reaktorbedingungen zur Vermeidung von vorhersehbaren Problemen und thermodynamische Grundlagen im Gebiet der feuchten Luft, Wärmetauscher und Druckverlust von durchströmten Schüttungen.

2.1 Die Kompostierung

Definitionen der Kompostierung:

„Kompostierung ist der biologische Abbau von organischem Material unter kontrollierten aeroben Bedingungen“.²

„Kompostieren ist die biologische Umwandlung von organischen Abfällen unter kontrollierten Bedingungen hin zu einem hygienischen, humusreichen und relativ biostabilen Produkt, das die Bodenfruchtbarkeit positiv beeinflusst. Bestimmt werden der Kompostierungsprozess und dessen Produkt durch mehrere Parameter, die nicht einzeln sondern erst im gemeinsamen Prozess erreicht werden“.³

„Kompostierung ist der Abbau von heterogener organischer Substanz durch gemischte mikrobiologische Populationen unter feuchten, warmen und aeroben Bedingungen“.⁴

...

Zusammenfassend versteht man unter Kompostierung einen biologischen Prozess, der unter feuchten, aeroben Bedingungen unter Freisetzung von Wärme abläuft. Dabei sind während des Rotteverlaufes unterschiedliche Mikroorganismengruppen tätig. Erst dies ermöglicht die Umwandlung der heterogenen organischen Abfälle in ein stabiles, nährstoffreiches und hygienisch einwandfreies Endprodukt (Kompost).⁵

Die Materialaufbereitung⁶

Das aufbereitete Ausgangsmaterial für die Kompostierung besteht meist aus einem Gemisch von Grün- und Rasenschnitt, Garten- und Parkabfällen, Laub, Küchen- und Speiseabfällen. Für den Rotteprozess müssen günstige Nährstoffverhältnisse

² Epstein E., 1997, (keine Seite), (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 297)

³ Mathur S.P., 1991, (keine Seite), (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 297)

⁴ Gray K.R., Biddlestone A.J., 1971, (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 297)

⁵ Vgl. Wagner A., Illmer P., 2004, S. 298

⁶ Vgl. Binner (2012), S. 9f

vorliegen, wobei vor allem das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff für die Kompostierung wichtig ist. Eine ausreichende Sauerstoffversorgung muss über den gesamten Rotteprozess gewährleistet werden. Dies kann durch eine adäquate Menge an Strukturmaterial, um ein ausreichendes Luftporenvolumen bereitzustellen, unterstützt werden. Dritte wesentliche Komponente ist (wie für jeden biologischen Prozess) Wasser.

Günstige Bereiche für die Praxismischung liegen in der Regel bei einem Wassergehalt von rund 50 bis 60 Prozent der feuchten Masse. Die organische Substanz sollte rund 55 bis 65 Prozent der Trockenmasse betragen. Diese organischen Substanzen sind hochmolekulare natürliche Kohlenstoff/ Wasserstoff/ Stickstoffverbindungen. Eingeteilt werden sie in die vier Gruppen:

Proteine

Fette, Wachse, Öle

Kohlenhydrate

und Lignine.

Davon gelten als

leicht abbaubar: Zucker, Fette, Stärke, Proteine, Hemizellulose, Zellulose

und schwer abbaubar: Lignin, Wachse, Harze, Gerbstoffe und Huminstoffe.

Der Salzgehalt sollte innerhalb von 2-4 mS/cm (miliSiemens/Zentimeter) sein und das Kohlenstoff/ Stickstoff- Verhältnis rund 25:1 bis 35:1 betragen.

Der Rotteprozess

Die Biologie des Rotteprozesses ist in Abbildung 1 zu sehen. Dabei wandeln Mikroorganismen organische Substanzen unter feuchten Bedingungen unter Zugabe von Sauerstoff zu stabilen Huminstoffen um. Dabei entsteht Kohlendioxid, Wasser, Geruch, Sickerwasser und Energie. Es kommt daher zu einem erheblichen Kohlenstoffverlust.⁷

Beispiel Glucose: $C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 \Rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O + 2.803 \text{ kJ/Mol}$

⁷Vgl. Binner (2012), S. 12

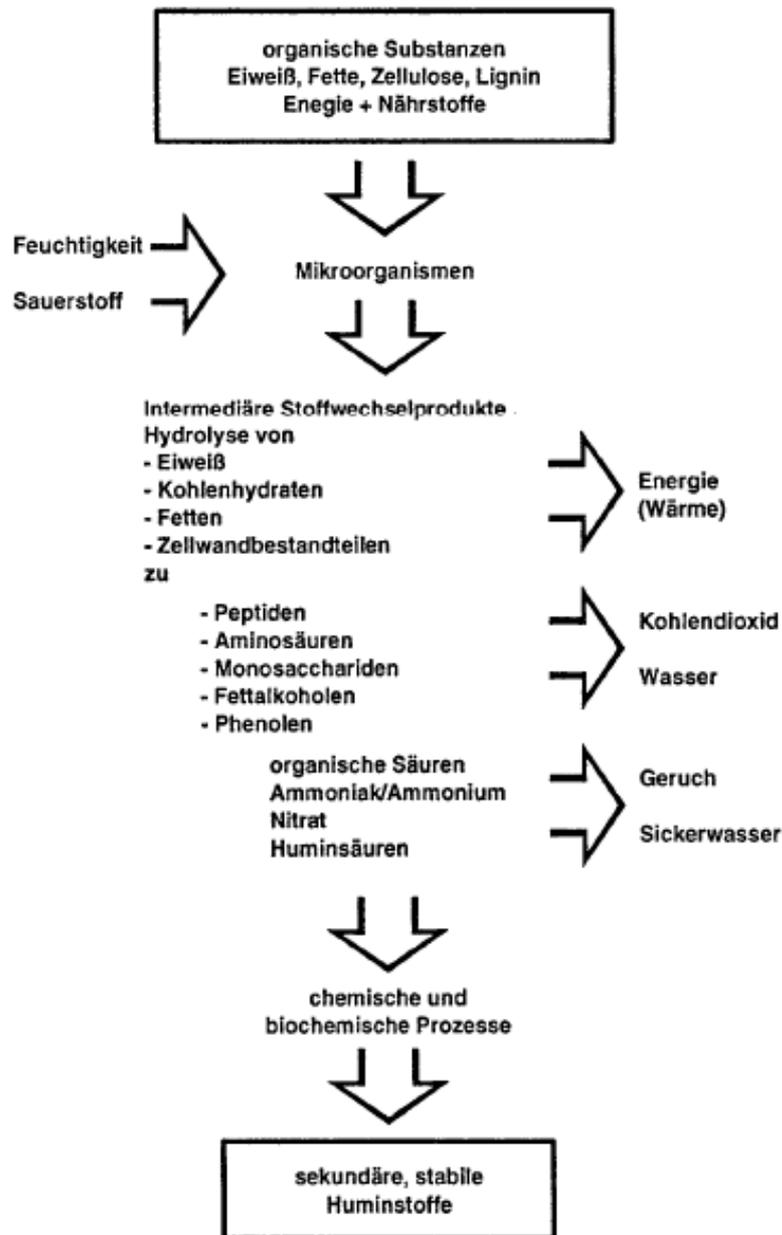


Abbildung 1: Biologie des Rotteprozesses⁸

Es läuft eine Vielzahl von physikalischen biologischen und biochemischen Vorgängen im Kompostierprozess ab. Da das Kompostsubstrat komplex und immer verschieden ist, kann keine exakte Modellierung der Vorgänge beziehungsweise der Zersetzungsprodukte erfolgen. Daher wird als Annäherung und Vereinfachung der Prozess durch die Glucose modelliert. Die beim aeroben Abbau von Glucose freigesetzte Wärmemenge stellt sicherlich die obere Grenze dar.

⁸ Vgl. Binner, 2012, S. 11

Bei der Kompostierung werden je nach Autor zwei bis vier Phasen unterschieden, die jeweils durch eine charakteristische Temperatur, einen charakteristischen pH-Wert und oder durch spezifische Zusammensetzungen von Mikroorganismenpopulationen gekennzeichnet sind.⁹

Das Ziel ist ein möglichst schneller aber verlustarmer Ab- und Umbau von organischen Substanzen in pflanzenfreundliche Humussubstanzen. Der hergestellte Kompost soll einen möglichst hohen Anteil an (stabiler) organischen Stoffen enthalten. In dieser Arbeit wird der technische Rotteprozess in die Prozessschritte

- Hauptrotte
- Nachrotte
- Kompostreife

unterteilt. In der Abbildung 2 sind die verschiedenen Phasen der Kompostierung hinsichtlich Kohlenstoffabbau, Ammoniumstickstoff, Temperatur und pH Wert dargestellt.¹⁰ Darin ist gut zu erkennen, dass die Temperatur stark variiert und in der Anfangsphase mit bis zu 70 °C ihren Höhepunkt erreicht, dann aber stetig abnimmt. Dies hängt mit der Kohlenstoffabbaurate zusammen.

⁹ Vgl. Wagner A., Illmer P., 2004, S. 300

¹⁰ Vgl. Binner E., 2012, S. 10ff

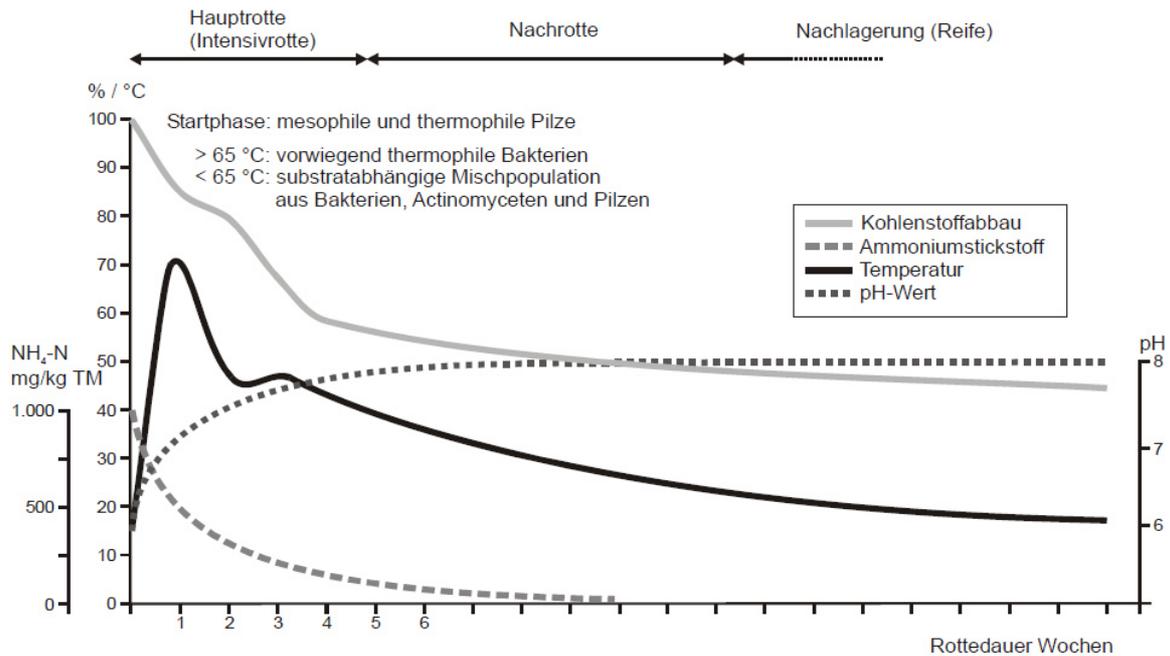


Abbildung 2: Schematische Darstellung von Temperatur, Kohlenstoffabbau, Ammoniumfreisetzung und pH- Wert im Verlauf der Rotte¹¹

Die Hauptrotte¹²

In dieser ersten Phase werden überwiegend leicht abbaubare organische Substanzen wie Eiweiße, Fette und einfache Kohlenhydrate unter thermophilen Bedingungen abgebaut. Dabei kann die Dauer von zwei bis drei Wochen bis hin zu fünf bis acht Wochen, aufgrund der jeweiligen Rottebedingungen, stark variieren. Durch die intensive Abbautätigkeit wird viel Sauerstoff benötigt. Temperaturen von über 70°C und Kohlenstoffabbauraten von 30 – 40 Prozent können erreicht werden. Hinsichtlich der Verfahrenstechnik sollten die Prozessparameter

Feuchte,

Struktur(freies Luftporenvolumen),

Sauerstoffangebot und

Temperatur

für das jeweilige Prozessstadium optimiert werden. Während der Rotte kann der Prozess durch Umsetzen (= Durchmischen und Auflockern) und Zwangsbelüftung unterstützt werden.

¹¹ Vgl. Binner E. ,2012, S. 17

¹² Vgl. Binner E. ,2012, S. 17ff.

Die Nachrotte¹³

In der zweiten Phase des Rotteprozesses werden schwer biologisch verfügbare Substanzen, vorwiegend Zellulose, unter mesophilen Bedingungen abgebaut. Der Sauerstoffbedarf und auch die Temperaturen sind wesentlich geringer als in der Hauptrotte.

Umsetzen beeinflusst auch hier den Rotteprozess positiv, jedoch sinkt die erforderliche Frequenz des Umsetzens mit der Rottedauer.

Die Kompostreife

Huminstoff- und nährstoffreicher Kompost ist das Endprodukt dieser Phase und damit des gesamten Rotteprozesses.¹⁴ Die Temperaturen sinken noch weiter bis zur Umgebungstemperatur ab. In Abhängigkeit vom Kompostierungsprozess und der vorgesehenen Kompostanwendung kann diese Phase rund sechs bis neun Monate dauern.¹⁵

Einflussgrößen für einen erfolgreichen Kompostierungsprozess¹⁶

Wichtige Einflussgrößen für den Ablauf der Kompostierung sind

- der Wassergehalt,
- die Sauerstoffversorgung,
- das C/N Verhältnis des Ausgangsmaterial,
- die Temperaturen der verschiedenen Phasen,
- der pH- Wert und
- die mikrobiologische Diversität.

Diese werden nun näher erläutert.

Wassergehalt

Die Mikroorganismen, welche beim Kompostierungsprozess das Substrat zersetzen, benötigen ausreichend Wasser, da sie die Nährstoffe nur in gelöster Form aufnehmen können. In der Literatur beschreibt man verschiedene Grenzen der Feuchte für eine erfolgreiche Kompostierung. Als untere Grenze für optimale biologische Aktivität geben manche Autoren 30 % feuchte Masse (FM) und andere

¹³ Vgl. Binner E., 2012, S. 19

¹⁴ Vgl. Binner E., 2012, S. 19ff

¹⁵ Vgl. Wagner A., Illmer P., 2004, S. 301f

¹⁶ Vgl. Wagner A., Illmer P., 2004, S. 302

wiederum 40 % FM an. Dies hängt von den unterschiedlichen Ausgangsmaterialeigenschaften (Wasserhaltevermögen, Luftporenvolumen,...) ab. Daher verändert sich der optimale Wassergehalt auch im Verlauf der Rottedauer. Bei 20 % Feuchte kommt der Prozess nahezu zum Erliegen. Steigt der Wassergehalt über 60 % FM an, besteht die Gefahr, dass das Wasser die Luft aus den Poren verdrängt. Durch fehlendes Luftporenvolumen wird die Sauerstoffnachlieferung unterbunden und der Prozess gleitet ins anaerobe Milieu. In der Regel liegt der günstige Wassergehalt für die Kompostierung zwischen ca. 40 und 60 % FM.¹⁷ Um dies zu gewährleisten, muss das Rottegut regelmäßig bewässert werden, denn obwohl Wasser durch den Kompostierungsprozess freigesetzt wird, geht dieses bei einem gut funktionierenden System durch die Selbsterhitzung und damit einhergehende Verdunstung verloren.¹⁸ Hohe Wasserzugabe allein reicht jedoch noch nicht für eine erfolgreiche Kompostierung aus, denn für die Mikroorganismen ist die Wasserverfügbarkeit von entscheidender Bedeutung. Daher sollte nach dem „Befeuchten“ durchmischt (homogenisiert) werden.¹⁹

Belüftung/ Sauerstoffversorgung

Die Kompostierung erfolgt durch aerobe Mikroorganismen, daher muss genügend Sauerstoff vorhanden sein. Beim Abbau von organischer Substanz wird Sauerstoff verbraucht und ein gleich großes Volumen an CO₂ freigesetzt. Der Bedarf der Mikroorganismen an Sauerstoff hängt vom Ausgangssubstrat, der Prozesstemperatur, der Prozessphase und den Bedingungen wie Wassergehalt, Dichte und so weiter ab.²⁰ Die Belüftung hat somit die Aufgaben, den verbrauchten Sauerstoff zu ersetzen, Stoffwechselprodukte wie CO₂, NH₃ sowie Wasser und Wärme abzuführen. Wird dies nicht ausreichend gewährleistet, kommt es zu einer verminderten Aktivität und vor allem zu Beginn der Rotte zu einer zusätzlichen Ansäuerung durch Hydrolyse und acidophile Mikroorganismen.²¹ Wird jedoch zu stark belüftet, wird damit zuviel Wärme und/oder Feuchtigkeit aus dem Rotteprozess ausgetragen, was sich wiederum negativ auf den Kompostierprozess auswirkt.²² Die Zufuhr von Sauerstoff wird entweder durch Zwangsbelüftung und/oder durch Auflockerung, welches das Luftporenvolumen und damit die Konvektion erhöht, erreicht.²³

¹⁷ Vgl. Wagner A., Illmer P., 2004, S. 303

¹⁸ Epstein E., 1997, (keineSeite), (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 304)

¹⁹ Stentiford E.I., 1996, (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 304)

²⁰ Stentiford E.I., 1996, (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 302)

²¹ Epstein E., 1997, (keineSeite), (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 303)

²² Miller F.C., 1989, (keine Seite), (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 303)

²³ Illmer P., 2000, (keine Seite), (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 303)

Kapitel 2: Grundlagen- / Theorieteil

C/N Verhältnis des Ausgangsmaterial

Das C/N Verhältnis sollte am Beginn der Kompostierung zwischen 25:1 und 35:1 liegen, da die Mikroorganismen bei einem Verhältnis von 30:1 Kohlenstoff und Stickstoff am besten nutzen. Liegen zu hohe C-Konzentrationen vor, verzögert dies den Rottevorgang. Liegen zu niedrige C-Konzentrationen vor, kommt es zu Stickstoffverlusten über Sickerwasser oder Abluft. Bei pH-Werten im algalischen Bereich wird Ammonium in toxisches Ammoniak (NH_3) umgewandelt, der inhibierend auf den weiteren Abbau wirken kann.²⁴ Durch Zugabe von Strukturmaterial wie Sägemehl (C/N = 500/1), Rinde (C/N=120/1), Stroh (C/N=80/1), Laub (C/N=50/1), Rasenschnitt (C/N = 10/1 bis 20/1) oder mittels Stickstoff Zugabe (z.B. Klärschlamm, Küchenabfälle, Harnstoff) kann das Ausgangsmaterial in ein entsprechende C/N-Verhältnis gebracht werden.²⁵

Die Temperatur

Die Temperatur beeinflusst Wachstumsraten, metabolische Aktivitäten und die Struktur der mikrobiellen Populationsgemeinschaft entscheidend. Dabei hängt die Wärmeentwicklung von der chemischen Zusammensetzung des Ausgangsmaterials, der Nährstoffverfügbarkeit, dem Wassergehalt, der Partikelgröße, der Wendefrequenz und dem Sauerstoffeintrag ab.²⁶ Besonders zu Beginn des Rotteprozesses spielt die Wärmespeicherung eine wichtige Rolle, und es können Temperaturen von bis über 82 °C erreicht werden. Bei solch hohen Temperaturen wird die mikrobiologische Aktivität wesentlicher Mikroorganismen gehemmt. Deswegen versucht man durch Zwangsbelüftung und Umsetzen die Rottetemperatur zu regulieren, weil der dabei freigesetzte Wasserdampf dem Kompost Wärme entzieht.^{27,28}

Der pH-Wert

Der pH-Wert sinkt am Beginn des Rotteprozesses durch die Bildung von organischen Säuren (Hydrolyse) ab. Erst durch den Ablauf/Austrag dieser Säuren und den Proteinabbau kommt es wieder zu einem Anstieg des pH-Wertes in den neutralen bis alkalischen Bereich, um wiederum in der Reifephase durch die Ammonifikation abzusinken, um so dann pH-wertmäßig im neutralen Bereich zu bleiben.²⁹ Die

²⁴ Epstein E., 1997, (keine Seite), (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 302)

²⁵ Eiland F., Klaimer A.M., Leth M. & Baath E., 2001, (zit. nach Wagner A., Illmer P., 2004, S. 302)

²⁶ Gray K.R., Biddlestone A.J., 1971, (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 303)

²⁷ Lott- Fischer J., Albrecht A. & Kämpfer P., 2001, (keine Seite) (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 305)

²⁸ Walker L.P., Nock T.D., Gossett J.M & Vandergheynst J.S., 1999, (keine Seite) (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 305)

²⁹ Canet R. & Pomares F., 1995, (Keine Seite), (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 305)

Kapitel 2: Grundlagen- / Theorieteil

Belüftung und die Zusammensetzung des Substrates beeinflussen also neben der Temperatur und der Feuchte auch den pH-Wert während der Kompostierung.³⁰

Mikroorganismenzusammensetzung

In Abhängigkeit von der Materialzusammensetzung und den Milieubedingungen sind unzählige verschiedene Mikroorganismenarten (Bakterien, Actinomyceten, Pilze) während der unterschiedlichen Rottephasen (thermophil, mesophil) beteiligt. Aufgrund der Komplexität des Prozesses und der Variabilität der Ausgangssubstanzen gibt es jedoch nur wenige Untersuchungen auf diesem Gebiet.³¹

Stand der Technik zur Wärmenutzung bei der Kompostierung³²

Eine Literaturrecherche ergab mehrere Projekte, welche sich bereits mit der Wärmergewinnung vom Kompostierungsprozess beschäftigten bzw. noch immer beschäftigen. Grundsätzlich sind aber alle relevanten Projekte vom Biomeiler von Jean Pain abgeleitet.

Der Biomeiler

Der Biomeiler wurde in den 70 Jahren von Jean Pain entwickelt, um gehäckseltes Holz ökonomisch und ökologisch zu verwerten. Dabei werden Holzhackschnitzel zu einem runden Haufen oder Block aufgeschichtet und dazwischen Rohrleitungen verlegt, welche die Funktion des Wärmetauschers übernehmen. Je nach Anwendungsfall werden die Rohre mit Wasser durchflutet oder mit Luft durchströmt. Bei etwa 80 m³ Holzhackschnitzel kann circa 18 bis 24 Monate, je nach Zusammensetzung des Materials, Wärme entzogen werden. Die Anwendung ist für den dezentralen Bereich gedacht, da der Biomeiler mit geringem technischem Aufwand gebaut und genutzt werden kann.

³⁰ Körner I. & Stegmann R., 1998, (Keine Seite), (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 305)

³¹ Beffa T., Blanc M., Marilley L., Lott-Fischer J., Lyon P.F. & Aragno M., 1995, (Keine Seite), (zit. nach: Wagner A., Illmer P., 2004, S. 306)

³² <http://www.oja-online.de/article/read/526.html>



Abbildung 3: Biomeiler³³

2.2 Reaktoranforderungen

Da es nur wenig Literatur über verschiedene Reaktorkonzepte gibt, wurden Expertengespräche mit Klaus Engelhart, Leo Obkircher, Karl Ponweiser, Tobias Pröll, Klemens Schulmeister und Erwin Binner geführt. Dabei wurden die unten näher diskutierten Problemkreise diskutiert, um ein Konzept zu entwickeln.

Die Korrosion

Die Abluft bei der Kompostierung, das Kompostsubstrat selbst, sowie das Sickerwasser sind stark korrosiv. Dies konnte schon aus verschiedenen bereits bestehenden Anlagen, welche aber nicht die Abwärme bei der Kompostierung nutzen, beobachtet werden.

Daher sollten alle Komponenten, welche mit dem aufbereiteten Material für die Kompostierung, dem Sickerwasser oder der Abluft in Berührung treten, aus korrosionsbeständigen oder nicht korrosiven Materialien wie Kunststoff bestehen.

Verstopfung und Brückenbildung

Aufgrund der Zusammensetzung des aufbereiteten Materials und der hohen Feuchtigkeit besteht im Reaktor eine große Gefahr der Verstopfung bzw. der Brückenbildung. Auch mit verschiedenen großen Rottegutstücken ist zu rechnen, da das Kompostsubstrat aus keinem homogenen Material besteht.

Das entwickelte Konzept muss deswegen „verstopfungssicher“ sein, aber auch die

³³<https://plus.google.com/photos/117096897206455368624/albums/5378591703663492817/5378596721662367810?banner=pwa&pid=5378596721662367810&oid=117096897206455368624>

Möglichkeit der Brückenbildung verhindern.

Durchlüftung

Der Kompostierungsprozess ist ein aerober Prozess und benötigt daher ständig, abhängig vom Rottegrad, Sauerstoff und Wasser. Dabei sind der verbrauchte Sauerstoff sowie das Wasser, welches mit der Abluft verloren geht, laufend zu ergänzen, um eine Hemmung des Prozesses zu verhindern.

Die Luft sollte möglichst ungehindert und überall für den Prozess zur Verfügung stehen. Dies kann durch Zwangsbelüftung und Beimischung von Strukturmaterial gewährleistet werden. Um den Wassergehalt steuern zu können, sollte ein Befeuchten möglich sein.

Durchmischung

Durch das regelmäßige Durchmischen des Ausgangsmaterials wird der Rotteprozess unterstützt und kann so erheblich beschleunigt werden. Dabei gibt es verschiedene Ansätze für die Häufigkeit, von täglich bis hin zu einer Woche, jedoch gibt es keine goldene Regel dafür. Sie hängt von der Art des Rottegutes, dem Grad der Rotte, der Zeit der Befeuchtung und dem Ablauf der Kompostierung ab. Ziel soll es sein, das Material so gut wie möglich zu durchmischen und aufzulockern, um stets genügend Luftporenvolumen zur Verfügung zu haben. Das Konzept muss es ermöglichen, das Rottegut zu durchmischen, aber dabei das Material nicht zu stark zu zerkleinern (verdichten).

2.3 Thermodynamische Grundlagen

Energie kann in einem System auf unterschiedliche Weise enthalten sein. Beispiele dafür sind die mechanische Energie, die potentielle Energie und die chemische Energie. Damit sie für die Gesellschaft nutzbar wird, muss sie in bestimmte Energieformen wie elektrische Energie oder Wärme umgewandelt werden. Beim Kompostierungsprozess soll die umgewandelte Energie in Form von Wärme, mit Hilfe feuchter Luft, entzogen werden.

Feuchte Luft³⁴

Ideale Gas-Dampf-Gemische

Die feuchte Luft, bestehend aus trockener Luft und dampfförmigen Wassers, gehört zu den Gas-Dampf-Gemischen, wobei selbst die Luft ein Gasgemisch aus rund 78

³⁴ Vgl. Geller, 2006, S. 191f

Volumenprozent Stickstoff, 21 Volumenprozent Sauerstoff und 1 Volumenprozent anderen Gasen besteht. In der Atmosphäre tritt das Wasser in der Luft meist als Wasserdampf auf, dessen Partialdruck im Temperatur- und Druckbereich sehr klein ist und deshalb Idealgascharakter hat.

Der Partialdruck bezeichnet den Teildruck einer einzelnen Komponente in einem Gasgemisch und ist jener Druck, der sich einstellen würde, wenn die Gaskomponente den gesamten Raum des Gasgemisches zur Verfügung hätte. Damit entspricht er seinem Volumenanteil am Gasgemisch. Der Gesamtdruck eines Gasgemisches ergibt sich aus der Summe der Partialdrücke. Für die feuchte Luft ergibt sich der Gesamtdruck p mit dem Partialdruck der trockenen Luft p_L und dem Partialdruck des Wasserdampfes p_W zu

$$p = p_L + p_W . \quad (2.1)$$

Die Aufnahmefähigkeit von Wasser in feuchter Luft ist begrenzt und hängt von Temperatur und Druck ab. Erreicht der Partialdruck des Wasserdampfes den Sättigungsdruck des Gemisches, welcher von der Temperatur abhängt, ist das Maximum erreicht. Ist der Wasseranteil geringer, spricht man von ungesättigter feuchter Luft. Entspricht der Anteil gerade dem des Maximalwertes, dann hat man es mit gesättigter feuchter Luft zu tun. Wird dann weiter Wasserdampf zugeführt, spricht man von übersättigter feuchter Luft. Das Gemisch kann keinen Wasserdampf mehr aufnehmen und das überschüssige Wasser liegt entweder als Flüssigkeit in Form von fein verteilten Wassertröpfchen, oder bei niedrigen Temperaturen als Schnee vor. Der Partialdruck des Wasserdampfes ändert sich dabei nicht. Es herrscht ein Zweiphasensystem vor, bestehend aus gesättigter feuchter Luft und dem Kondensat.

Wasserbeladung

Die Gesamtmasse für die feuchte Luft ergibt sich zu

$$m = m_L + m_W . \quad (2.2)$$

Mit m_W für die Masse des Wassers und m_L für die Masse der trockenen Luft.

Die Wasserbeladung X der feuchten Luft errechnet sich aus dem Verhältnis von Wassermasse m_W zur Masse der trockenen Luft m_L und gibt an, wieviel kg Wasser auf 1 kg trockene Luft entfallen.

$$X = \frac{m_W}{m_L} \quad (2.3)$$

Da sich der Wasserdampf in der ungesättigten feuchten Luft wie ein Idealgas verhält, lässt sich die Wassermasse durch

$$m_W = \frac{p_W V}{R_W T} \quad (2.4)$$

errechnen. Diese Formel gilt jedoch nur für $p_W \leq p_S$ (ungesättigte oder gerade gesättigte Luft). Dabei entspricht R_W der speziellen Gaskonstante, T der absoluten Temperatur und V dem Volumen der feuchten Luft.

Die maximal aufnehmbare Wassermasse m_{WS} liegt bei Sättigungspartialdruck p_{WS} der feuchten Luft.

Die Wasserdampfbeladung ergibt sich mit (2.3) und (2.4) zu:

$$X = \frac{m_W}{m_L} = \frac{R_L p_W}{R_W p_L} \quad (2.5)$$

Mit R_L als Gaskonstante der trockenen Luft.

Absolute Feuchte

Die absolute Feuchte ρ_W ergibt sich als Quotient aus der Masse m_W des Wasserdampfes und dem Volumen V der feuchten ungesättigten Luft.

$$\rho_W = \frac{m_W}{V} = \frac{p_W}{R_W T} \quad (2.6)$$

Der Maximalwert ρ_{WS} stellt sich dann ein, wenn der Wasserdampfpartialdruck p_W dem Sättigungspartialdruck $p_S = p_S(T)$ entspricht.

Relative Feuchte

Die relative Feuchte ist das Verhältnis der absoluten Feuchte (2.6) zum Maximalwert der absoluten Feuchte und heißt φ . Sie entspricht auch dem Verhältnis des Partialdrucks des Wasserdampfes zum Sättigungspartialdruck.

$$\varphi = \frac{\rho_W}{\rho_{WS}} = \frac{p_W}{p_S} \quad (2.7)$$

Dabei gilt für trockene Luft $\varphi = 0$ und für gerade gesättigte Luft $\varphi = 1$.

Mit der Wasserdampfbeladung (2.5) ergibt sich φ zu

$$\varphi = \frac{X}{\frac{R_L}{R_W} + X} \frac{p}{p_S} \quad (2.8)$$

Der Höchstwert der Wasserdampfbeladung bei Sättigungswert X_S ($\varphi = 1$) ergibt sich zu

$$X_S = \frac{m_{WS}}{m_L} = \frac{R_L}{R_W} \frac{p_S}{p - p_S} \quad (2.9)$$

Kapitel 2: Grundlagen- / Theorieteil

Die Gaskonstante R_L von Luft beträgt 287,1 J/kgK und R_W für Wasserdampf 461,5 J/kgK. Dadurch kann der Quotient durch den Zahlenwert $R_L/R_W = 0,622$ ersetzt werden.

Enthalpie der feuchten Luft

Die Enthalpie H der feuchten Luft ergibt sich als Summe von Enthalpie der trockenen Luft und der des Wassers.

$$H = H_L + H_W = m_L h_L + m_W h_W \quad (2.10)$$

Die spezifische Gemischenthalpie wird auf die Masse der trockenen Luft bezogen und errechnet sich aus

$$h_{1+X} = \frac{H_L + H_W}{m_L} = h_L + X h_W . \quad (2.11)$$

Es ist üblich, den Tripelpunkt des Wasser mit $T_{tr} = 273,16$ K als Nullpunkt der Enthalpie der feuchten Luft zu setzen.

Die spezifische Enthalpie der trockenen Luft ergibt sich daher zu

$$h_L = c_{pL} (T - T_{tr}) , \quad (2.12)$$

oder vereinfacht geschrieben $h_L = c_{pL} \vartheta$.

Mit $c_{pL} = 1,863$ kJ/kgK als spezifische Wärmekapazität von Luft.

Die spezifische Enthalpie h_{Wg} des gasförmigen Wassers errechnet sich aus:

$$h_{Wg} = \Delta h_{Dtr} + c_{pW} \vartheta \quad (2.13)$$

mit $\Delta h_{Dtr} = 2501$ kJ/kg als Verdampfungsenthalpie am Tripelpunkt und der spezifischen Wärmekapazität für Wasserdampf $c_{pW} = 1,863$ kJ/kgK und ϑ als Temperaturdifferenz vom Tripelpunkt. Diese spezifischen Wärmekapazitäten für trockene Luft und Wasserdampf gelten praktisch in einem Temperaturbereich von -50 °C bis +70 °C.

Die spezifische Enthalpie h_{We} des flüssigen Wassers ergibt sich aus

$$h_{Wf} = c_W \vartheta \quad (2.14)$$

mit der spezifischen Wärmekapazität des Wassers $c_W = 4,186$ kJ/kgK.

Durch die zuvor genannten Beziehungen (2.10-2.14) können nun die spezifischen Enthalpien für ungesättigte feuchte Luft, gesättigte feuchte Luft und übersättigte feuchte Luft hergeleitet werden.

Kapitel 2: Grundlagen- / Theorieteil

Ungesättigte feuchte Luft: $X < X_S$

Die trockene Luft ist noch nicht gesättigt und kann weiterhin Wasserdampf aufnehmen. Es hat sich noch kein Kondensat gebildet.

$$h_{1+X} = c_{pL} \vartheta + X (\Delta h_{Dtr} + c_{pW} \vartheta) \quad (2.15)$$

Gesättigte feuchte Luft: $X = X_S$

$$h_{S1+X} = c_{pL} \vartheta + X_S (\Delta h_{Dtr} + c_{pW} \vartheta) \quad (2.16)$$

Die relative Feuchte φ des Gemisches beträgt 1. Daher ist feuchte Luft gesättigt und kann keinen weiteren Wasserdampf mehr aufnehmen.

Übersättigte feuchte Luft: $X > X_S$

Der Sättigungspartialdruck des Wasserdampfes ist erreicht und kann nicht weiter gesteigert werden. Dadurch ist die maximale Aufnahmefähigkeit der feuchten Luft erreicht, und das überschüssige Wasser fällt als Kondensat, entweder flüssig als Wasser oder gefroren als Eis, aus. Deshalb ergibt sich die Massenbilanz als Summe der gesättigten Luft (trockene Luft + Wasserdampf) plus m_K als Masse des Kondensats.

$$m = m_L + m_{WS} + m_K \quad (2.17)$$

Für die Enthalpie übersättigte feuchte Luft gilt:

$$H = m_L h_L + m_{WS} h_W + (m_W - m_{WS}) h_K = m_L (h_L + X_S h_W + (X - X_S) h_K) \quad (2.18)$$

Und die spezifische Enthalpie h_{S1+X} der übersättigten feuchten Luft mit der Division von H (2.18) durch m_L ergibt sich aus

$$h_{S1+X} = c_{pL} \vartheta + X_S (\Delta h_{Dtr} + c_{pW} \vartheta) + (X - X_S) h_K \quad (2.19)$$

wobei h_K abhängig vom Zustand des Kondensates ist, welches Flüssigwasser oder Eis sein kann.

Bei Flüssigwasser als Kondensat mit $X > X_S$, $\vartheta > \vartheta_{tr}$ und $h_K = h_{Wf}$ errechnet sich die Enthalpie zu

$$h_{1+X} = c_{pL} \vartheta + X_S (\Delta h_{Dtr} + c_{pW} \vartheta) + (X - X_S) c_{pW} \vartheta. \quad (2.20)$$

Bei Eis aus Kondensat mit $X > X_S$, $\vartheta < \vartheta_{tr}$ und $h_K = h_{We}$ ergibt sich die Enthalpie zu

$$h_{1+X} = c_{pL} \vartheta + X_S (\Delta h_{Dtr} + c_{pW} \vartheta) + (X - X_S) (c_e \vartheta - \Delta h_{Etr}) \quad (2.21)$$

wobei Δh_{Etr} die Erstarrungsenthalpie mit 333,5 kJ/kg ist und c_E die spezifische Wärmekapazität von Eis mit 2,05 kJ/kgK.

Mischen feuchter Luft³⁵

Das Vermischen verschiedener Luftströme erfolgt in der Mischkammer. Dabei wird der Mischraum als System eingegrenzt und die Mischluft aus den Bilanzen der Energie- und Stoffströme errechnet, wobei die kinetischen und potentiellen Energien nicht mit berücksichtigt werden.

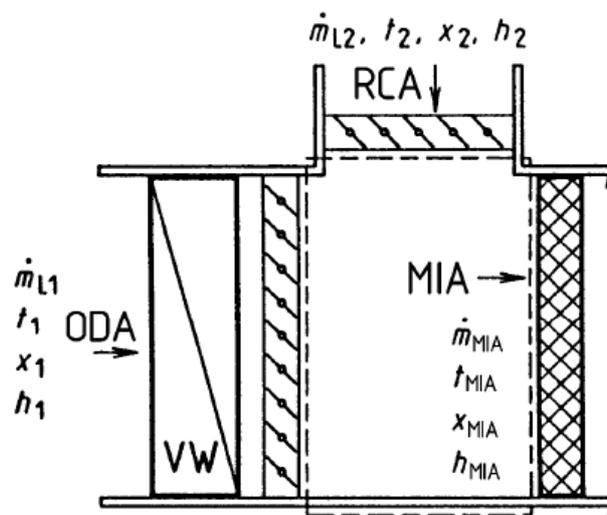


Abbildung 4: Massen und Energieströme in einer Mischkammer³⁶

Dadurch ergibt sich die Enthalpie der Mischung zu

$$h_{1+x_M} = \frac{m_{L_1} h_{1+x_1} + m_{L_2} h_{1+x_2}}{m_{L_1} + m_{L_2}}, \quad (2.22)$$

die Wasserdampfbeladung zu

$$X_M = \frac{m_{L_1} X_1 + m_{L_2} X_2}{m_{L_1} + m_{L_2}} \quad (2.23)$$

und die Temperatur der Mischung für ungesättigte feuchte Luft zu

$$T_M = \frac{h_{1+x_M} - X_M \Delta h_{Dtr}}{c_{pL} + c_{pW} X_M}. \quad (2.24)$$

Dabei liegt der Zustandspunkt der Mischung im h,x Diagramm auf der Verbindungsgeraden der Zustände 1 und 2, und die Streckenabschnitte verhalten sich umgekehrt der beiden Luftströme im ungesättigten Gebiet.

³⁵ Vgl. Langeheinecke K., Jany P., Thieleke G., 2008, S. 171

³⁶ Langeheinecke K., Jany P., Thieleke G., 2008, S. 171

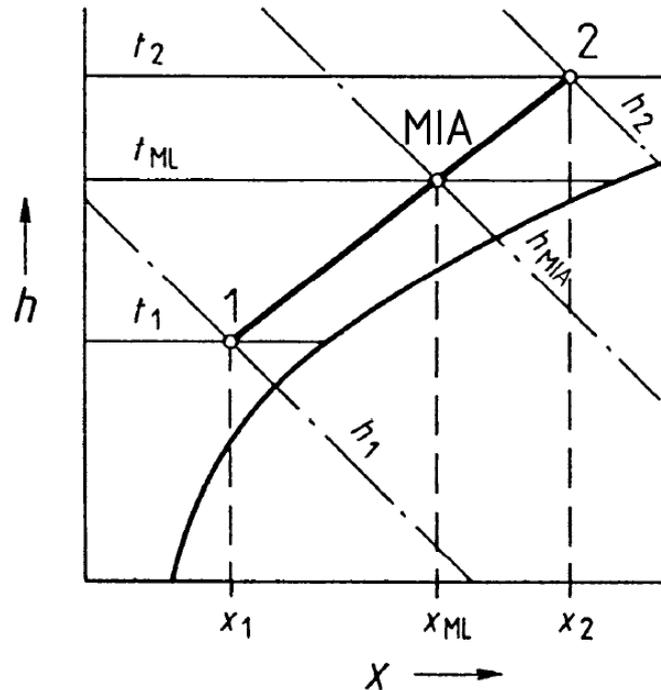


Abbildung 5: Mischung im h,x Diagramm³⁷

Antoine-Gleichung³⁸

Zur Ermittlung des Dampfdruckes mit $T > 0,001 \text{ °C}$ kann die Antoine Gleichung mit dem Tripelpunkttsdruck $p_{tr} = 0,611657 \text{ kPa}$ im Bereich von $0,01 \text{ °C}$ bis 60 °C mit einer Abweichung von $0,05 \%$ herangezogen werden.

$$p_W^s = p_{tr} \exp \left(17,2799 - \frac{4102,99}{\frac{T}{\text{°C}} + 237,431} \right) \quad (2.25)$$

Wärmetauscher³⁹

Wärmetauscher dienen zum Aufheizen oder Abkühlen eines bestimmten Fluides durch ein anderes. Dies erfolgt entweder mit direkten oder indirekten Kontakt. Bei direktem Kontakt passiert meistens der Wärmeaustausch über einen Stoffübergang zwischen den beiden Medien. Bei indirektem Kontakt erfolgt der Wärmeaustausch durch eine Trennwand.

Außerdem wird zwischen den Strömungsrichtungen beider Fluide unterschieden. Diese können Gleich-, Gegen- oder Kreuzströme und beliebigen Kombinationen sein.

³⁷ Langeheinecke K., Jany P., Thieleke G., 2008, S. 172

³⁸ Vgl. Baehr, 2009, S. 285

³⁹ Vgl. Langeheinecke K., Jany P., Thieleke G., 2008, S. 275 ff.

Der Temperaturverlauf

Der Temperaturverlauf eines indirekten Wärmetauschers mit Gleich- und Gegenstrom ist in der nächsten Abbildung zu sehen. Dabei lassen sich die Temperaturen T_1 und T_2 in Abhängigkeit von x beschreiben.

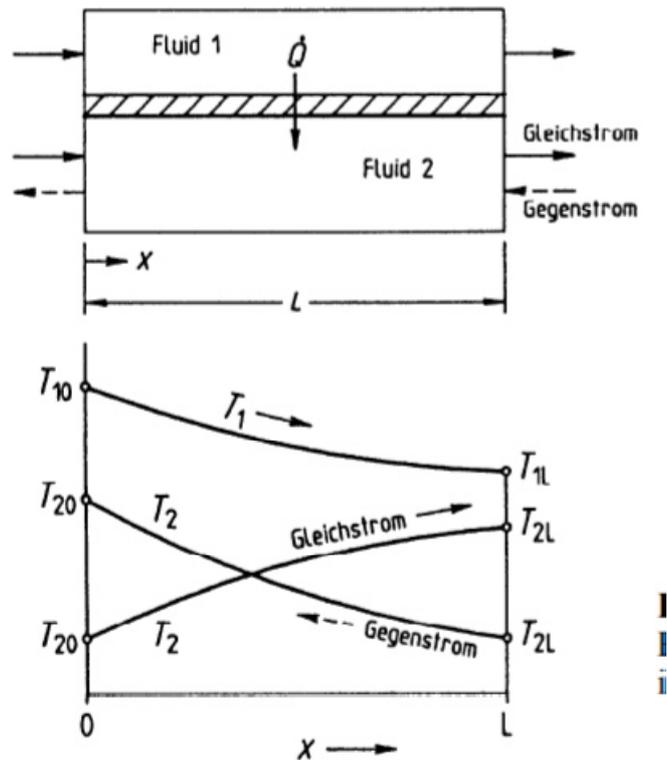


Abbildung 6: Temperaturverlauf eines Wärmetauschers⁴⁰

An Abbildung 6 ist deutlich zu erkennen, dass bei Gleichstrom das Fluid 2 maximal die Austrittstemperatur des Fluid 1 erreichen kann, hingegen bei Gegenstrom höchstens die Eintrittstemperatur.

Aufgrund des ortsabhängigen Temperaturabstandes von T_1 und T_2 gilt der Wärmestrom immer nur für ein kleines Flächenelement dA . Durch diesen Wärmestrom ändern sich die Enthalpieströme beider Medien. Aufgrund dieser Gleichungen kann unter den Anfangsbedingungen $T_1(x=0) = T_{10}$ und $T_2(x=0) = T_{20}$ das System gelöst werden.

$$T_1(x) - T_2(x) = (T_{10} - T_{20}) \exp\left(-K \frac{x}{L}\right) \quad (2.26)$$

Mit

$$K = k A \left(\frac{1}{(m c_p)_1} \pm \frac{1}{(m c_p)_2} \right), \quad (2.27)$$

⁴⁰ Langeheinecke K., Jany P., Thieleke G., 2008, S. 273

wobei für den Gleichstrom + und für den Gegenstromwärmetauscher – eingesetzt wird.

Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz

Durch Integration, Einsetzen und Umformen erfolgt der Wärmestrom zu

$$Q = k A \frac{T_{10}-T_{20}-(T_{1L}-T_{2L})}{\ln \left(\frac{T_{10}-T_{20}}{T_{1L}-T_{2L}} \right)}. \quad (2.28)$$

Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz ergibt sich aus:

$$\Delta T_m = \frac{T_{10}-T_{20}-(T_{1L}-T_{2L})}{\ln \left(\frac{T_{10}-T_{20}}{T_{1L}-T_{2L}} \right)} \quad (2.30)$$

Und damit folgt:

$$Q = k A \Delta T_m \quad (2.31)$$

Für einen leistungsstarken Wärmetauscher muss nun der Wärmedurchgangskoeffizient k mal der Fläche A möglichst groß werden.

Druckverlust in durchströmten Schüttungen⁴¹

Die Beschreibung des Strömungsdruckverlustes kann entweder nach dem Modell des hydraulischen Durchmessers oder nach dem Modell der Einzelpartikelströmung erfolgen.

Druckverlust basierend auf dem Modell der Einzelpartikelumströmung

Bei der Umströmung der Partikeln wird eine Widerstandskraft W_1 von jeder Partikelanzahl z ausgeübt. Diese ist im Gleichgewicht zur Druckkraft(2.32).

$$z W_1 = \Delta p f \quad (2.32)$$

Die Partikelanzahl erhält man aus der Feststoffmassenbilanz

$$z = \frac{(1-\psi) f \Delta L}{d_p^3 \frac{\pi}{6}} \quad (2.33)$$

und damit, mit Bezug auf die Trägheitskraft des anströmenden Fluides, die dimensionslose Euler-Zahl.

$$Eu \equiv \frac{4}{3} \frac{\Delta p}{\rho_f v^2} \frac{\bar{d}_p}{\Delta L} \frac{\psi^2}{1-\psi} = \frac{W_1}{\frac{\rho_f}{2} \frac{\bar{d}_p^2 \pi}{4} \left(\frac{v}{\psi} \right)^2} \quad (2.34)$$

⁴¹ Vgl. VDI-Wärmeatlas 1275ff.

Für kugelige Partikeln, mit der Analyse der Umströmung einzelner Partikeln im Festbett mit Hilfe der Navier-Stokes-Gleichung und Auswertung von Druckverlustmessungen, ergibt sich folgende Formel:

$$\begin{aligned} \text{Eu} = \frac{24}{\text{Re}} \left\{ 1 + 0,692 \left[\frac{r_0}{\delta} + 0,5 \left(\frac{r_0}{\delta} \right)^2 \right] \right\} \\ + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}}} \left[1 + 0,12 \left(\frac{r_0}{\delta} \right)^{1,5} \right] + \left[0,4 + 0,891 \cdot \frac{r_0}{\delta} \text{Re}^{-0,1} \right] \end{aligned} \quad (2.35)$$

Mit

$$\frac{r_0}{\delta} = \left[\frac{0,95}{\sqrt[3]{1 - \psi}} - 1 \right]^{-1} \quad (2.36)$$

und der Reynolds-Zahl

$$\text{Re} \equiv \frac{v \bar{d}_p}{\psi \nu} \quad (2.37)$$

Bei nicht kugelförmigen Partikeln liegt ein anderes Widerstandsverhalten vor. Durch Einführung eines Druckverlustformfaktors Φ_D wird das Verhalten von nicht kugelförmigen Partikeln dem Verhalten von kugeligen Partikeln mit dem Sauter-Durchmesser d_p abgebildet. Durch die Auswertung von Experimenten ergibt sich folgende Approximationsfunktion:

$$\begin{aligned} \text{Eu}(\Phi_D) = \frac{24}{\text{Re} \Phi_D^2} \left\{ 1 + 0,685 \left[\frac{r_0}{\delta} + 0,5 \left(\frac{r_0}{\delta} \right)^2 \right] \right\} \\ + \frac{4}{\sqrt{\text{Re} \Phi_D^{1,5}}} \left[1 + 0,289 \left(\frac{r_0}{\delta} \right)^{1,5} \right] \\ + \frac{1}{\Phi_D} \left[0,4 + 0,514 \frac{r_0}{\delta} \right] \end{aligned} \quad (2.38)$$

Kaminströmung⁴²

Der Kamineffekt beruht auf der natürlichen Konvektion (basierend auf Dichteunterschieden). Die Strömung lässt sich mit der Bernoulligleichung vereinfacht ausrechnen (reibungsfrei, keine Einstromverluste, kleine Dichteunterschiede, inkompressible Strömung, 1D Strömung in Kamin und adiabater Kamin):

$$\rho_0 \frac{u_k^2}{2} + p_E = p_0 \quad (2.39)$$

⁴² Vgl. Steinrück H., 2012, S. 74f

Kapitel 2: Grundlagen- / Theorieteil

Der Druck im Kamin sowie der Druck der Umgebung sind in der Abbildung 7 ersichtlich:

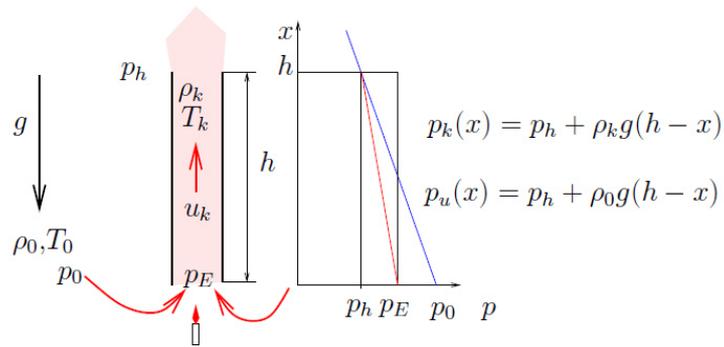


Abbildung 7: Kamineffekt⁴³

Dadurch ergibt sich die Ausströmgeschwindigkeit zu

$$u_k^2 = 2 \frac{\rho_0 - \rho_k}{\rho_k} g h . \quad (2.40)$$

⁴³ Steinrück H., 2012, S. 75

3 Konzeptentwicklung

In diesem Kapitel wird zuerst das zur Verfügung stehende Material der MA48 untersucht und betrachtet. Danach werden, aufgrund der Anforderungen an den Reaktor und die optimalen Prozessbedingungen, verschiedene Lösungskonzepte erarbeitet. Die erarbeiteten Lösungen der Projektteilnehmer werden mit einem Bewertungssystem benotet und somit ein finales Konzept eruiert.

3.1 Analysieren des Materiales

Das Ausgangsmaterial zur Kompostierung wird von der MA 48 der Stadt Wien zur Verfügung gestellt. Der Reaktor soll für dieses Inputmaterial ausgelegt werden.

In Wien werden die getrennt gesammelten biogenen Abfälle aus der Biotonne und Baum- und Strauchschnittmaterial zu einem Rohmaterial für die Kompostierung aufbereitet. Diese Aufbereitung erfolgt in der Lobau. Danach wird das Material zu Dreiecksmieten aufgeschüttet und zum Kompostieren gebracht.⁴⁴

Zusammensetzung

Das Material ist sehr grob gehäckselt, und deswegen sind noch recht große Äste vorhanden, wie auf den nächsten Bildern zu sehen ist. Auch Störstoffe wie z.B. Alu-Dosen finden sich immer wieder darunter.



Abbildung 8: Aufbereitete Material der MA48

Dichte des aufbereiteten Materials

Für die Auslegung verschiedener Komponenten wird die Dichte des Rottegutes in verschiedenen fortgeschrittenen Stufen ermittelt. Dies erfolgt mit Hilfe eines Gefäßes und einer Waage, welche in den nächsten Bildern zu sehen sind.

⁴⁴ <http://www.wien.gv.at/umwelt/ma48/entsorgung/abfallbehandlungsanlagen/>



Abbildung 9: Dichtermittlung

Die gemessenen Werte sind in der Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1: Dichtermittlung

Rottedauer	Masse Gesamt [kg]	m Behälter [kg]	Länge [m]	Breite [m]	Höhe [m]	Dichte [kg/m ³]	Anmerkung
1 Tag	6,05	1,2	0,565	0,365	0,115	205	
1 Tag	7,05	1,2	0,565	0,365	0,115	247	
1 Tag	22,05	2,45	0,570	0,370	0,338	275	(gerüttelt)
1 Tag	31,3	2,45	0,570	0,370	0,338	405	(zusammengedrückt)
18 Tage	9,2	1,2	0,565	0,365	0,115	337	
25 Tage	31,25	2,2	0,570	0,370	0,300	459	

Anhand der Daten ist zu erkennen, dass die Dichte im Laufe des Kompostierprozesses zunimmt. Da regelmäßig befeuchtet wird, sind große Schwankungen der Dichte zu erwarten.

3.2 Verschiedene Lösungsansätze

Anhand der bereits beschriebenen Anforderungen werden nun verschiedene Konzepte vorgestellt. Dabei wurde bei allen Konzepten eine vertikale Beförderung von oben nach unten im Laufe des Kompostierprozesses zugrunde gelegt. Aufgrund der Temperaturkurve im Rotteprozess ermöglicht dies eine leichte Luftführung, da die zirkulierende Luft von unten nach oben erwärmt wird und die Rottetemperatur mit der Rottedauer abnehmen soll.

Streuerkonzept

Das Streuerkonzept besteht aus mehreren vertikal aufeinander gesetzten Streu-
modulen, welche, ähnlich dem Prinzip der Streuwellen eines Miststreuers, den Kompost
diskontinuierlich streuend nach unten fördern. Durch dieses Nach-unten- Fördern
wird weiterbefördert und durchmischt. Ein einfaches Modell mit zwei Stufen ist in der
Abbildung 11 zu sehen.

Die Vorteile dieses Konzeptes sind, dass, verglichen zur Fläche, die Walzen wenig
Platz benötigen und die Luftführung nur gering behindern. Grobes Material führt nicht
gleich zum Verstopfen, und der Reaktor ist leicht herzustellen. Auch das Material
lässt sich gut verteilen.

Wesentlicher Nachteil ist, dass das Durchmischen nur mit einer Weiterbeförderung
möglich ist.

In Abbildung 10 ist ein Miststreuer aus der Landwirtschaft zu sehen, der vertikale
Streuwalzen an der Rückseite hat.



Abbildung 10: Miststreuer⁴⁵

⁴⁵ <http://bilder.landwirt.com/1010/10cd9e9ff35efd09028cecb819862a63.jpg>

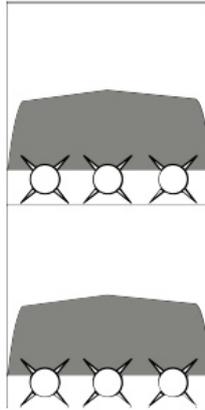


Abbildung 11: Streuerkonzept

Mahlkonzept

Auch hier besteht der Aufbau aus mehreren horizontal angeordneten Modulen (Abbildung 12), welche den Kompost von oben nach unten diskontinuierlich oder kontinuierlich fördern sollen. Durch die Drehbewegung der Welle in der Mitte, „mahlen“ alle Module den Kompost langsam nach unten. Durch diesen Prozess erfolgt automatisch ein Weitertransport und Durchmischen.

Die Vorteile dieses Konzeptes sind, dass nur eine Welle benötigt wird, welche gleichzeitig alle Module antreibt, und dass das Konzept auch kontinuierlich ablaufen kann.

Der wesentliche Nachteil ist sicherlich eine erhöhte Verstopfungsneigung.

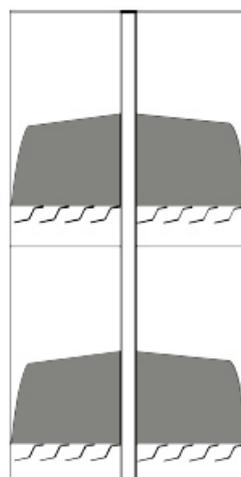


Abbildung 12: Mahlkonzept

Siebkettenkonzept

Bei dem Siebkettenkonzept wird der Kompost auf der Siebkette von Modul zu Modul nach unten kontinuierlich oder diskontinuierlich transportiert und dabei durchmischt. Die Luftdurchlässigkeit ist sehr gut gegeben, wie in Abbildung 13 zu sehen ist. Die Siebketten müssten natürlich aus Kunststoff bestehen, um die starke Korrosion auszuhalten.

Ein wesentlicher Vorteil ist hier auch die Möglichkeit des kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Betriebes. Auch ein Verstopfen ist schwer möglich.

Der Nachteil ist die vermutlich schlechte Durchmischung des Materials.



Abbildung 13: Siebkette⁴⁶

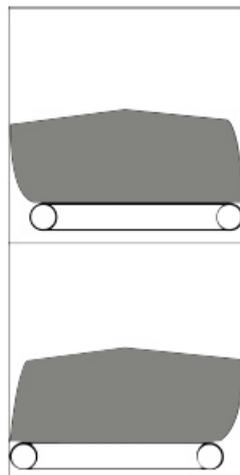


Abbildung 14: Siebkettenkonzept

⁴⁶ http://shops.venditio.com/hmf-online/katalog_php/1_1138100398710/1138358094927/Ersatzteile-Foerdertechnik.html

Mischerkonzept

Das Mischerkonzept soll ähnlich dem eines Zwangsmischers funktionieren, welcher in Abbildung 16 zu sehen ist. Auch hier wird wieder der Kompost von Modul zu Modul nach unten transportiert. Der Boden eines Moduls muss natürlich aus Gittern bestehen, um die Luftdurchlässigkeit zu garantieren. Außerdem müssen sich die Gitter nach außen ziehen lassen können, um beim Weitertransport einen Durchlass nach unten zu ermöglichen. Die Durchmischung kann, unabhängig vom Transport in die nächste Etage, erfolgen.

Die Möglichkeit, dass man den Kompost durchmischen kann, ohne ihn dabei weiter zu versetzen, ist der wesentlichste Vorteil dieses Konzeptes, birgt jedoch die Gefahr, dass sich der gesamte Kompost mit dem Mischer mit dreht und sich verheddert.



Abbildung 15: Betonmischer⁴⁷

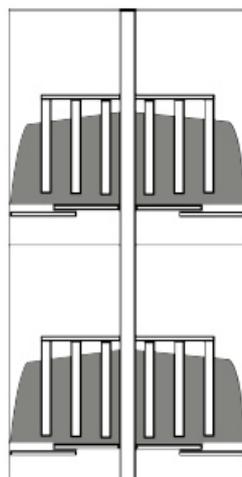


Abbildung 16: Mischerkonzept

⁴⁷ http://www.filamos.de/wp-content/blogs.dir/3/files/michaci-lopatky-standardni/michaci_lopatky_i.jpg

3.3 Bewertung der Konzepte

Das finale Konzept wird anhand der Bewertungen der Projektgruppe ermittelt. Dabei werden 11 Faktoren bei jedem Konzept mit Noten von 1 bis 5 bewertet, wobei 1 die beste Bewertung darstellt. Diese ergeben dann nach der Wertigkeit eine Reihenfolge der Konzepte des jeweiligen Gruppenteilnehmers. Wie in der Tabelle 2 ersichtlich ist, ist das Streuerkonzept klar an erster Stelle, gefolgt vom Mischerkonzept, dem Siebkettenkonzept und dem Mahlkonzept. Dabei können die einzelnen Noten der Tabelle 3 entnommen werden. Hier ist zu erkennen, dass das Streuerkonzept bei Luftdurchlässigkeit, einfache Bauweise, geringe Kosten, Eingreifen in die Anlage möglich, Umbaumöglichkeit, geringe Verstopfungsgefahr, Robustheit, Materialauflockerung und einfachem Betrieb bei fast allen Gruppenteilnehmern relativ gut abgeschnitten hat. Lediglich bei der Möglichkeit, das Material häufig umzusetzen und der Materialdurchmischung hat er nicht punkten können.

Tabelle 2: Gesamtbewertung

Gesamtbewertung	Binner	Engelhart	Peitl	Ponweiser	Pröll	Obkircher	Schulmeister
Streuerkonzept	1	1	2	1	2	1	1
Mischerkonzept	2	4	1	2	1	2	3
Siebkettenkonzept	3	3	3	3	3	3	2
Mahlkonzept	4	2	4	4	4	4	4

Tabelle 3: Bewertungen

Schulnoten	Binner Erwin				Engelhart Klaus				Peitl Michael				Ponweiser Karl				Pröll Tobias				Obkircher Leo			
	Streuerkonzept	Mischerkonzept	Siebkettenkonzept	Mahlkonzept	Streuerkonzept	Mischerkonzept	Siebkettenkonzept	Mahlkonzept	Streuerkonzept	Mischerkonzept	Siebkettenkonzept	Mahlkonzept	Streuerkonzept	Mischerkonzept	Siebkettenkonzept	Mahlkonzept	Streuerkonzept	Mischerkonzept	Siebkettenkonzept	Mahlkonzept	Streuerkonzept	Mischerkonzept	Siebkettenkonzept	Mahlkonzept
Luftdurchlässigkeit	1	2	1	1	1	2	2	2	2	3	1	1	1	4	2	5	2	1	1	2	2	2	3	2
Einfache Bauweise	1	3	2	4	2	2	3	3	1	3	3	3	1	4	3	5	1	2	2	4	2	4	3	2
Kosten gering	1	3	2	3	2	2	3	3	1	3	4	3	2	4	3	5	1	2	2	3	2	4	3	2
Eingreifen in die Anlage möglich	1	3	2	4	1	2	1	3	3	4	4	2	2	5	4	5	2	4	3	2	2	2	2	3
Umbaumöglichkeit	1	3	2	2	2	3	2	3	3	4	5	3	2	4	4	5	2	3	3	2	2	3	2	3
geringe Verstopfungsgefahr	1	3	2	4	1	2	1	2	2	4	3	3	1	4	5	5	1	3	4	2	1	4	1	4
Robustheit	1	3	2	3	1	1	2	3	1	4	2	2	2	4	4	5	1	3	3	2	1	3	1	1
Möglichkeit häufig umzusetzen	5	5	5	1	1	1	1	1	4	4	4	1	4	5	4	1	4	3	3	1	2	1	2	2
Materialdurchmischung	2	3	4	1	1	1	2	1	3	4	4	2	1	4	4	1	4	3	3	1	3	2	3	1
Materialauflockerung	1	2	4	1	3	1	1	3	3	2	3	3	2	4	4	3	2	4	3	1	2	2	3	2
einfacher Betrieb	1	2	5	2	1	3	2	3	2	3	1	3	1	4	3	4	1	3	1	2	1	3	3	2

4 Ausarbeitung Streuerkonzept

In diesem Kapitel erfolgt zunächst die thermodynamische Auslegung. Die wichtigsten Schritte sowie Erkenntnisse aus der Berechnung, welche mit MathCad erfolgte und sich im Anhang befindet, werden angeführt. Im zweiten Abschnitt werden die Stücklisten sowie die Zeichnungen der Streuwelle und des Gesamtzusammenbaues aufgezeigt. Alle anderen Stücklisten und Zeichnungen zum Bau des Versuchsreaktors befinden sich ebenfalls im Anhang.

4.1 Thermodynamische Auslegung

Gesamtkonzept

Wie in Abbildung 17 dargestellt, umfasst das Konzept einen Reaktor auf der linken Seite und einen Wärmetauscher sowie Abscheider und Mischer auf der rechten Seite. Der Reaktor setzt sich aus vier Stufen zusammen. In jeder Stufe verweilt das Rottegut 1 Woche und gibt während des Kompostierprozesses Wärme ab. Danach wird das Rottegut eine Stufe weiter nach unten befördert und dabei durchmischt. Aufgrund der 4 Stufen soll ein nahezu kontinuierlicher Prozess entstehen, welcher "stetig" die gleiche Menge an Wärme abgibt. Die Wärme wird mittels feuchter Luft entzogen. Diese feuchte Luft gelangt vom Reaktor zum Wärmetauscher und erhitzt dort Wasser. Das abgeschiedene Kondensat gelangt größtenteils wieder zurück in den Reaktor, um ein „Austrocknen“ des Rottegutes zu verhindern. Danach wird die feuchte Luft mit neuer Umgebungsluft vermengt, da im Kompostierprozess Sauerstoff verbraucht wird, beziehungsweise Kohlendioxid entsteht und sich dadurch der Gehalt in der Reaktorluft ändert. Die vermengte Luft gelangt wieder zurück in den Reaktor, wodurch ein Kreislauf entsteht. Durch den Kaminzugeffekt bildet sich ein Naturluftzug, damit kein Ventilator gebraucht wird.

Das ausgeschiedene Rottegut muss noch weiter kompostiert werden, um Kompost mit hohen Humin- und Nährstoffen zu erhalten. In dieser Phase ist die durch Mikroorganismen freigesetzte Wärme gering, und die Prozessdauer lang, weshalb dies außerhalb des Reaktors ohne Wärmenutzung auf Dreiecksmieten, wie in bestehenden Anlagen, erfolgt.

Kapitel 4: Ausarbeitung Streuerkonzept

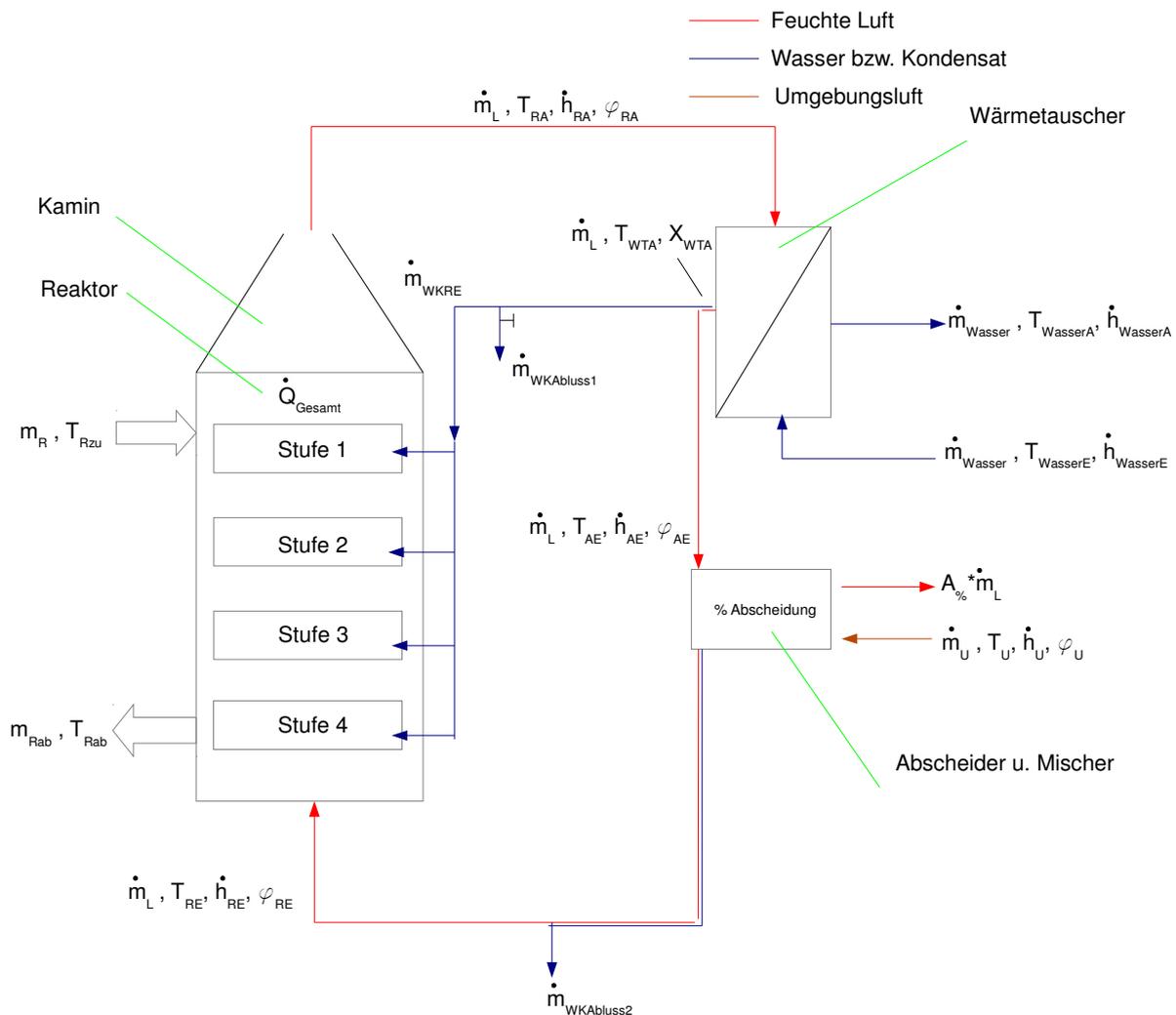


Abbildung 17: Gesamtkonzept

Enthalpie

Die im Prozess umgewandelte Enthalpie wird durch Modellierung von Glucose abgeschätzt (A.1). Die Abbauraten des biologisch verfügbaren Kohlenstoffes beim Rotteprozess sind in der Tabelle 1 beziehungsweise Abbildung 18 zu finden. Der durchschnittliche biologische Kohlenstoffgehalt vom Ausgangsmaterial für die Kompostierung beträgt rund 33 % der Trockenmasse (TM). Dies ergaben Messungen der BOKU. Mittels dieser Zahlen, der Molmasse von Kohlenstoff $M_{\delta C} = 72 \text{ g/mol}$ sowie der entstehenden Enthalpie $h_{Gl} = 2880 \text{ kJ/mol}$ bei Glucose wird die entstehende Enthalpie im Reaktor sowie in den einzelnen Stufen abgeschätzt (4.2.1).

Dies ergibt für den gesamten Rotteprozess, welcher im gegenständlichen Fall 4 Wochen dauert, eine umgewandelte Enthalpie pro kg TM mit $\xi_{C\text{AbbauGesamt}} = 0,33 \cdot 0,42 = 13,8 \%$ von $5,5 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$. Die Werte für den einzelnen Rotteabschnitt (Stufen) sind in Tabelle 4 ersichtlich. Dabei wird angenommen, dass der Rotteprozess im Reaktor analog zur schematischen Darstellung in Abbildung 18 abläuft. Im jeweiligen Einzelfall (Materialzusammensetzung, Rottebedingungen) sind daher deutliche Abweichungen von den Werten sowie errechneten Ergebnissen möglich.

$$h_{Gl_n} = \frac{\xi_{C_{Abbau_n}}}{M_{6C}} h_{Gl} \quad (4.2.1)$$

Tabelle 4: Enthalpie der Stufen (A.17-A.21)

	$\xi_{C_{Abbau_n}}$	h_{Gl_n} [J/kg TM]
Stufe 1	4,95%	$2 \cdot 10^6$
Stufe 2	1,65%	$6,6 \cdot 10^5$
Stufe 3	4,29%	$1,8 \cdot 10^6$
Stufe 4	2,97%	$1,2 \cdot 10^6$
Gesamt	13,86%	$5,5 \cdot 10^6$

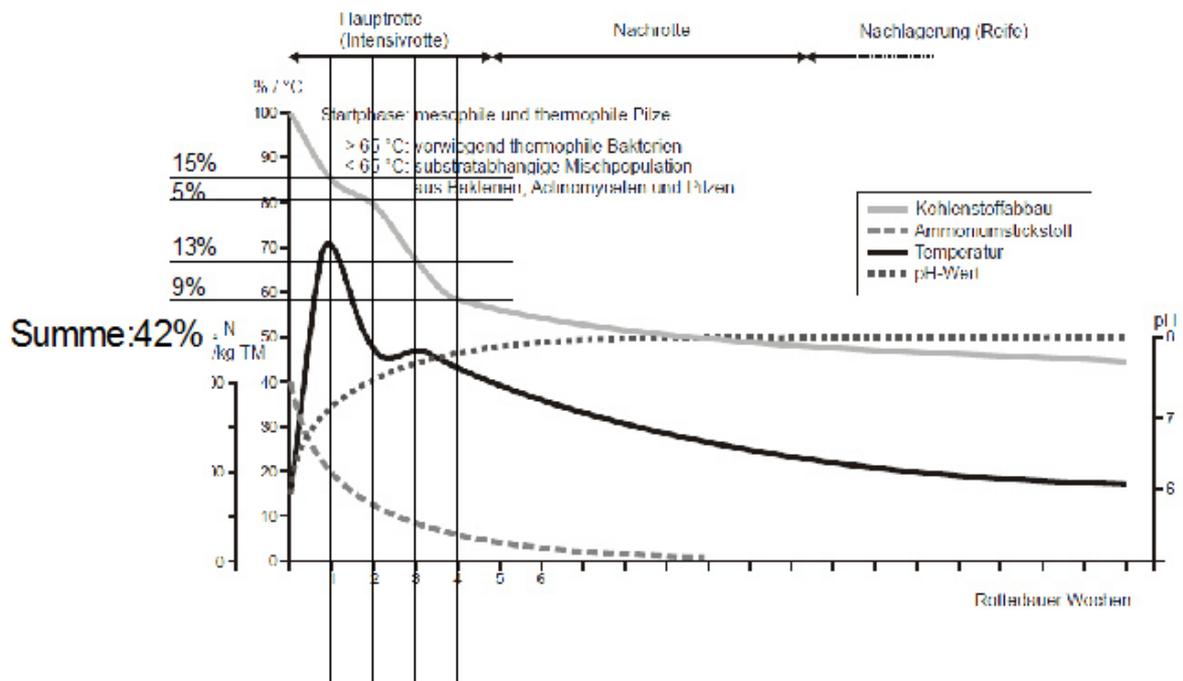


Abbildung 18: Kohlenstoffabbauraten

Würden im Reaktor 50 % des (abbaubaren) Inputkohlenstoffes abgebaut, würden $6,6 \cdot 10^6$ J/kg (A.23) frei werden. Dies würde aber laut Abbildung 18 erheblich mehr Zeit benötigen und brächte im Gegensatz zu den 4 Wochen nur rund 19 % mehr Energieausbeute. Außerdem würde ein Forcieren des Abbaus die Kompostqualität nachteilig beeinflussen. Ziel der Kompostierung ist nicht Mineralisierung (Umwandlung von organischer Substanz in CO_2 , H_2O und Wärme), sondern ein Erhalt (Umwandlung) der ursprünglich leicht abbaubaren organischen Substanz durch Humifizierung in stabile organische Substanz.

Stoffanalyse

Beim Rotteprozess, welchem Sauerstoff zugefügt werden muss, entstehen unter anderem Kohlendioxid, Wasser und Wärme. Durch die Abbauraten des Kohlenstoffes, der Molmasse M_{6C} und den jeweiligen Molmassen M_Y bei der Glucose (A.27-A.29) werden die einzelnen Werte wie folgt ermittelt:

$$\xi_{Y_Abbau_n} = \frac{\xi_{CAbbau_n}}{M_{6C}} M_Y \quad (4.2.2)$$

Dies ergibt folgende Werte:

Tabelle 5: Stoffanalyse (A.30-A.49)

	[kg / kg TM]			
	$\xi_{C_6H_{12}O_6Abbau_n}$	$\xi_{O_2Abbau_n}$	$\xi_{CO_2Frei_n}$	$\xi_{H_2OFrei_n}$
Stufe 1	0,12	0,13	0,18	0,07
Stufe 2	0,4	0,04	0,06	0,03
Stufe 3	0,11	0,11	0,16	0,06
Stufe 4	0,7	0,07	0,11	0,05
Gesamt	0,34	0,37	0,51	0,21

Betrachtung des Wasserhaushaltes

Aus dem gebildeten Wasser und der Abnahme der Trockenmasse wird die erforderliche Menge an Wasser berechnet, welche aus dem Reaktor ausgetragen werden muss, damit der Wasseranteil konstant bleibt. Die zugegebene Trockenmasse m_K an Rottegut beträgt 700 kg pro Woche. Die nach dem Prozess zur Verfügung stehende Trockenmasse kann mit der Gesamtabbauraten (A.34) errechnet werden. Es wird ein konstanter Wassergehalt der FM x_W von 50 % veranschlagt. (Der optimale Wassergehalt nimmt mit zunehmender Rottedauer ab. Über 4 Wochen kann aber näherungsweise ein konstanter Wassergehalt angenommen werden.) Dadurch ergibt sich die überschüssige Wassermenge, welche ausgetragen werden muss, zu:

$$m_{W\Delta} = m_R \frac{1}{\frac{1}{x} - 1} + m_R \xi_{6H_2OFreiGesamt} - m_R (1 - \xi_{C_6H_{12}O_6AbbauGesamt}) \frac{1}{\frac{1}{x} - 1} = 388kg \quad (4.2.3)$$

Der auszutragende Wassermassenstrom errechnet sich durch die Division von (4.2.3) durch Δt . Wobei Δt 1 Woche beträgt, da der Reaktor aus vier Stufen besteht.

$$\dot{m}_{w\Delta} = \frac{m_{w\Delta}}{\Delta t} = 6,4 \times 10^{-4} \frac{kg}{s} \quad (4.2.4)$$

Entstehende Wärmemenge

Es wird angenommen, dass das Rottegut mit einer Umgebungstemperatur von 15 °C (Mittelwert) in den Reaktor gelangt. Die mittlere Temperatur beim Auswerfen ergibt sich aus der Temperatur der Ober- sowie Unterseite des Rottegutes an der 4. Stufe und beträgt rund 40 °C (A.62). Aus der spezifischen Wärmekapazität c_{pR} des Rottegutes von $2,7 \cdot 10^3$ J/kgK (A.57) und der umgewandelten Enthalpie (Tabelle 4) ergibt sich der entstehende Wärmestrom zu

$$\dot{Q}_{Gesamt} = \frac{m_R h_{RottegutGesamt}}{\Delta t} + \frac{\frac{m_R}{1-x_W} c_{pR} (T_{Rzu} - T_{Tr})}{\Delta t} - \frac{\frac{m_{Rab}}{1-x_W} c_{pR} (T_{Rab} - T_{Tr})}{\Delta t} = 6,3 \times 10^3 \frac{J}{s} \quad (4.2.5)$$

wobei in der gesamten Berechnung als Nullpunkt der Tripelpunkt des Wassers angenommen wurde.

Luftmassenstrom

Im Reaktor wird ein konstanter Druck von 1 bar angenommen. Die relative Luftfeuchtigkeit beträgt stets 100 %. Die Temperatur der Luft beim Eingang beträgt 37,5 °C und beim Ausgang 53,9 °C. Diese Werte wurden in der Berechnung durch Iterieren ermittelt. Das Kondensat gelangt mit einer Temperatur von 40 °C vom Wärmetauscher wieder zurück in den Reaktor, wobei eine gewisse Menge Kondensat, aufgrund des entstehenden Wassers bzw. der abnehmenden Kompostmenge, abgeschieden werden muss. Die Berechnungsgrundlagen der Bilanz sind in Abbildung 19 ersichtlich.

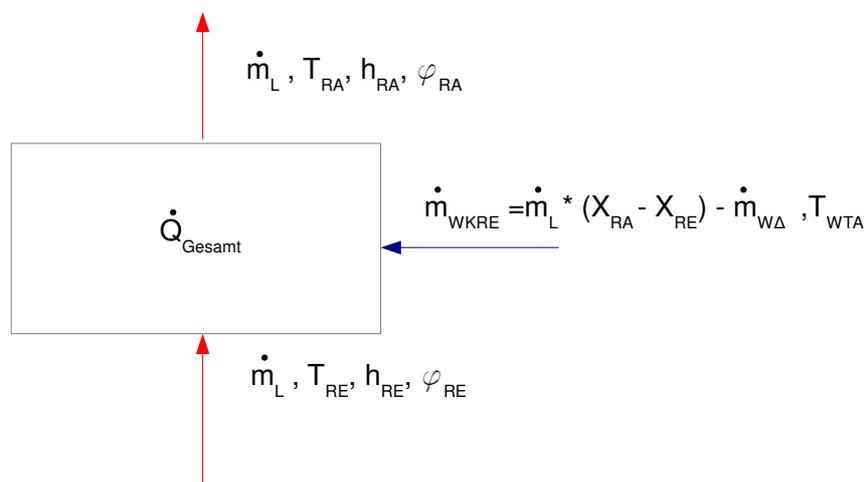


Abbildung 19: Luftmassenstrom

Die Menge an zurückgeleitetem Kondensat ergibt sich aus dem Massenstrom des Wassers, welche durch die feuchte Luft aus dem Reaktor ausgetragen wird, minus des Wassermassenstroms $\dot{m}_{w\Delta}$. Aufgrund der Bilanzgleichung ergibt sich der Luftmassenstrom zu

$$\dot{m}_L = \frac{\dot{Q}_{Gesamt} - \dot{m}_{w\Delta} c_{pWasser} (T_{WTA} - T_{Tr})}{h_{RA} - h_{RE} - (T_{WTA} - T_{Tr}) c_{pWasser} (X(T_{RA}, p, \varphi_R) - X(T_{RE}, p, \varphi_R))} = 0,035 \frac{kg}{s} \quad (4.2.6)$$

Der Massenstrom des Kondensats, welcher nach dem Wärmetauscher zur Verfügung steht und sich aus der absoluten Feuchte ergibt, beträgt $2,08 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$ (A.86) und ist damit höher als \dot{m}_{wKRE} mit $1,66 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$ (A.87). Somit steht genügend Kondensat zur Rückführung zur Verfügung. Dem Prozess muss daher kein Wasser zusätzlich beigemischt werden.

Kohlendioxid- und Sauerstoffgehalt der Reaktorluft

Im Kompostierprozess wird Kohlendioxid erzeugt, welches unter anderem Sauerstoff benötigt. Deshalb muss der zirkulierenden Luft auch immer wieder neue sauerstoffreiche Umgebungsluft (Zuluft) zugemischt werden. Eine der Zuluft entsprechende Menge an Abluft muss aus dem System ausgetragen werden.

Der Kreislauf für Kohlendioxid sieht wie folgt aus:

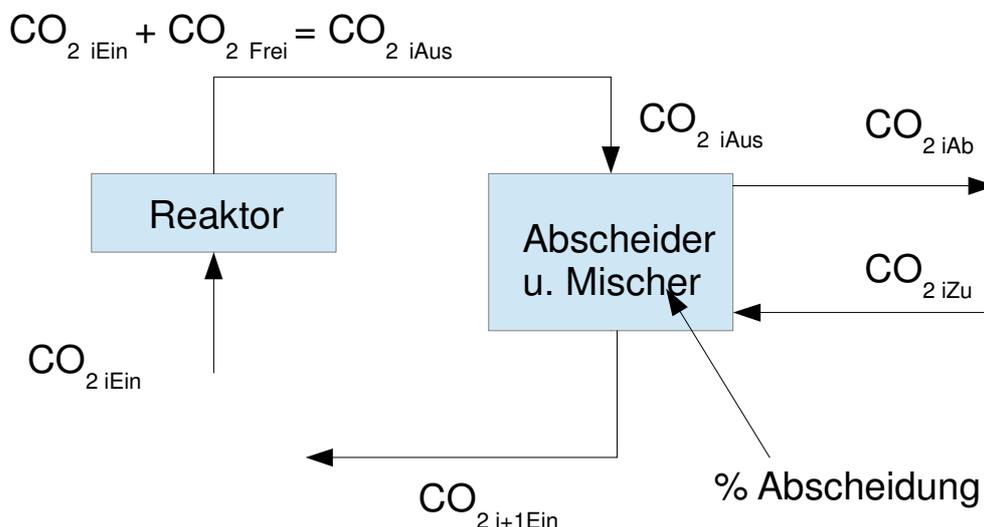


Abbildung 20: Kreislauf Kohlendioxid

In der Umgebungsluft wird der Kohlendioxidmassenanteil ξ_{CO_2U} mit einem Standardwert von 0,058% angenommen. Das freiwerdende Kohlendioxid beträgt

$$\dot{m}_{6CO_2Frei} = m_R \frac{\xi_{6CO_2AbbauGesamt}}{\Delta t} = 5,9 \times 10^{-4} \frac{kg}{s} \quad (4.2.7)$$

Kapitel 4: Ausarbeitung Streuerkonzept

Mit 15 % Abscheidung und einem Startwert des Kohlendioxid $\dot{m}_{6CO_2_0} = 2 \times 10^{-5} \frac{kg}{s}$ (A.92) und der Formel zur Errechnung

$$\dot{m}_{6CO_2_n} = (\dot{m}_{6CO_2_{n-1}} + \dot{m}_{6CO_2_{Frei}}) (1 - A_{\%}) + (\xi_{CO_2U} \dot{m}_L A_{\%}) \quad (4.2.8)$$

ergibt sich ein sich einstellender Massenanteil an Kohlendioxid von rund 9,6 % (A.96).

Eine ähnliche Berechnung gilt für die Ermittlung des Sauerstoffgehaltes der zirkulierenden Reaktorluft (A.97-A.100). Dieser beträgt 16,2 % (A.101). Bei 15 % Abscheidung ist noch genügend Sauerstoff und nicht zuviel Kohlendioxid in der zirkulierenden Luft für den Kompostierprozess vorhanden.

Einzelne Parameter der Stufen im Reaktor

Um die einzelnen Parameter in den Stufen zu errechnen, muss iteriert werden, da einerseits die Eingangstemperatur der Luft sich aus der vorherigen Stufe ergibt, andererseits aber das Rottegut mit einer bestimmten Temperatur von oben nach unten befördert wird.

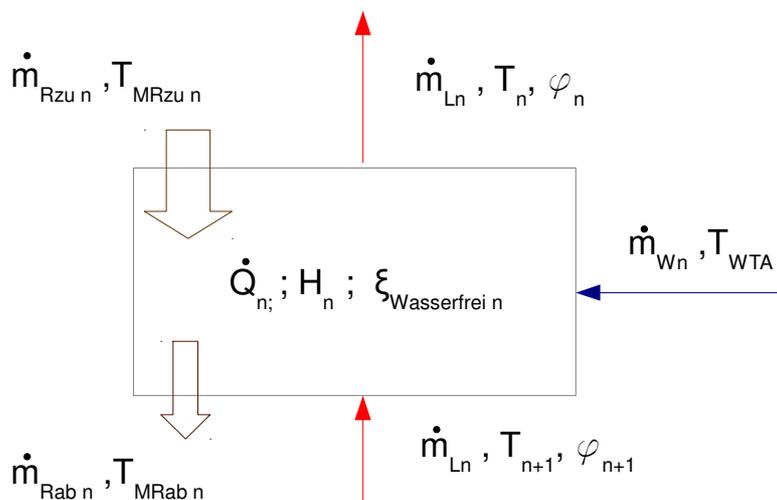


Abbildung 21: Stufe n

Es wird für jede Stufe die sich einstellenden Temperaturen an der Ober- bzw. Unterseite des Kompostes mittels Luftmassenstrom (A.104) und Wärmemenge (A.103) iteriert sowie das benötigte Kondensat ermittelt. Diese einzelnen Ergebnisse sind in Tabelle 6 ersichtlich.

Tabelle 6: Paramter der Stufen

	T_n [°C]	T_{n+1} [°C]	$m_{R_{zu_n}}$ [kg]	$m_{R_{ab_n}}$ [kg]	\dot{Q}_n [W]	\dot{m}_{W_n} [kg/s]
Stufe 1	53,9	49,8	700	613	$2,1 \cdot 10^3$	$5,5 \cdot 10^{-4}$
Stufe 2	49,8	48,0	613	584	$0,8 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
Stufe 3	48,0	42,5	584	509	$2 \cdot 10^3$	$5,4 \cdot 10^{-4}$
Stufe 4	42,5	37,5	509	457	$1,4 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^{-4}$

Gegenstromwärmetauscher

Der Gegenstromwärmetauscher kühlt die feuchte Luft von 53,9 °C auf 40 °C ab und erwärmt dabei Wasser von 30 auf 40 °C. Der Wassermassenstrom dafür beträgt 0,134 kg/s. Bestünde der Gegenstromwärmetauscher aus einem Schlangenkühler, welcher einen Wärmedurchgangskoeffizienten von 60 W/m²K aufweisen würde (VDI 2013, 3.7), bräuchte der Wärmetauscher rund 8 m² Fläche. Dies ist beträchtlich hoch, da der Wärmetauscher einen geringen Wärmedurchgangskoeffizienten hat und auch die Temperaturunterschiede gering sind. Weitergehende Untersuchungen zum Wärmetauscher finden in dieser Masterarbeit nicht statt.

Das ausgeschiedene Kondensat, welches durch das Kühlen der Luft frei wird, wird zum Teil wieder zurück in den Reaktor geleitet. (A.86)

Für die Luft, die vor dem Mischer abgeschieden wird, wurde auch ein Wärmetauscher angedacht. Dieser würde das Wasser um nur 0,5 ° C erwärmen. Dieser wird aber im Konzept nicht eingesetzt.

Abscheider und Mischer

Beim Abscheider werden 15 % der Luft abgeschieden, um danach die zirkulierende Luft mit der gleichen Menge an neuer Umgebungsluft anzureichern. Die Umgebungsluft kommt mit 15 °C und 80 % Luftfeuchte in den Kreislauf. Beim Mischen wird Kondensat ausgeschieden, wie an der Verbindungsgeraden in Abbildung 22 am h,x-Diagramm zu sehen ist. Die sich einstellende Temperatur wird durch die Enthalpiebilanz (2.19) des Mischvorganges und der übersättigten feuchten Luft (2.22) angenähert. Die daraus ermittelte Temperatur ist gleich der Temperatur der Luft, welche in den Reaktor hineingeht und beträgt 37,5°C. In Abbildung 22 ist das h,x Diagramm zu sehen.

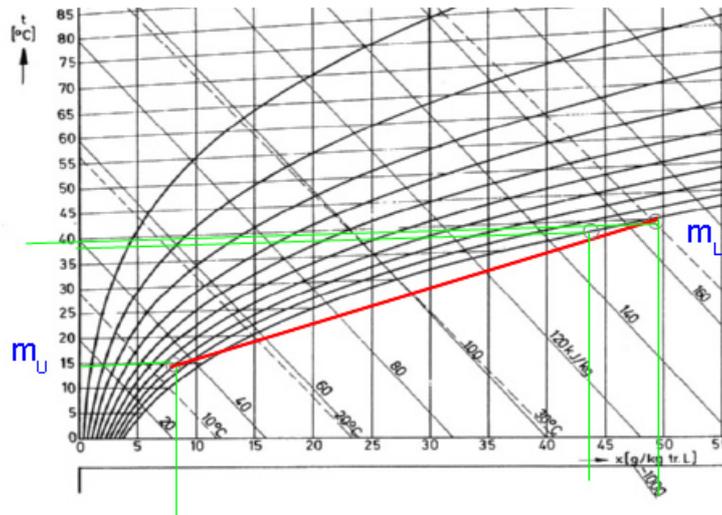


Abbildung 22: h,x-Diagramm Mischer

Druckverlust der Schüttung

Für die Berechnung des Druckverlustes der durchströmten Schüttung wird als Medium mit Split und mit Quarzsand gerechnet, da es für Rottegut keine Werte in der Literatur gibt. Der Sauterdurchmesser d_p , die Porosität ψ_D sowie der Druckverlustformfaktor ϕ_D sind in Tabelle 7 für Split und Quarzsand ersichtlich. Die Fläche des Reaktors wird mit $2,5 \text{ m}^2$ angenommen. Mit dem Luftmassenstrom ergibt sich eine erforderliche Geschwindigkeit beim Reaktoreingang von $0,013 \text{ m/s}$.

Tabelle 7: Werte Quarzsand und Split

	d_p [mm]	ψ_D	ϕ_D
Split	6,4	0,47	0,52
Quarzsand	2,3	0,395	0,74

Die Reynolds-Zahl (A.195, A.196) sowie die Eulerzahl(2.34-2.38) ergeben:

Tabelle 8: Reynolds und Eulerzahl

	Re	Eu
Split	118	23,6
Quarzsand	50	21,4

Der Druckverlust der Schüttung errechnet sich aus folgender Formel:

$$\Delta p_{\text{Schüttung}}(L, \rho_F, v_L, d_p, \psi, Eu) = L \frac{3}{4} \rho_F v_L^2 \frac{1}{d_p} \frac{1-\psi}{\psi^2} Eu \quad (4.2.9)$$

Kapitel 4: Ausarbeitung Streuerkonzept

Die Schütthöhe L wird mit angenommenen Dichten sowie den Anfangsmassen in jeder Stufe errechnet. Dadurch ergibt sich eine Gesamtschütthöhe von 3,21 m. Der Druckverlust der durchströmten Schüttung bei Split beträgt 3,8 Pa und bei Quarzsand 15,4 Pa. Der benötigte Druckunterschied ist gleich dem Druckverlust der Schüttung, da die Geschwindigkeiten gering sind.

$$\Delta p = \left(\sum \rho_{M_i} z_i g \right)_{\text{Kühlseite}} - \left(\sum \rho_{M_i} z_i g \right)_{\text{Reaktorseite}} \quad (4.2.10)$$

Die Kaminhöhe, welche sich aus dem erforderlichen Druckunterschied errechnet (4.2.10), ergibt für Quarzsand rund 17m und für Split rund 3m(A.221, A.230). Dann wäre der Druckunterschied zwischen Reaktorseite und Wärmetauscherseite groß genug, um einen Naturluftzug zu ermöglichen. Beachtet wurden hier nur die Druckverluste der Schüttungen, nicht anderer Komponenten. Da es auch hier schon große Unterschiede zwischen Quarzsand und Split gibt, muss der reale Druckverlust durch Feldversuche ermittelt werden.

Gesamtübersicht

In der Gesamtübersicht (Abb. 23) sind nochmals alle Ströme, Temperaturen und Wassergehalte aufgezeichnet. Kurz zusammengefasst ergeben sich folgende Kenngrößen: 700 kg TM Input pro Woche erwärmen 0,038kg/s zirkulierende feuchte Luft von 37,5 °C auf 53,9 °C. Diese feuchte Luft erwärmt danach in einem Gegenstromwärmetauscher Wasser mit 0,134 kg/s von 30 auf 40 °C. Das abgeschiedene Kondensat wird zum größten Teil wieder zurück in den Reaktor geleitet. Danach wird die zirkulierende feuchte Luft noch mit 15 % frischer Luft angereichert, um den Sauerstoffverbrauch zu ersetzen sowie das entstehende Kohlendioxid aus dem Kreislauf zu entfernen.

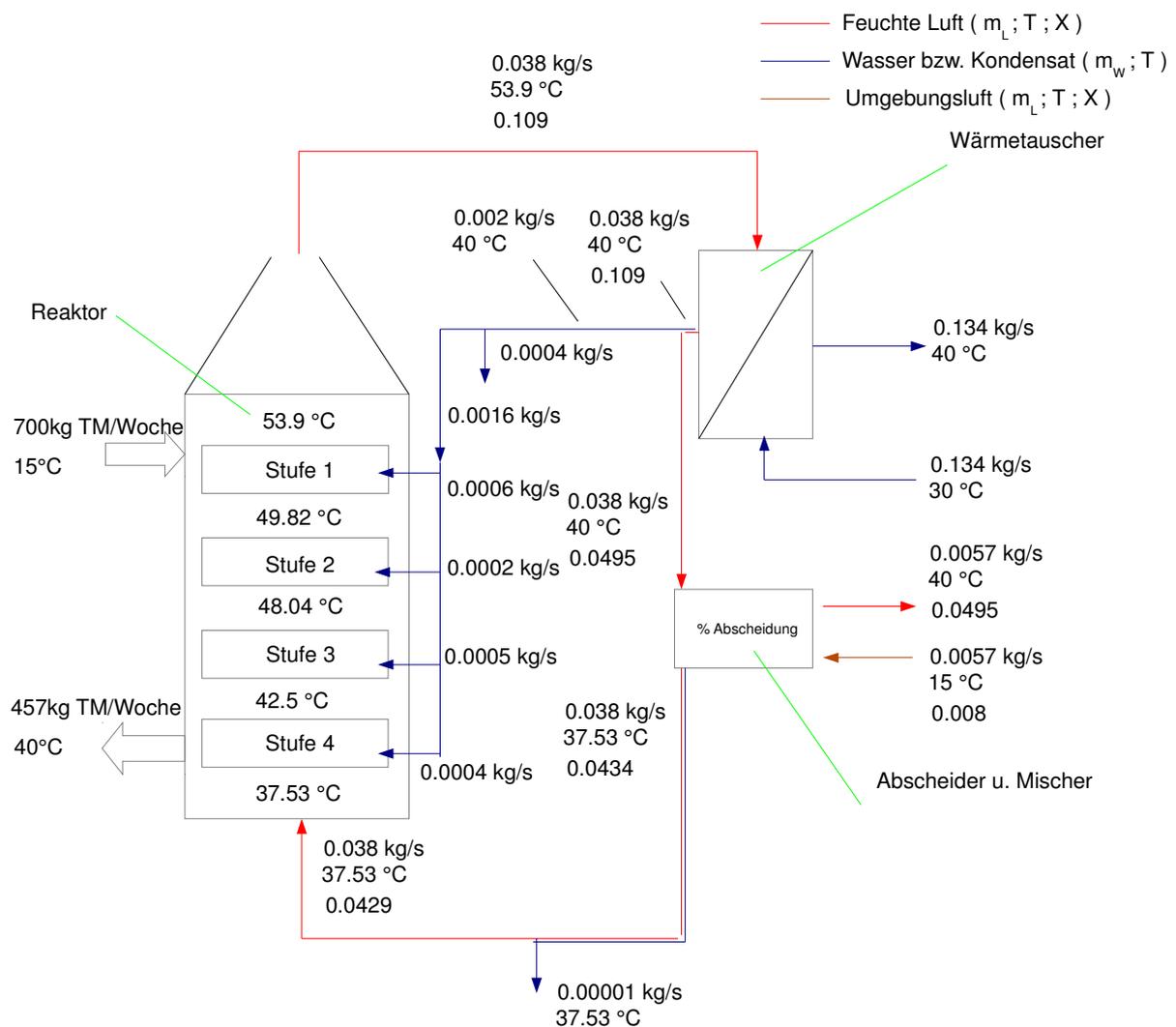


Abbildung 23: Gesamtübersicht

h,x-Diagramm

Im h,x-Diagramm (Abb.24) ist der Prozess der zirkulierenden Luft eingezeichnet. Als erstes wird Luft im Reaktor von Punkt 1 bei 37,5°C mit 100 % Luftfeuchtigkeit auf 53,9°C erwärmt. Dabei nimmt sie laut Annahme immer gleich das Wasser aus dem Reaktor auf, sodass immer 100 % Luftfeuchtigkeit vorhanden ist. Dadurch bewegt sich die Linie an der 100 % Marke im Diagramm. Danach wird die Luft auf 40°C abgekühlt, das ausgeschiedene Kondensat kann an der Abszissenachse abgelesen werden. Danach wird 85 % der feuchten Luft am Punkt 3 mit 15 % frischer Umgebungsluft am Punkt 4 gemischt, wobei sich wieder die Eingangstemperatur (37,5 °C) und 100 % Luftfeuchte beim Reaktoreingang einstellen. Das abgeschiedene Kondensat kann mittels der Werte an der Abszisse berechnet werden.

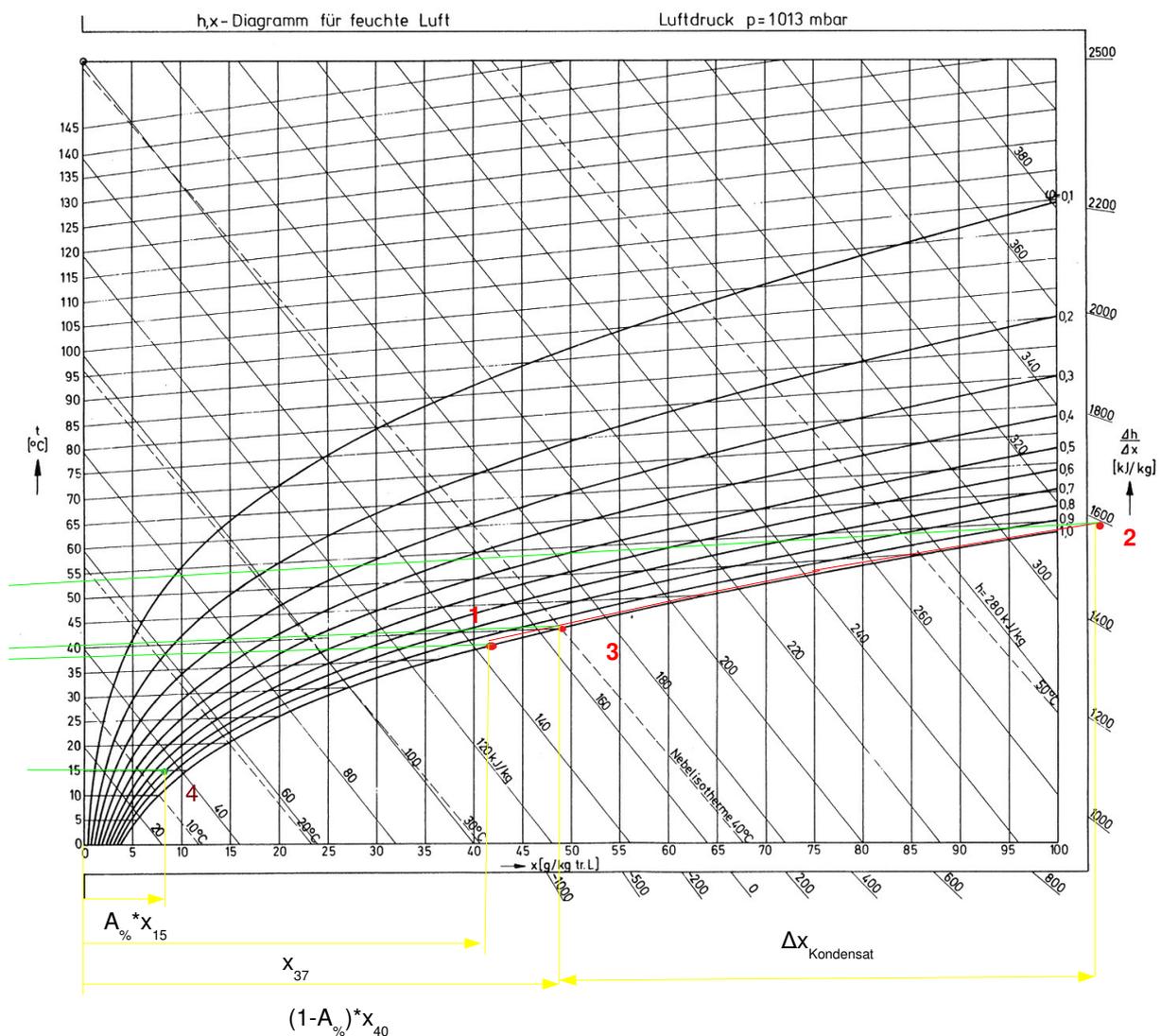


Abbildung 24: h,x-Diagramm feuchte Luft

Übersicht der Enthalpie

In Abbildung 25 wurde, zur besseren Übersicht, das Rottegut als kontinuierlicher Strom abgebildet. Dabei wird mittels Rottegut dem System ein Gesamtenergiestrom, welche aus der inneren Energie durch den Kohlenstoffgehalt und der Wärme besteht, von 15 kW zugeführt. Dem Rottegut wird 6 kW Wärmestrom entzogen und es verlässt den Reaktor wieder mit weniger Masse aber erhöhter Wärmemenge. Davon werden $5,6 \text{ kW}$ zur Erwärmung des Wassers genutzt. Dies entspricht $4,8 \cdot 10^6 \text{ J/kg TM}$. Bezogen auf die Gesamtinputenergie des Rottegutes ergeben sich rund 37% . Verloren geht Energie einerseits durch das Rottegut, welches den Reaktor verlässt, durch das Kondensat (mit 69 W und $2,5 \text{ W}$) und andererseits durch die Differenz von abgeschiedener und wieder zugeführter Luft (mit 684 W). Bei dieser Bilanz sind andere Verluste wie z.B. Wärmeabgabe an die Umgebung vernachlässigt.

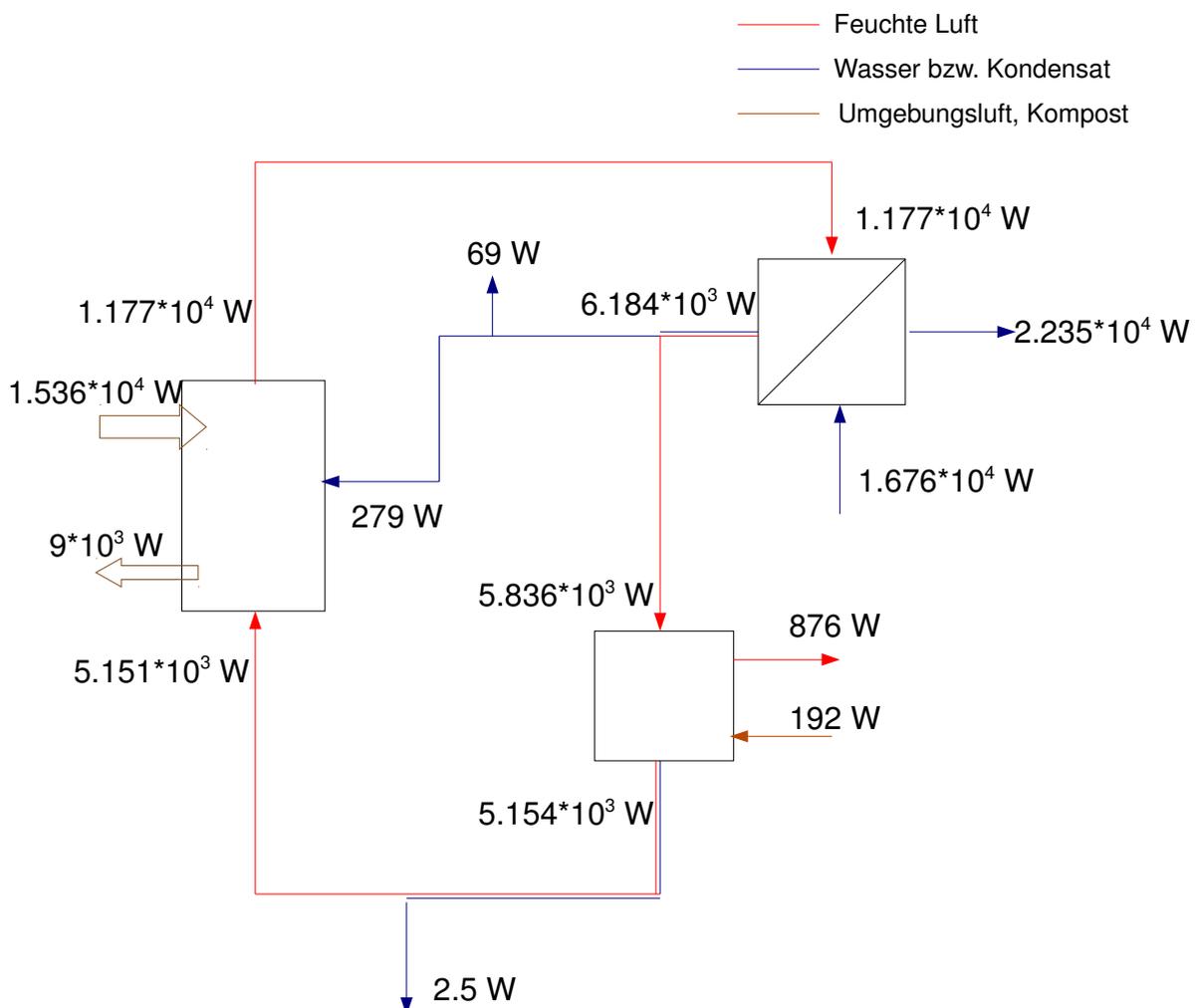


Abbildung 25: Enthalpieströme

4.2 Versuchsreaktor: Zeichnungen und Stückliste

Der Versuchsreaktor besteht aus zwei vertikal zusammengesetzten Modulen (nicht wie später geplanten 4 Modulen), an denen zunächst das Umsetzen, die Durchmischung, das Auflockern, die Verstopfung, die Luftdurchlässigkeit und der Kraftaufwand für das Umsetzen getestet werden können.

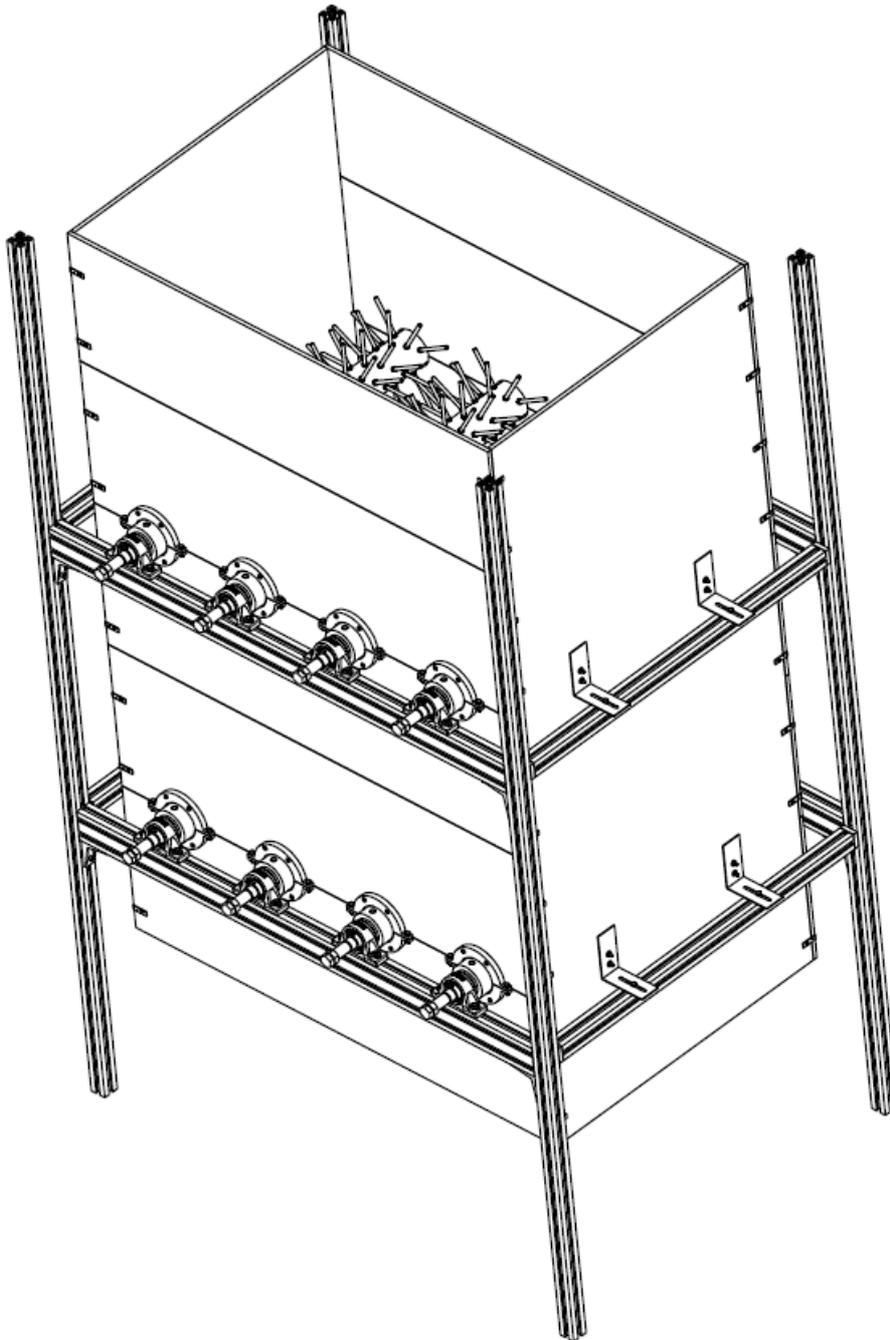


Abbildung 26: Versuchsreaktor

Kapitel 4: Ausarbeitung Streuerkonzept

Im folgenden Abschnitt sind die Zeichnungen Baugruppe B2, Streuwelle 4, Baugruppe B3 , Baugruppe B5 und der Gesamtzusammenbau B6 mit den dazugehörigen Stücklisten zu finden. Die restlichen Zeichnungen sowie Stücklisten befinden sich im Anhang. Eine Übersicht der Zeichnungen ist in Tabelle 9 zu finden. Darin sind alle Zeichnungstitel sowie deren Zeichnungsnummer aufgelistet.

Tabelle 9: Zeichnungs-Verzeichnis

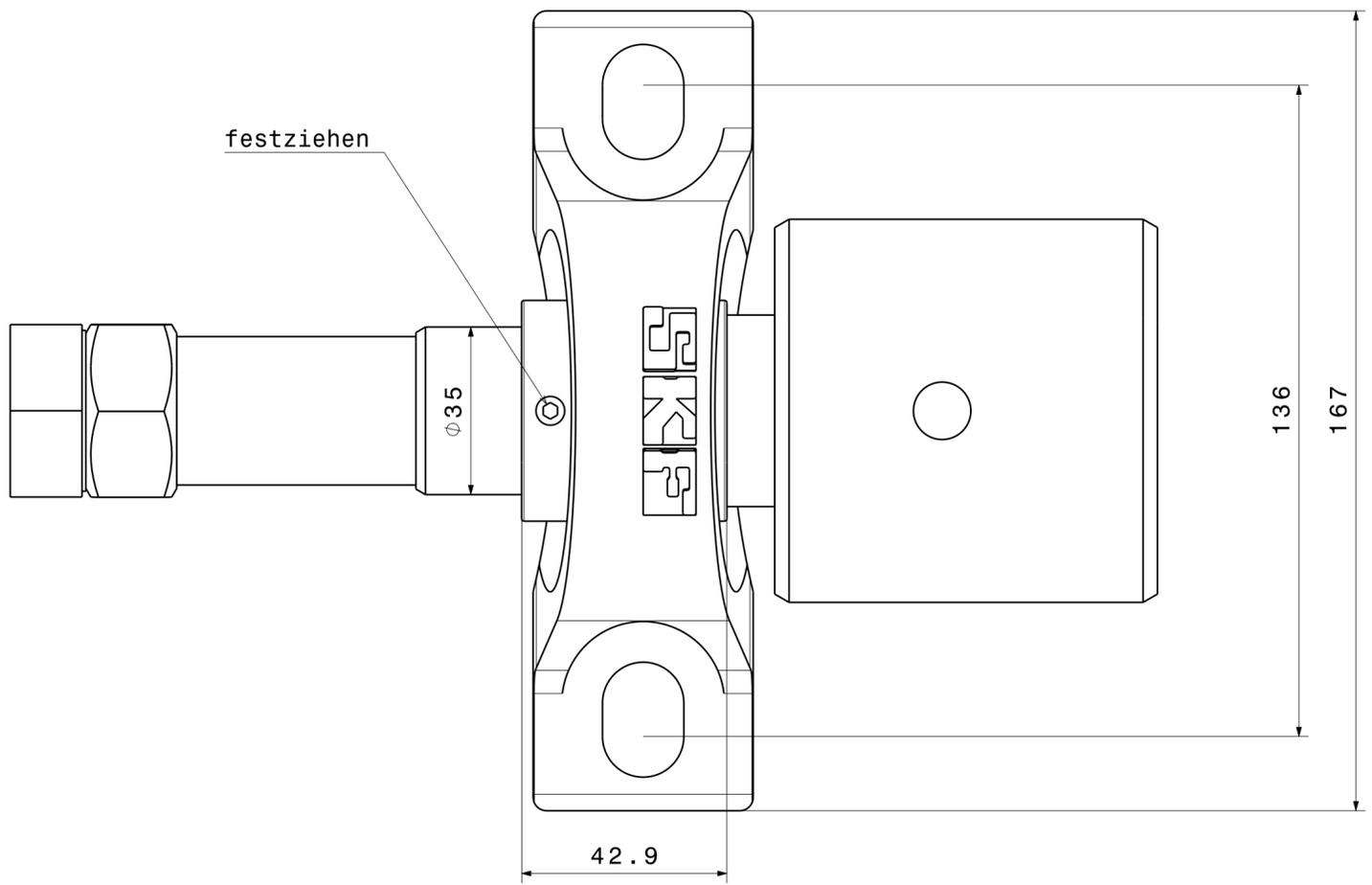
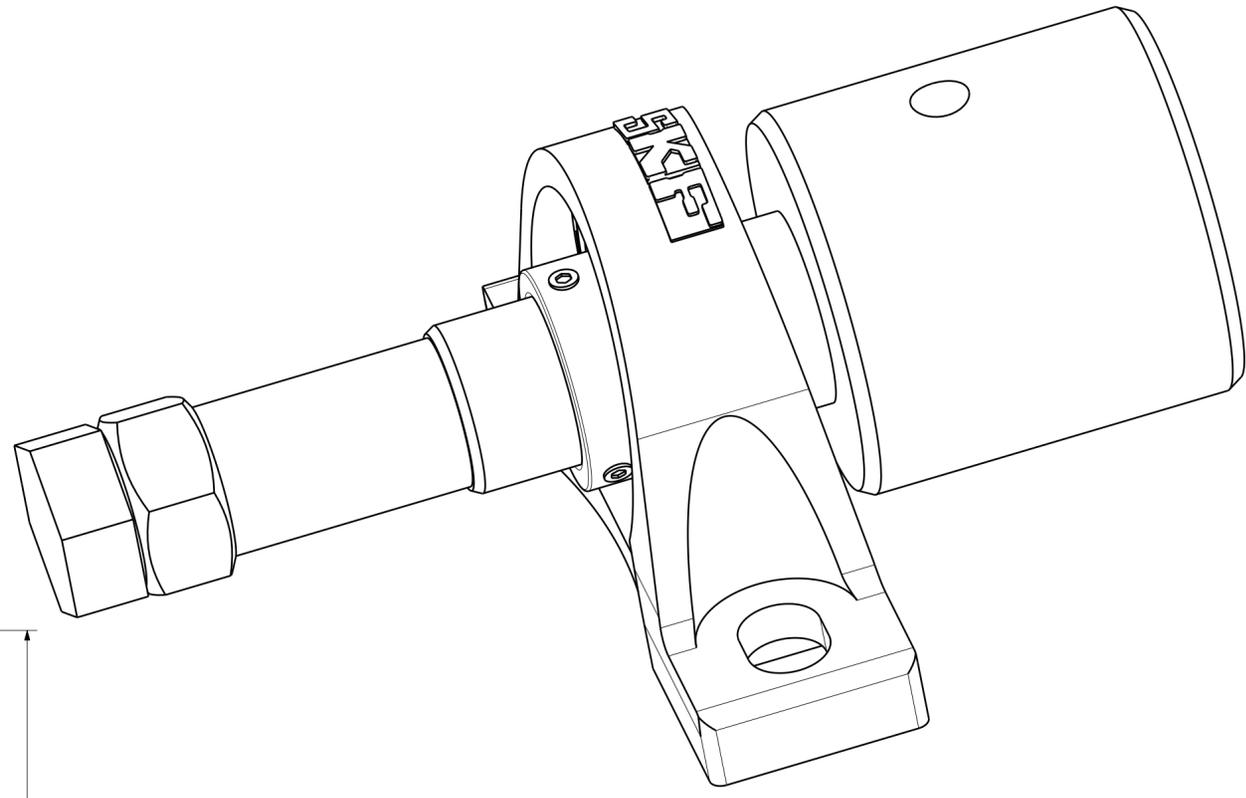
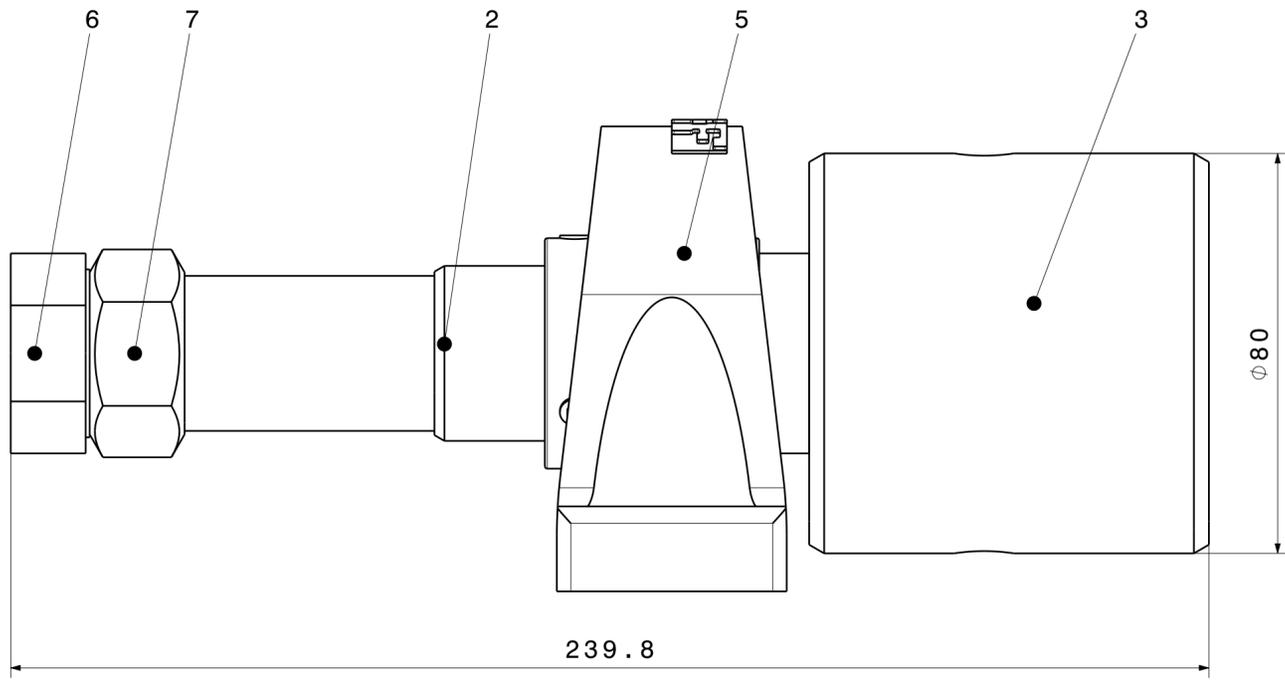
Nr.	Zeichnungstitel	Zeichnungsnummer
1	Welle Frei	1
2	Welle Antrieb	2
3	Kupplungsscheibe	3
4	Streuwelle	4
5	Platte Front	5
6	Platte Seite	6
7	Platte Front 2	7
8	Abdichtungsring	8
9	Baugruppe 1 (B1)	B1
10	Baugruppe 2 (B2)	B2
11	Baugruppe 3 (B3)	B3
12	Baugruppe 4 (B4)	B4
13	Baugruppe 5 (B5)	B5
14	Zusammenbau	B6

Kapitel 4: Ausarbeitung Streuerkonzept

In der Baugruppe 2 sind mit den Teilnummern sechs beziehungsweise sieben der Antrieb der Welle zu sehen. An der Schraube kann mittels eines Drehmomentschlüssels die Welle gedreht und dabei die nötige Umsetzkraft gemessen werden.

Zeichnungstitel:	Baugruppe 2 (B2)
Zeichnungsnummer:	B2

Teilenummer	Menge	Einheit	Bezeichnung	Norm	Abmessungen	Werkstoff	Bemerkung	Firma	Bestellnummer
2	1	Stk	Welle Antrieb			E335			
3	1	Stk	Kupplungsscheibe			POM			
5	1	Stk	Kugellager SKF 25					SK F	SYJ 25 TF
6	1	Stk	Sechskantschraube M24x40	EN ISO 4017		8.8			
7	1	Stk	Sechskantmutter M24	ISO 7414		8			



Zusammenbau		DASSAULT SYSTEMES			
DRAWN BY Peitl Michael		DATE 30.04.2014		DRAWING TITLE Baugruppe 2 (B2)	
CHECKED BY		DATE		SIZE A2	
DESIGNED BY		DATE		DRAWING NUMBER B 2	
		SCALE 1:1		WEIGHT(kg)	
		SHEET 1/1			

Kapitel 4: Ausarbeitung Streuerkonzept

In Zeichnung 4 ist die Streuwelle dargestellt. Der Werkstoff der Streuwelle ist POM, um ein Rosten zu verhindern. Mit der verschiedenen Anordnung der Löcher für die Gewindestangen, welche das Material weiter befördern, kann der Abstand der Gewindestangen variiert werden, indem gewisse Stangen nicht eingesetzt werden.

Zeichnungstitel:	Streu- welle
Zeichnungsnummer:	4

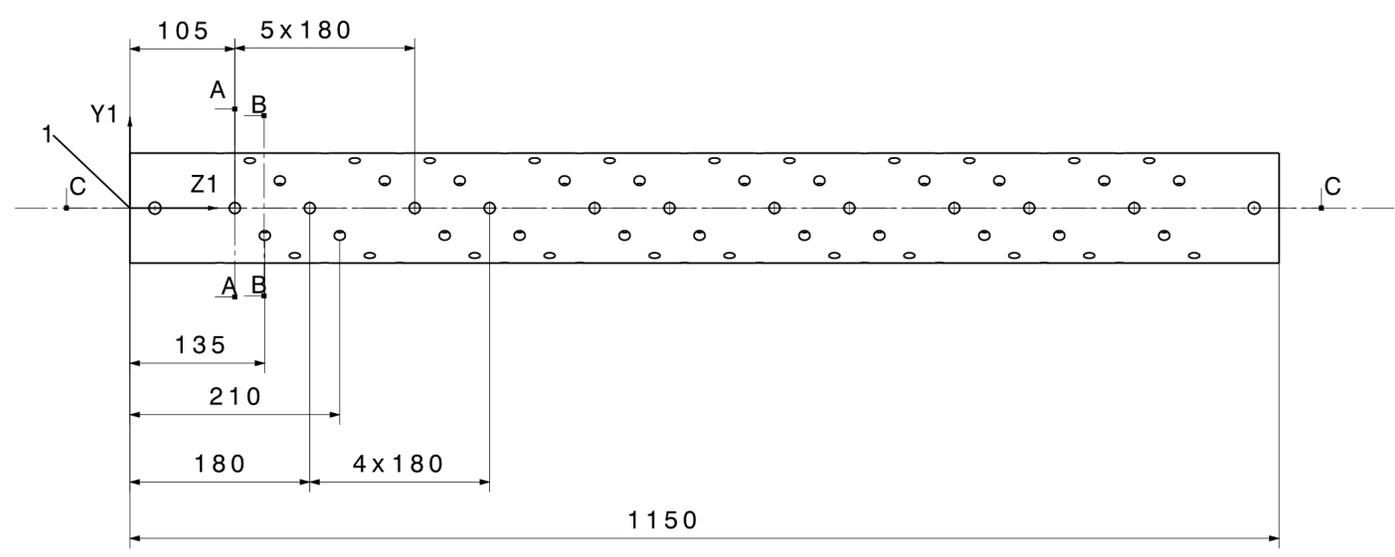
Teile- nummer	Men- ge	Ein- heit	Bezeich- nung	Nor- m	Abmes- sungen	Werk- stoff	Bemer- kung	Fir- ma	Bestell- nummer
8	1	Stk	Streu- welle			POM			

H G F E D C B A

8
7
6
5
4
3
2
1

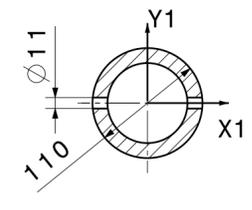
8
7
6
5
4
3
2
1

roh

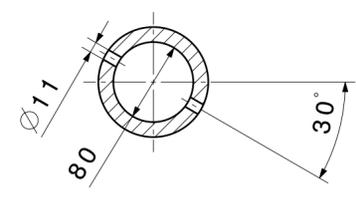


SchnittC-C

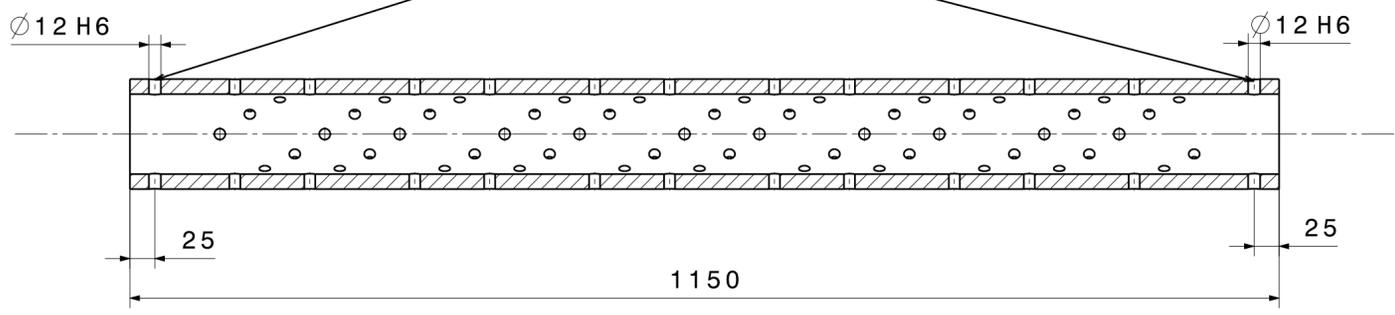
SchnittA-A



SchnittB-B



gebohrt mit Kupplungsscheibe und Welle



Winkel [Grad]	Z1 Start1 [mm]	Z1 Abstand [mm]	Z1 Start 2 [mm]	Z1 Abstand2 [mm]
0	105	5x180	180	4x180
30	135	5x180	210	4x180
60	165	5x180	240	4x180
90	195	4x180	90	5x180
120	225	4x180	120	5x180
150	255	4x180	150	5x180

Ø12H6	12,000	12,011
Passung	Mindestmaß	Höchstmaß

Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-1 grob		DASSAULT SYSTEMES		
DRAWN BY Peitl Michael		DRAWING TITLE Streuwelle		
CHECKED BY		DATE 30.04.2014	SIZE A2	DRAWING NUMBER 4
DESIGNED BY		DATE	SCALE 1:5	WEIGHT (kg)
			SHEET 1/1	

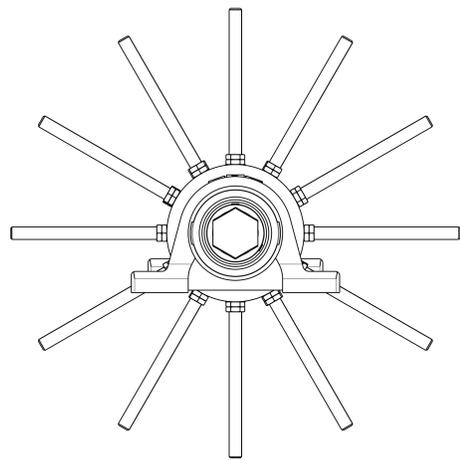
H G F E D C B A

Kapitel 4: Ausarbeitung Streuerkonzept

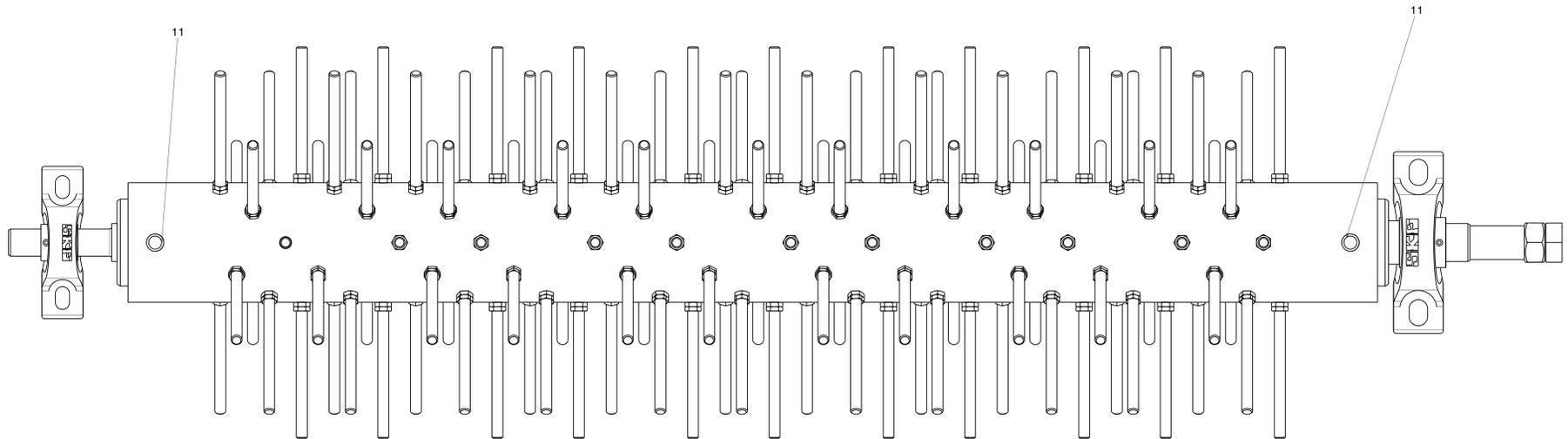
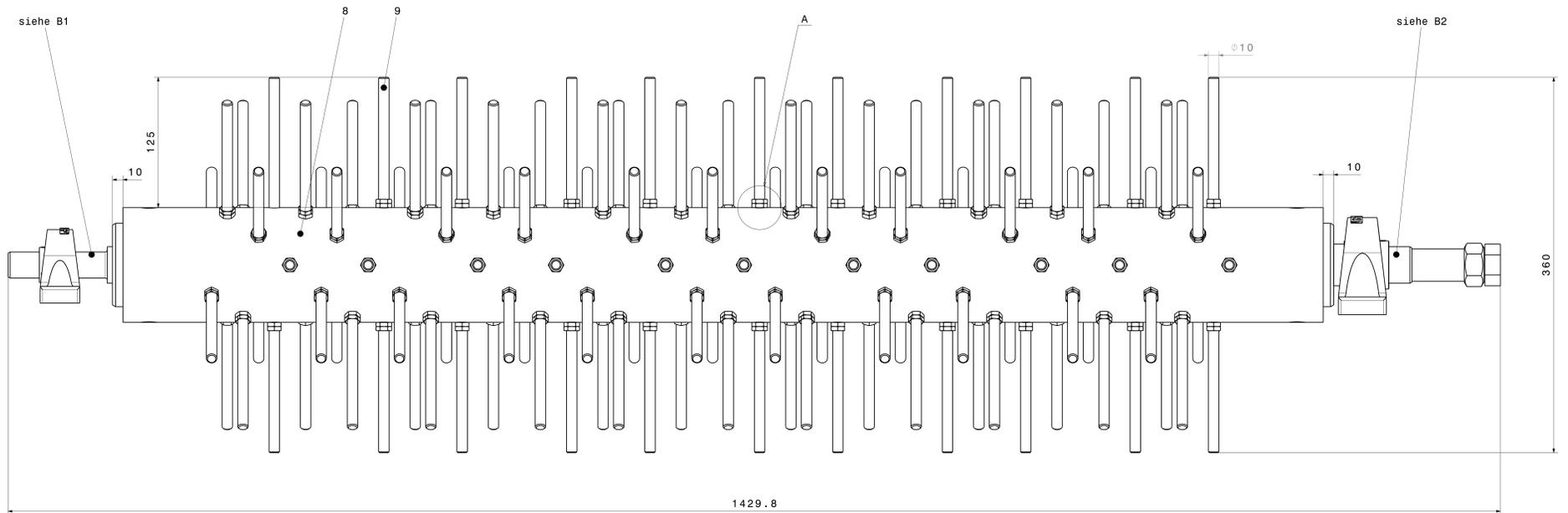
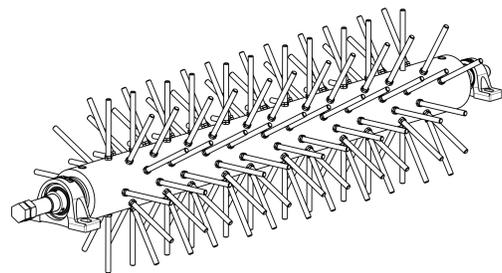
In der Baugruppe 3 findet man den Aufbau der Streuwelle. Darin sind alle Löcher mit Gewindestangen besetzt. Dadurch ergibt sich ein Abstand der Achsen von 30mm.

Zeichnungstitel:	Baugruppe 3 (B3)
Zeichnungsnummer:	B3

Teilenummer	Menge	Einheit	Bezeichnung	Norm	Abmessungen	Werkstoff	Bemerkung	Firma	Bestellnummer
8	1	Stk	Streuwelle			POM			
9	66	Stk	Gewindestange M10x360	DIN 976		8.8			
10	264	Stk	Sechskantmutter M10	ISO 4035		8			
11	2	Stk	Zylinderstift 12m6x110 A1	ISO 8734					
B1	1	Stk	Baugruppe 1						
B2	1	Stk	Baugruppe 2						



Maßstab: 1:5



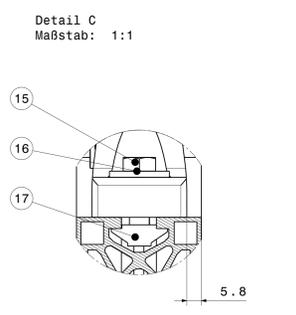
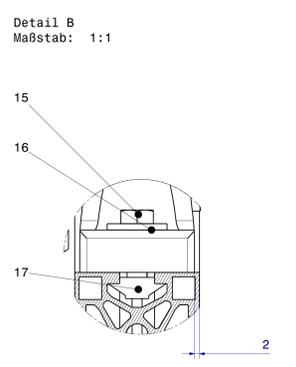
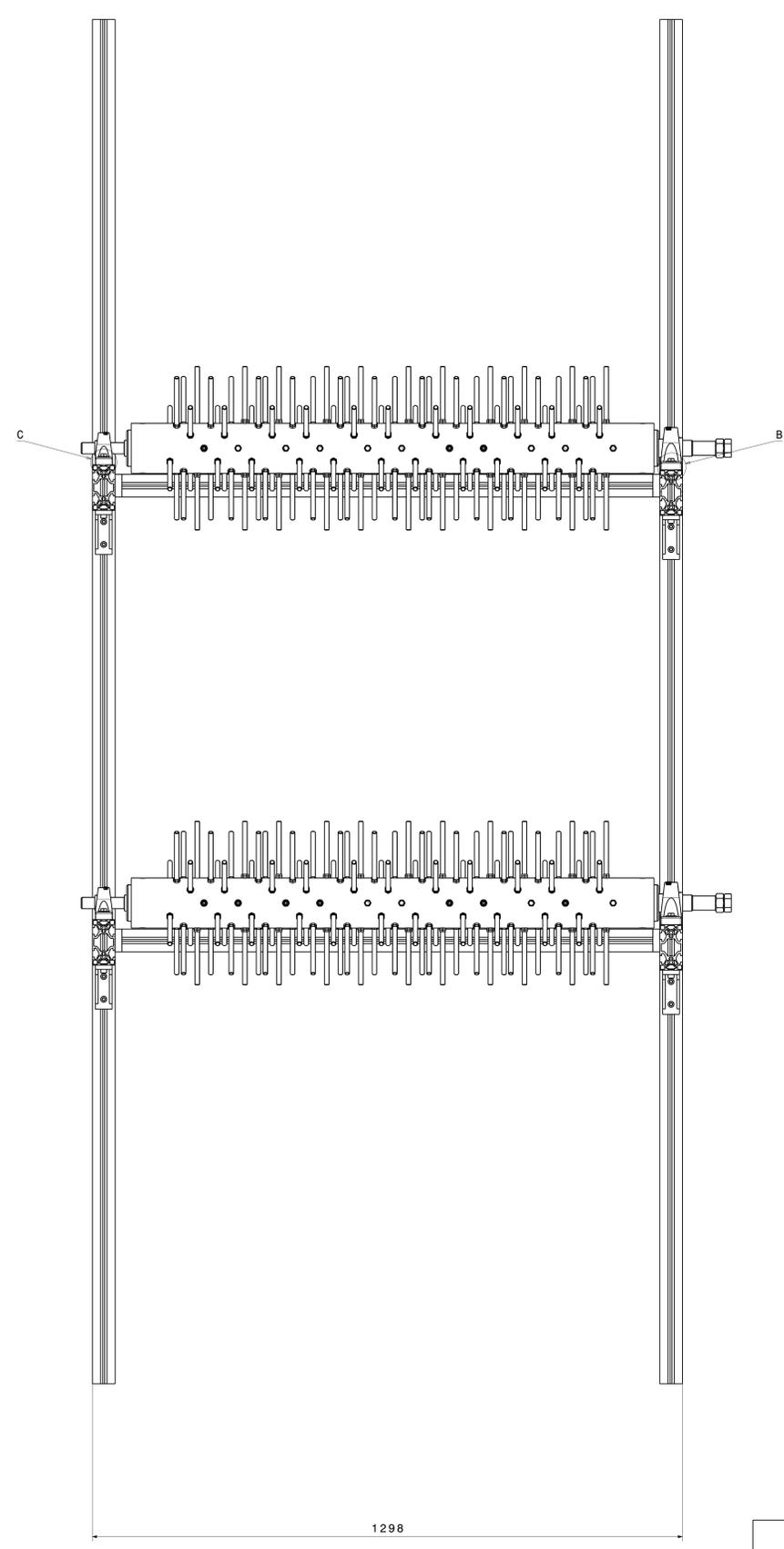
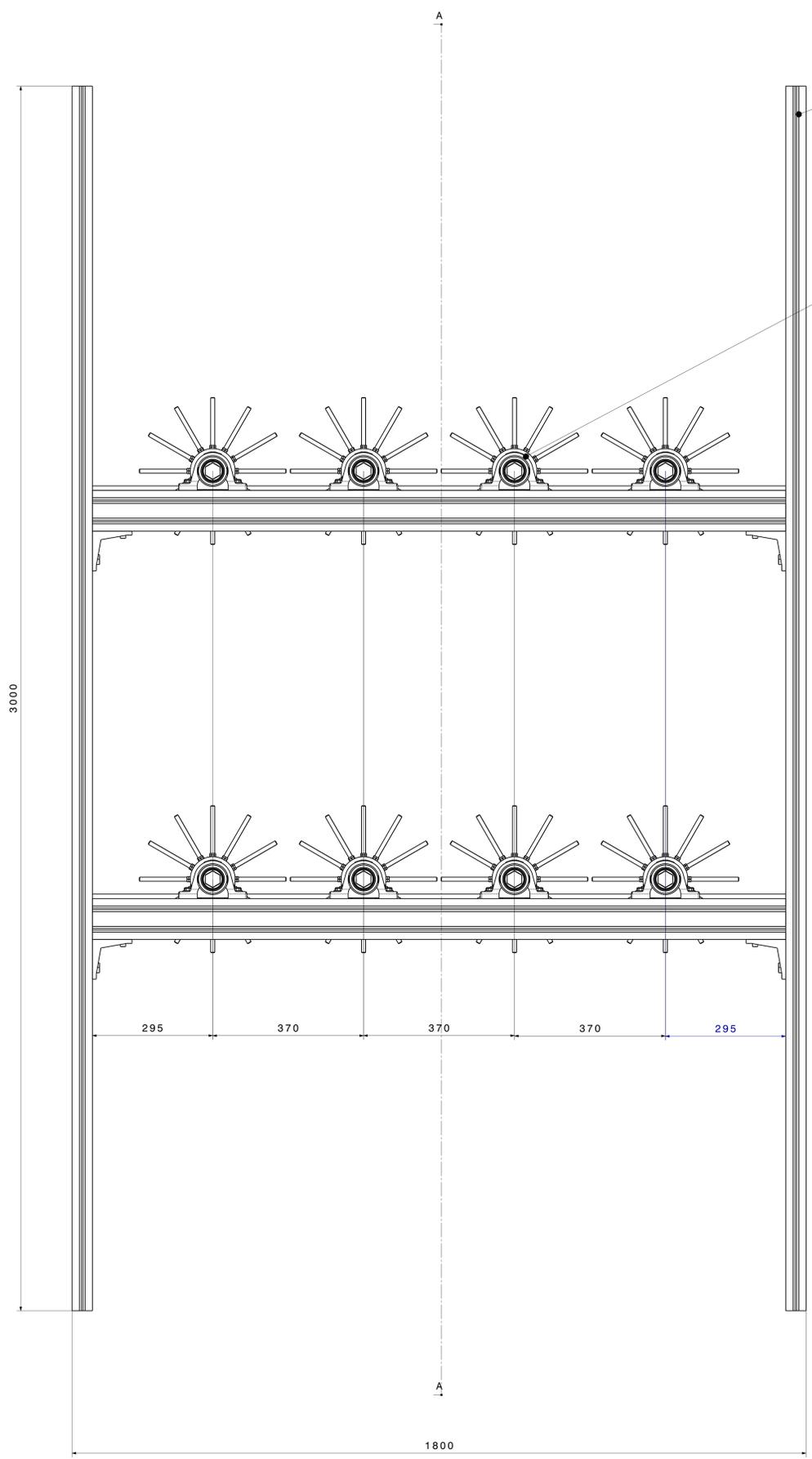
		DASSAULT SYSTEMES	
DRAWN BY	DATE	DRAWING TITLE Baugruppe 3 (B3)	
Peitl Michael	30.04.2014	SIZE	REV
CHECKED BY	DATE	A0	B3
DESIGNED BY	DATE	SCALE 1:2	WEIGHT (kg)
			SHEET 1/1

Kapitel 4: Ausarbeitung Streuerkonzept

In der Baugruppe 5 ist die Baugruppe 3 (Streuwelle) mit dem Gerüst verbunden. Der Abstand der Achsen der Wellen beträgt horizontal 370 mm.

Baugruppe 5
Zeichnungstitel: (B5)
Zeichnungsnummer: B5

Teilenummer	Menge	Einheit	Bezeichnung	Norm	Abmessungen	Werkstoff	Bemerkung	Firma	Bestellnummer
15	32	Stk	Sechskantschraube M8x30	EN ISO 4017		8.8			
16	32	Stk	Scheibe A13	DIN 125		St 140 HV			
17	32	Stk	Einschwenkmutter TIN 45					Robounits	TIN 4508
B3	8	Stk	Baugruppe 3 (B3)						
B4	1	Stk	Baugruppe 4 (B4)						



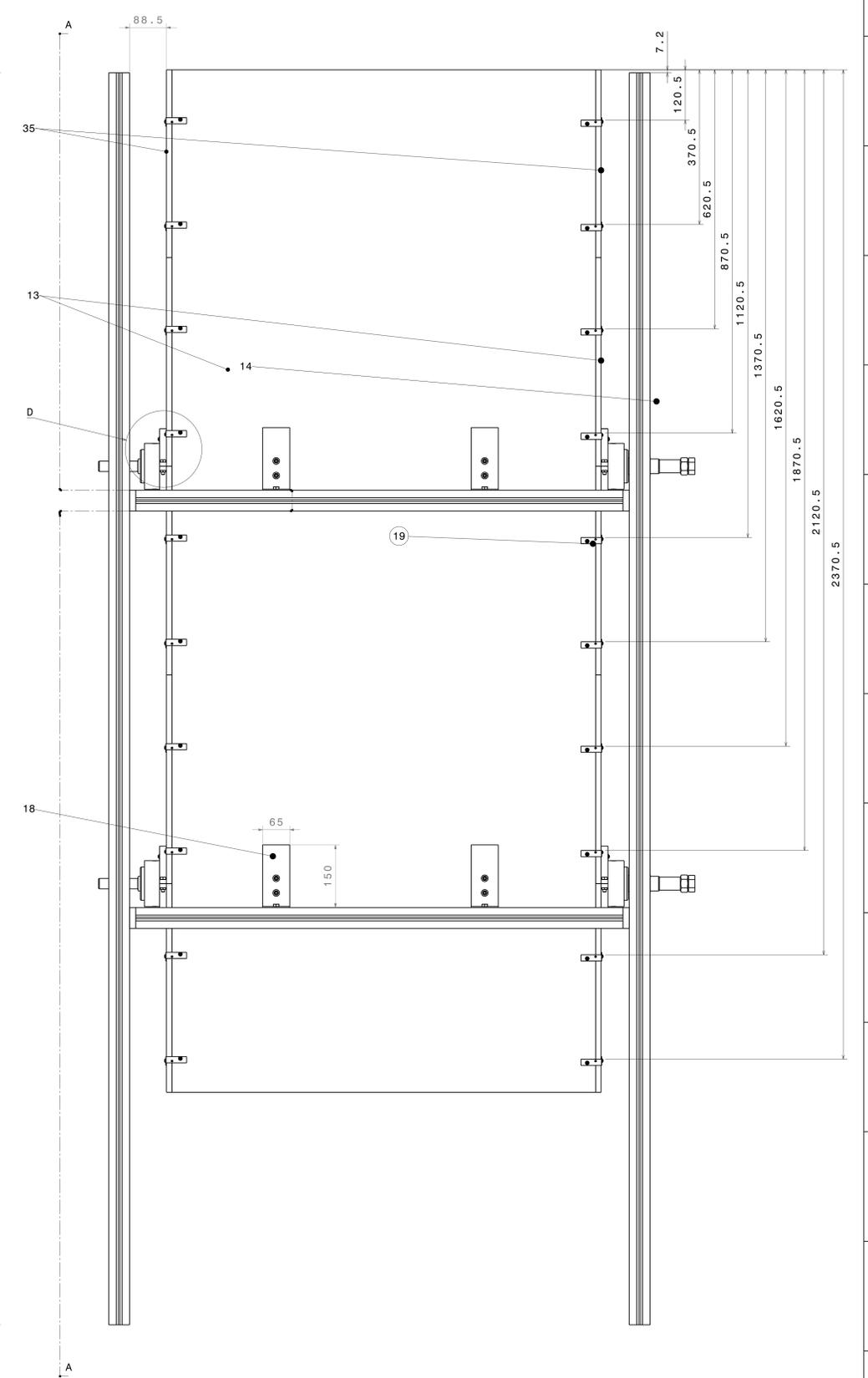
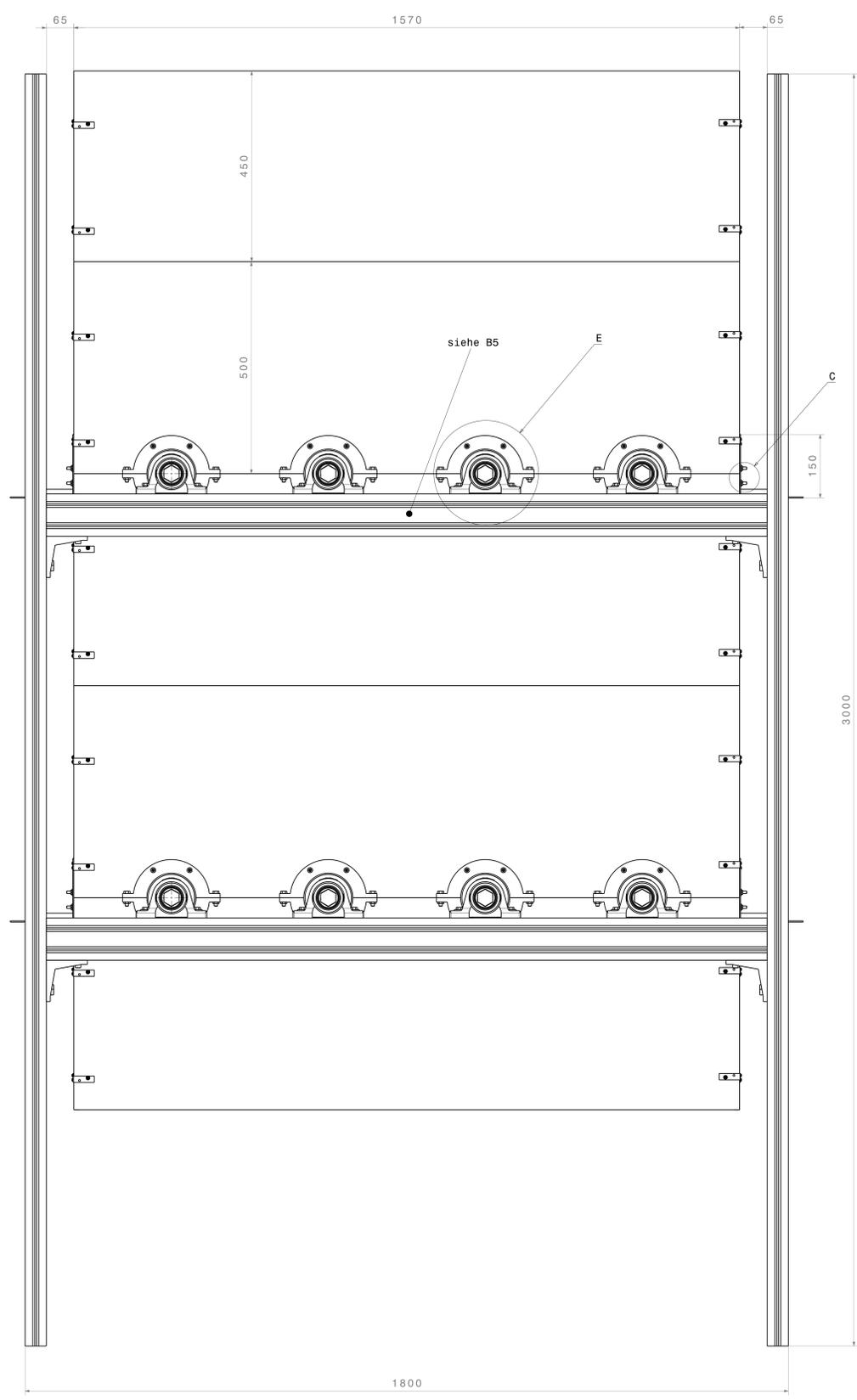
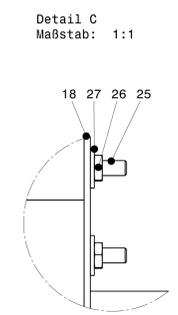
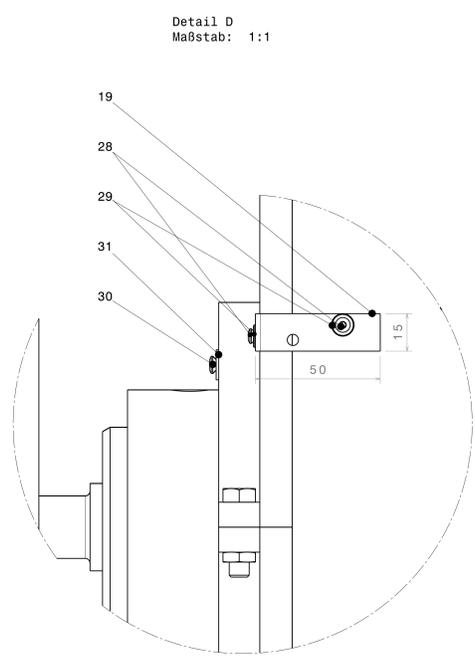
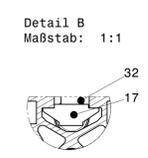
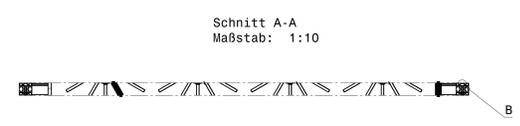
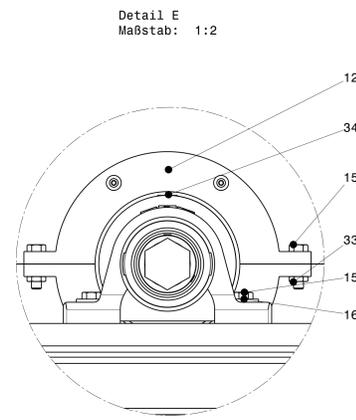
DRAWN BY		DATE	DRAWING TITLE		REV
Peitl Michael		29.04.2014	DASSAULT SYSTEMES Baugruppe 5 (B5)		
CHECKED BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER		
		A0	B5		
DESIGNED BY	DATE	SCALE	WEIGHT (kg)	SHEET 1/1	
		1:5			

Kapitel 4: Ausarbeitung Streuerkonzept

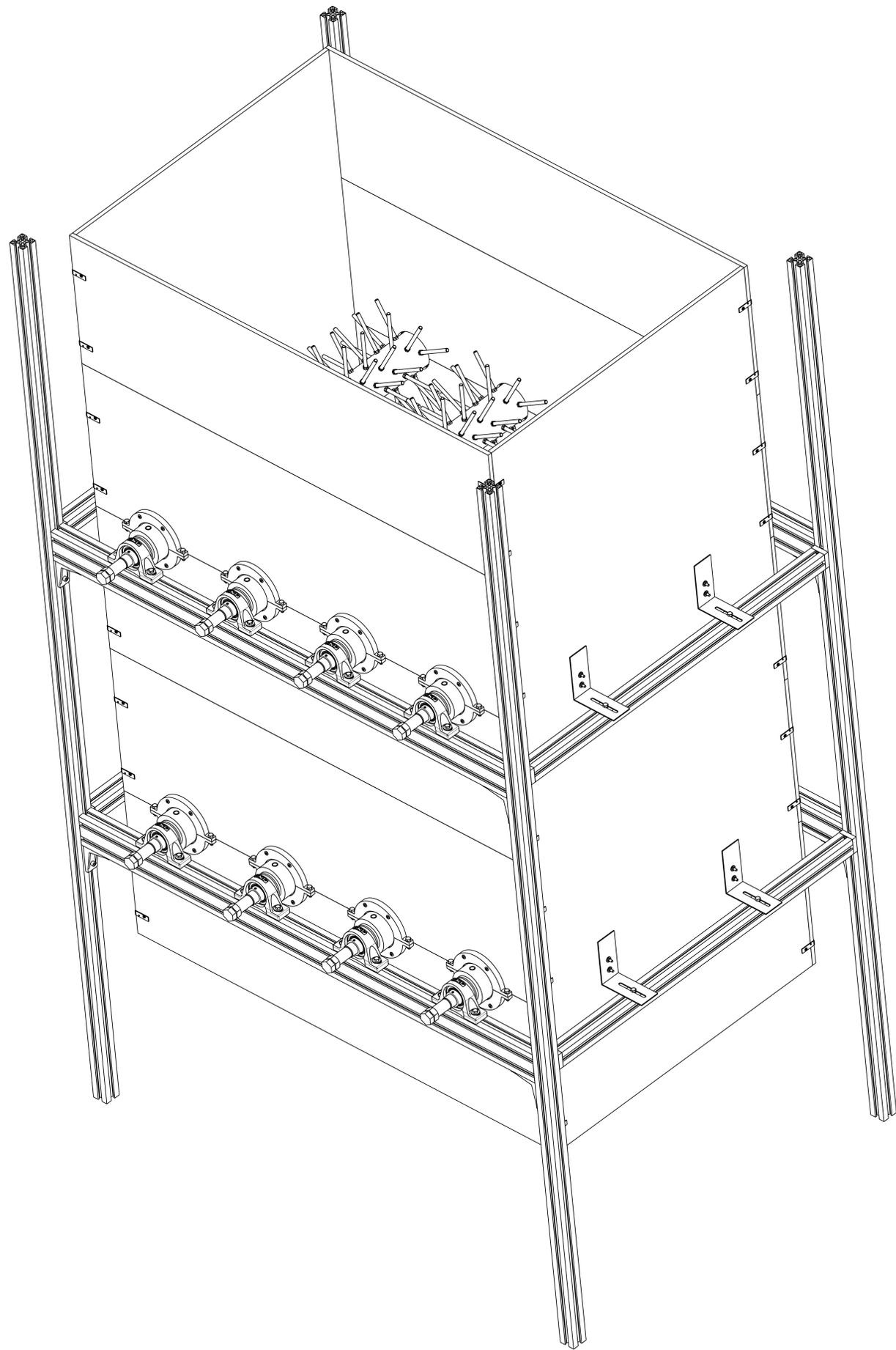
Der Gesamtzusammenbau besteht aus der Baugruppe 5 mit einer Holzverkleidung sowie den Abdichtungen an den Wellen.

Zeichnungstitel:	Zusammenbau
Zeichnungsnummer:	B6

Teilenummer	Menge	Einheit	Bezeichnung	Norm	Abmessungen	Werkstoff	Bemerkung	Firma	Bestellnummer
12	32	Stk	Abdichtungsring			Al			
13	8	Stk	Platte Front			Holz			
14	2	Stk	Platte Seite			Holz			
15	64	Stk	Sechskantschraube M8x30	DIN 558		4.6		Würt h	0081830
16	32	Stk	Scheibe A13	DIN 125		St 140 HV			
17	8	Stk	Einschwenkmutter TIN 45					Robou-nits	TIN 4508
18	8	Stk	Winkel 150x150x65x2,5		150x150x65x2,5	St		Hornbach	Winkel 150x150x65
19	40	Stk	Winkel 50x50x15x2		50x50x15x2	St		Hornbach	Winkel 50x50x15
25	16	Stk	Flachkopfschrauben mit Innensechskant M6x30	ISO 7380		8.8			
26	16	Stk	Sechskantmutter M6	DIN 439 B		8			
27	16	Stk	Scheibe D8,4-16x1,6	DIN 125 A		140 HV			
28	80	Stk	Linsensenkkopf mit Vollgewinde M3x17			St			
29	80	Stk	Scheibe D4,3-9x0,8	DIN 125 B		140 HV			
30	64	Stk	Linsensenkkopf mit Vollgewinde M3,5x35			St			
31	64	Stk	Scheibe D4,3-12x1	DIN 522		St			
32	8	Stk	Sechskantschraube M8x16	EN ISO 4017		4.6			
33	32	Stk	Sechskantmutter M8	ISO 4035		8			
34	16	Stk	Filzring M5-110	FIN 5419					
35	2	Stk	Platte Front 2			Holz			
B5	1	Stk	Baugruppe 5 (B5)						



		DASSAULT SYSTEMES	
DRAWN BY		DRAWING TITLE	
Peitl Michael		Zusammenbau	
CHECKED BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER
	05.05.2014	A0	B6
DESIGNED BY	DATE	SCALE	SHEET
		1:5	1/2



		DASSAULT SYSTEMES	
DRAWN BY	DATE	DRAWING TITLE	
Peitl Michael	05.05.2014	Zusammenbau	
CHECKED BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER
		A0	B6
DESIGNED BY	DATE	SCALE	WEIGHT (kg)
		1:5	
		SHEET 2/2	

Kapitel 4: Ausarbeitung Streuerkonzept

Zusammenbau(Stückliste aufgeschlüsselt)
Zeichnungstitel:
Zeichnungsnummer: B6

Teilenummer	Menge	Einheit	Bezeichnung	Norm	Abmessungen	Werkstoff	Bemerkung	Firma	Bestellnummer
1	8	Stk	Welle Frei			E335			
2	8	Stk	Welle Antrieb			E335			
3	8	Stk	Kupplungsscheibe			POM			
3	8	Stk	Kupplungsscheibe			POM			
4	8	Stk	Kugellager SKF 35					SKF	SYJ 35 TF
5	8	Stk	Kugellager SKF 25					SKF	SYJ 25 TF
6	8	Stk	Sechskantschraube M24x40	EN ISO 4017		8.8			
7	8	Stk	Sechskantmutter M24	ISO 7414		8			
8	8	Stk	Streuwelle			POM			
9	528	Stk	Gewindestange M10x360	DIN 976		8.8			
10	2112	Stk	Sechskantmutter M10	ISO 4035		8			
11	16	Stk	Spannstift 16x110	ISO 8752		St			
12	32	Stk	Abdichtungsring			Al			
13	8	Stk	Platte Front			Holz	Innenseitig beschichtet		
14	2	Stk	Platte Seite			Holz	Innenseitig be-		

Kapitel 4: Ausarbeitung Streuerkonzept

							schichtet		
15	96	Stk	Sechskantschraube M8x30	DIN 558		8.8			
16	64	Stk	Scheibe A13	DIN 125		St 140 HV			
17	40	Stk	Einschwenkmutter TIN 45					Ro-bounits	TIN 4508
18	8	Stk	Winkel 150x150x65x2,5		150x150x65 x2,5	St		Horn-bach	Winkel 150x150x65
19	40	Stk	Winkel 50x50x15x2		50x50x15x2	St		Horn-bach	Winkel 50x50x15
20	4	Stk	Profil 50x100x3000		50x100x3000			Ro-bounits	PIL 5010 SNN 3000
21	4	Stk	Profil 50x500x3000		50x50x1168			Ro-bounits	PIL 5050 SNN 1168
22	4	Stk	Profil 50x100x1700		50x100x1700			Ro-bounits	PIL 5010 SNN 1700
23	8	Stk	Verbinder FAS 5051		50x50x14		Ganzes Set	Ro-bounits	FAS 5051
24	8	Stk	Winkelverbindung GUS 1001		97x97x37		Ganzes Set	Ro-bounits	GUS 1001
25	16	Stk	Flachkopfschrauben mit Innensechskant M6x30	ISO 7380		8.8			
26	16	Stk	Sechskantmutter M6	DIN 439 B		8			
27	16	Stk	Scheibe D8,4-16x1,6	DIN 125 A		140 HV			
28	80	Stk	Linsensenkkopf mit Vollgewinde M3x17			St			
29	80	Stk	Scheibe D4,3-9x0,8	DIN 125 B		140 HV			

Kapitel 4: Ausarbeitung Streuerkonzept

30	64	Stk	Linsensenkkopf mit Vollgewinde M3,5x35			St			
31	64	Stk	Scheibe D4,3-12x1	DIN 522		St			
32	8	Stk	Sechskantschraube M8x16	EN ISO 401 7		8.8			
33	32	Stk	Sechskantmutter M8	ISO 403 5		8			
34	16	Stk	Filzring M5-110	FIN 541 9					
35	2	Stk	Platte Front 2			Holz	Innenseitig be- schichtet		

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein Konzept zur thermischen Nutzung der bei der Kompostierung freigesetzten Energie vorgestellt. Die Berechnungen erfolgten mittels MathCad. Dabei wird die von Mikroorganismen beim Abbau des Rottegutes freigesetzte Wärme teilweise über den Abluftstrom (feuchte Luft) mithilfe von Wärmetauscher, Abscheider, Mischer und einem Kamin aus dem Reaktor ausgetragen (und genutzt) und andererseits wird die Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen sichergestellt.

Aus dem Reaktor im Konzept wird mit dem 3D CAD Programm CATIA ein Versuchsreaktor konstruiert, welcher erste Versuche zur Erforschung von Luftdurchlässigkeit, Auflockerung, Durchmischung, Verstopfung und Brückenbildung ermöglicht. Die dazugehörigen Zeichnungen und Stücklisten zum Bau des Versuchsreaktors befinden sich in dieser Arbeit.

Kapitel 2 schafft einleitend einen Überblick über den Prozess der Kompostierung und die wichtigsten Einflussgrößen darauf. Die thermodynamischen Grundlagen zu feuchter Luft, Wärmetauschern und Druckverlust von durchströmten Schüttungen werden betrachtet. Zuletzt werden mögliche auftretende Probleme beim Reaktor aufgezeigt.

Ausgehend vom Prozess der Kompostierung und den möglichen Problemen werden vier verschiedene Konzepte entwickelt und kurz vorgestellt. Das Projektteam bewertet anhand konkret ausgesuchter Parameter die verschiedenen Konzepte. Als erfolgversprechendsten erweist sich das „Streuerkonzept“, welches das Rottegut, ausgehend von der ersten (obersten) Stufe, jede Woche eine Stufe mit Hilfe von Walzen weiter nach unten befördert (insgesamt besteht der Reaktor aus 4 Stufen). Feuchte Luft strömt dabei von unten nach oben und nimmt Wärme auf.

Bei der thermodynamischen Berechnung wurde die durch Mikroorganismen beim Abbau der organischen Substanz freigesetzte Wärmemenge ermittelt und daraus der erforderliche Luftmassenstrom abgeschätzt. Aufgrund des Luftmassenstroms wird ein Wärmetauscher ausgelegt, welcher Wasser um 10 °C erhitzt. Der geringe Temperaturunterschied zwischen Eingangsluft (ca. 54 °C) und dem Wasser (ca. 30 °C) als auch die geringen Wärmedurchgangskoeffizienten erfordern große Flächen des Wärmetauschers.

Aufgrund der Abbautätigkeit aerober Mikroorganismen wird Sauerstoff verbraucht und Kohlendioxid gebildet. Um ein Abgleiten des Prozesses ins anaerobe Milieu zu verhindern, muss der zirkulierenden Luft ständig sauerstoffreiche frische Luft beigemischt werden. Bei einer Luftaustauschrate von 15 % stellen sich ein Kohlenstoffgehalt der Luft von 10 Prozent und ein Sauerstoffgehalt von 17 Prozent ein.

Zusammenfassung

Auch ein Teil des Kondensats muss vom Wärmetauscher wieder in den Reaktor zurückgeleitet werden, da sonst das Rottegut „austrocknen“ würde. Die erforderlichen Kaminhöhen, um einen Naturluftzug zu erhalten, werden ausgelegt. Für die Berechnung werden die physikalischen Eigenschaften von Quarzsand bzw. Split an Stelle der unbekanntenen Werte für Rottegut verwendet. Die erforderlichen Kaminhöhen betragen 17 beziehungsweise 3 m.

Ausgehend von diesem Modell wird, bei einer Zugabe von 700kg Trockenmaterial Rotteinput pro Woche, in vier Wochen Rottedauer eine Leistung von 5,6 kW erzeugt, indem Wasser von 30 °C auf 40 °C erhitzt wird.

Der Versuchsreaktor wurde so konstruiert, dass er leicht und günstig zu bauen ist. Damit können ersten Versuche zu Durchmischung, Luftdurchlässigkeit, Korrosion, Verstopfung und Brückenbildung während des Rotteprozesses untersucht werden.

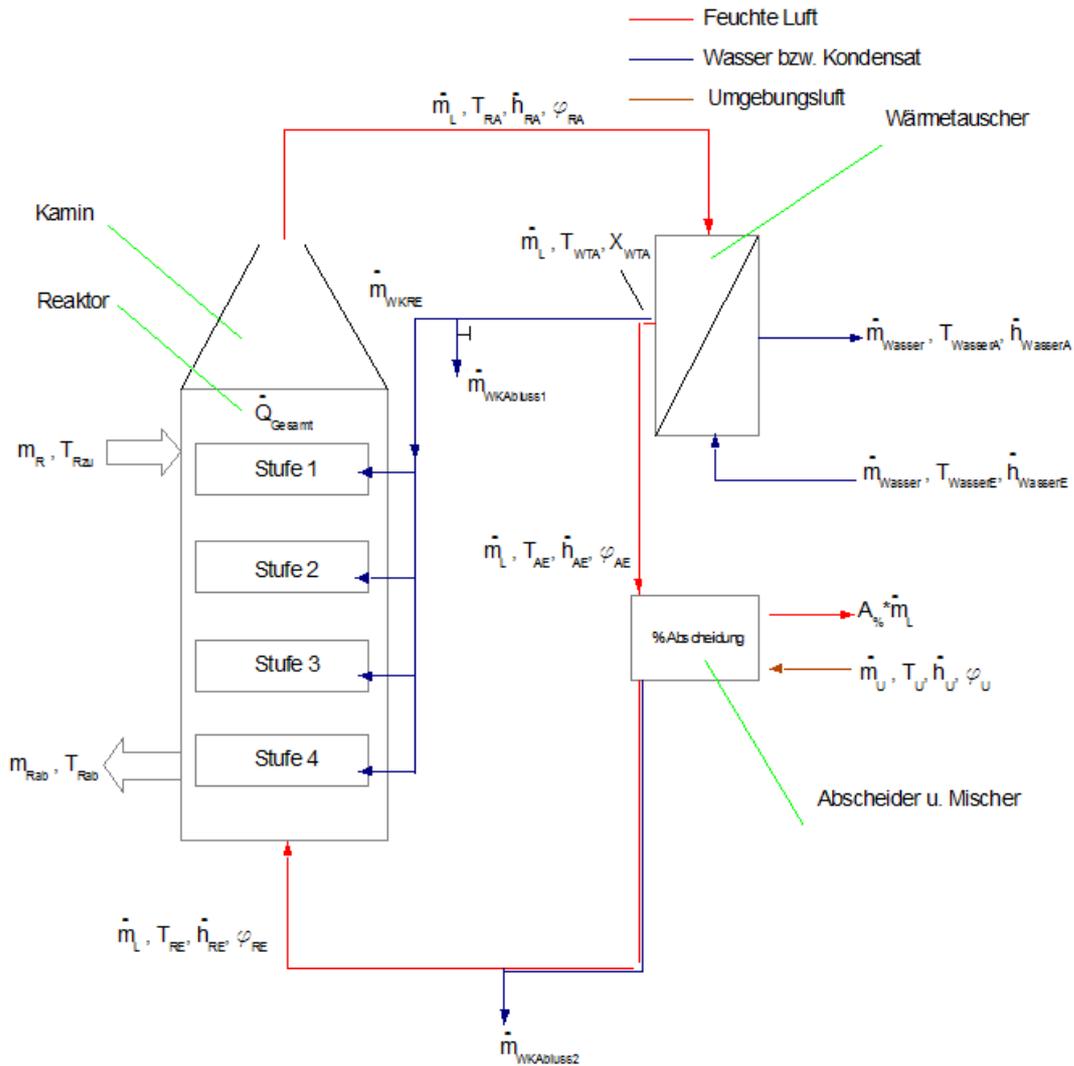
Durch die Versuche können erste wichtige Erkenntnisse auf diesem Gebiet gesammelt werden, welche dazu beitragen, in Zeiten ständig wachsenden Energieverbrauches umweltschonende Alternativen zu finden.

6 Anhang

6.1 Berechnung

Berechnung

Das Konzept ist in der nächsten Abbildung zu sehen.

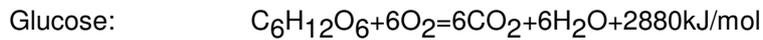


1. Ermitteln der freigesetzten Energie beim Kompostierprozess:

Die entstehende Energiemenge wird mit Hilfe der Formel des aeroben Abbaus von Glucose berechnet.

Annahme: Das Inputmaterial in den Rotteprozess entspricht Glucose.

Die entstehende Wärmemenge stellt sicherlich einen oberen Grenzwert dar.



umgewandelte Enthalpie:

$$h_{GI} := 2880000 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \quad (\text{A.1})$$

Molmassen:

$$M_H := 1.008 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \quad (\text{A.2})$$

$$M_O := 15.9995 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \quad (\text{A.3})$$

$$M_C := 12.01 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \quad (\text{A.4})$$

Der Anteil an organischem Kohlenstoff im aufgebereiteten Inputmaterial der MA48 beträgt im Mittel 33%. Dies ergab Messungen der BOKU.

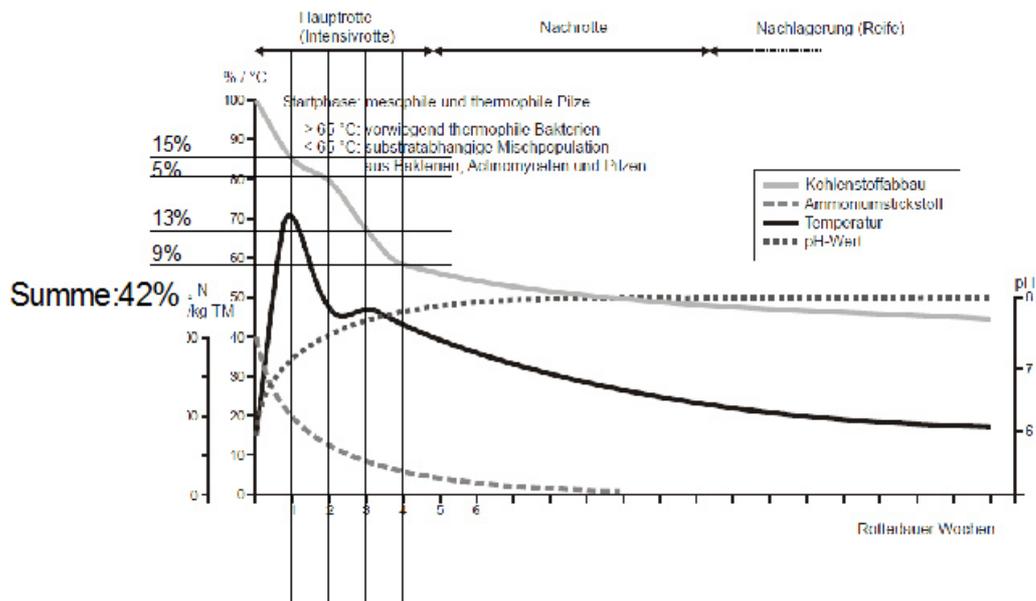
$$\xi_{C, \text{Rottegut}} := 33\% \quad (\text{A.5})$$

Annahme: Das aufbereitete Material enthält soviel Masse an Kohlenstoff als Messergebnisse ergaben.

Die Kohlenstoffabbauraten werden der nächsten Abbildung entnommen. Das Rottegut verweilt in jeder der vier Stufen eine Woche lang.

Annahme: Der Kompostierprozess verhält sich gleich wie in der idealisierten Abbildung. Aufgrund der 4 Stufen entsteht ein kontinuierlicher Prozess.

Anhang



Kohlenstoffabbauraten bei aufbereitetem Material bezogen auf die Masse an organischem Kohlenstoff des Inputmaterials:

$$\xi_{\text{CAbbauStufe1}} := 15\% \quad (\text{A.6})$$

$$\xi_{\text{CAbbauStufe2}} := 5\% \quad (\text{A.7})$$

$$\xi_{\text{CAbbauStufe3}} := 13\% \quad (\text{A.8})$$

$$\xi_{\text{CAbbauStufe4}} := 9\% \quad (\text{A.9})$$

$$\xi_{\text{CAbbauStufenGesamt}} := 42\% \quad (\text{A.10})$$

Dadurch errechnen sich die Abbauraten bezogen auf die Trockenmasse von Rottegut:

$$\xi_{\text{CAbbau1}} := \xi_{\text{CAbbauStufe1}} \xi_{\text{C.Rottegut}} = 4.95\% \quad (\text{A.11})$$

$$\xi_{\text{CAbbau2}} := \xi_{\text{CAbbauStufe2}} \xi_{\text{C.Rottegut}} = 1.65\% \quad (\text{A.12})$$

$$\xi_{\text{CAbbau3}} := \xi_{\text{CAbbauStufe3}} \xi_{\text{C.Rottegut}} = 4.29\% \quad (\text{A.13})$$

$$\xi_{\text{CAbbau4}} := \xi_{\text{CAbbauStufe4}} \xi_{\text{C.Rottegut}} = 2.97\% \quad (\text{A.14})$$

$$\xi_{\text{CAbbauGesamt}} := \xi_{\text{CAbbauStufenGesamt}} \xi_{\text{C.Rottegut}} = 13.86\% \quad (\text{A.15})$$

Anhang

Aufgrund der Kohlenstoffabbauraten und der freigesetzten Energiemenge pro Mol wird nun die freigesetzte Energie pro Stufe und Woche ermittelt.

$$M_{6C} := 6 \cdot M_C = 0.072 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \quad (\text{A.16})$$

Die gesamte umgewandelte Energie pro kg TM Rottegut in 4 Wochen ergibt sich aus:

$$h_{\text{RottegutGesamt}} := \frac{\xi_{\text{CAbbauGesamt}}}{M_{6C}} \cdot h_{\text{Gl}} = 5.539 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.17})$$

und in den einzelnen Stufen:

$$h_{\text{Gl1.Stufe}} := h_{\text{Gl}} \cdot 1 \frac{\xi_{\text{CAbbau1}}}{M_{6C}} = 1.978 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.18})$$

$$h_{\text{Gl2.Stufe}} := h_{\text{Gl}} \cdot 1 \frac{\xi_{\text{CAbbau2}}}{M_{6C}} = 6.595 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.19})$$

$$h_{\text{Gl3.Stufe}} := h_{\text{Gl}} \cdot 1 \frac{\xi_{\text{CAbbau3}}}{M_{6C}} = 1.715 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.20})$$

$$h_{\text{Gl4.Stufe}} := h_{\text{Gl}} \cdot 1 \frac{\xi_{\text{CAbbau4}}}{M_{6C}} = 1.187 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.21})$$

Um einen Vergleich zu haben: Würde die gesamte Energie, welche in den 4 Wochen freigesetzt wird, genutzt, ergäbe sich

$$\text{kWh}_{\text{Rottegut}} := \frac{h_{\text{RottegutGesamt}} \cdot h}{3600\text{s}} = 1.539 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{kg}} \quad (\text{A.22})$$

Und bei Abbau von 50 % des Inputkohlenstoffes, welches über drei Monate dauert

$$h_{\text{Rottegut50\%C}} := \frac{\xi_{\text{C.Rottegut}50\%}}{M_{6C}} \cdot h_{\text{Gl}} = 6.595 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.23})$$

$$\text{kWh}_{\text{Rottegut50\%C}} := \frac{h_{\text{Rottegut50\%C}} \cdot h}{3600\text{s}} = 1.832 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{kg}} \quad (\text{A.24})$$

$$\xi_{50\% \text{Energie}} := \frac{h_{\text{Rottegut50\%C}}}{h_{\text{RottegutGesamt}}} - 1 = 19.048\% \quad (\text{A.25})$$

Anhang

Dies würde rund 19 % mehr Energie freisetzen.

Waldfrisches Holz hat einen Heizwert von ca. 2kWh pro kg FM (rund 55 % Feuchte) und bei einer Lagerung über mehrere Jahre (Feuchte rund 20%) einen Heizwert von rund 4kWh/kg.

Quelle: <http://www.leistbaresheizen.at/downloads/holz-heizwerttabellen-2011.pdf>

2. Stoffanalyse des Kompostierprozesses:

Glucose: $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 = 6CO_2 + 6H_2O + 2880 \text{ kJ/mol}$

$$M_{C_6H_{12}O_6} := 6 \cdot M_C + 12 \cdot M_H + 6 \cdot M_O = 0.18 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \quad (\text{A.26})$$

+

$$M_{6O_2} := 12 \cdot M_O = 0.192 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \quad (\text{A.27})$$

=

$$M_{6CO_2} := 6 \cdot M_C + 12 \cdot M_O = 0.264 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \quad (\text{A.28})$$

+

$$M_{6H_2O} := 12 \cdot M_H + 6 \cdot M_O = 0.108 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \quad (\text{A.29})$$

Der Abbau an Trockenmasse des Rottegutes bezogen auf das Anfangsgewicht ergibt sich zu:

$$\xi_{C_6H_{12}O_6 \text{Abbau1}} := \frac{\xi_{C \text{Abbau1}}}{M_{6C}} \cdot M_{C_6H_{12}O_6} = 12.375 \% \quad (\text{A.30})$$

$$\xi_{C_6H_{12}O_6 \text{Abbau2}} := \frac{\xi_{C \text{Abbau2}}}{M_{6C}} \cdot M_{C_6H_{12}O_6} = 4.125 \% \quad (\text{A.31})$$

$$\xi_{C_6H_{12}O_6 \text{Abbau3}} := \frac{\xi_{C \text{Abbau3}}}{M_{6C}} \cdot M_{C_6H_{12}O_6} = 10.725 \% \quad (\text{A.32})$$

$$\xi_{C_6H_{12}O_6 \text{Abbau4}} := \frac{\xi_{C \text{Abbau4}}}{M_{6C}} \cdot M_{C_6H_{12}O_6} = 7.425 \% \quad (\text{A.33})$$

$$\xi_{C_6H_{12}O_6 \text{AbbauGesamt}} := \frac{\xi_{C \text{AbbauGesamt}}}{M_{6C}} \cdot M_{C_6H_{12}O_6} = 34.651 \% \quad (\text{A.34})$$

Anhang

wobei dafür soviel kg Sauerstoff pro kg Inputtrockenmasse in den jeweiligen Stufen verbraucht wird:

$$\xi_{6O2Abbau1} := \frac{\xi_{CAbbau1}}{M_{6C}} \cdot M_{6O2} = 0.132 \quad (\text{A.35})$$

$$\xi_{6O2Abbau2} := \frac{\xi_{CAbbau2}}{M_{6C}} \cdot M_{6O2} = 0.044 \quad (\text{A.36})$$

$$\xi_{6O2Abbau3} := \frac{\xi_{CAbbau3}}{M_{6C}} \cdot M_{6O2} = 0.114 \quad (\text{A.37})$$

$$\xi_{6O2Abbau4} := \frac{\xi_{CAbbau4}}{M_{6C}} \cdot M_{6O2} = 0.079 \quad (\text{A.38})$$

$$\xi_{6O2AbbauGesamt} := \frac{\xi_{CAbbauGesamt}}{M_{6C}} \cdot M_{6O2} = 0.369 \quad (\text{A.39})$$

und soviel kg Kohlendioxid pro kg TM Rottegut freigesetzt wird:

$$\xi_{6CO2Abbau1} := \frac{\xi_{CAbbau1}}{M_{6C}} \cdot M_{6CO2} = 0.181 \quad (\text{A.40})$$

$$\xi_{6CO2Abbau2} := \frac{\xi_{CAbbau2}}{M_{6C}} \cdot M_{6CO2} = 0.06 \quad (\text{A.41})$$

$$\xi_{6CO2Abbau3} := \frac{\xi_{CAbbau3}}{M_{6C}} \cdot M_{6CO2} = 0.157 \quad (\text{A.42})$$

$$\xi_{6CO2Abbau4} := \frac{\xi_{CAbbau4}}{M_{6C}} \cdot M_{6CO2} = 0.109 \quad (\text{A.43})$$

$$\xi_{6CO2AbbauGesamt} := \frac{\xi_{CAbbauGesamt}}{M_{6C}} \cdot M_{6CO2} = 0.508 \quad (\text{A.44})$$

Anhang

Und Wasser:

$$\xi_{6H_2O\text{Frei}1} := \frac{\xi_{C\text{Abbau}1}}{M_{6C}} \cdot M_{6H_2O} = 0.074 \quad (\text{A.45})$$

$$\xi_{6H_2O\text{Frei}2} := \frac{\xi_{C\text{Abbau}2}}{M_{6C}} \cdot M_{6H_2O} = 0.025 \quad (\text{A.46})$$

$$\xi_{6H_2O\text{Frei}3} := \frac{\xi_{C\text{Abbau}3}}{M_{6C}} \cdot M_{6H_2O} = 0.064 \quad (\text{A.47})$$

$$\xi_{6H_2O\text{Frei}4} := \frac{\xi_{C\text{Abbau}4}}{M_{6C}} \cdot M_{6H_2O} = 0.045 \quad (\text{A.48})$$

$$\xi_{6H_2O\text{FreiGesamt}} := \frac{\xi_{C\text{AbbauGesamt}}}{M_{6C}} \cdot M_{6H_2O} = 0.208 \quad (\text{A.49})$$

3. Errechnen des Wasserhaushaltes:

Aus dem Wasser, welches umgewandelt wird, und der Abnahme des Rottegetes wird die erforderliche Menge an Wasser berechnet, welche entnommen gehört, damit der Wasseranteil konstant bleibt.

Die zugegebene Trockenmasse an Rotteget jede Woche beträgt:

$$\text{Trockenmasse Rotteget zu: } m_R := 700\text{kg} \quad (\text{A.50})$$

Dadurch ergibt sich die ausgeschiedene Rottemasse zu:

$$\text{Trockenmasse Rotteget ab: } m_{Rab} := m_R \cdot (1 - \xi_{C6H_{12}O_6\text{AbbauGesamt}}) = 457.4\text{kg} \quad (\text{A.51})$$

mit einem Wassergehalt von 50 %

$$\text{Wassergehalt: } x_W := 50\% \quad (\text{A.52})$$

Es errechnet sich die freiwerdende Menge an Wasser mit

$$m_{W\text{frei}} := m_R \cdot \xi_{6H_2O\text{FreiGesamt}} = 145.534\text{kg} \quad (\text{A.53})$$

Die in Summe auszutragende Menge Wasser ergibt sich zu:

$$m_{W\Delta} := m_R \cdot \frac{1}{\frac{1}{x_W} - 1} + m_{W\text{frei}} - m_{Rab} \cdot \frac{1}{\frac{1}{x_W} - 1} = 388.088\text{kg} \quad (\text{A.54})$$

Anhang

Bei einer Stufendauer von einer Woche mit 4 Stufen

$$\Delta t := 1 \cdot 7 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} = 6.048 \times 10^5 \text{ s} \quad (\text{A.55})$$

ergibt sich der zu auszutragende Wasserstrom zu

$$m_{\text{W}\Delta} := \frac{m_{\text{W}\Delta}}{\Delta t} = 6.417 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.56})$$

4. Ermitteln der entstehenden Wärmemenge:

Die spezifische Wärmekapazität von dem Rottegut kann abgeschätzt werden mit

$$\text{spezifische Wärmekapazität: } c_{\text{pR}} := 1.2 \frac{10^3 \text{ J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} + 2.99 \frac{10^3 \text{ J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot x_{\text{W}} = 2.695 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (\text{A.57})$$

(Kranert M., 2010: S. 201)

Einführung in die Abfallwirtschaft Seite 201, Martin Kranert

Daraus wird nun die abgegebene Wärmemenge errechnet:

$$\text{Umgebungstemperatur: } T_{\text{Rzu}} := 15 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{A.58})$$

Die mittlere Rotteguttemperatur wird mit der Temperatur auf der Ober- sowie der Unterseite abgeschätzt.

$$T_{\text{MR}}(T_{\text{Oberseite}}, T_{\text{Unterseite}}) := \frac{T_{\text{Oberseite}} + T_{\text{Unterseite}}}{2} \quad (\text{A.59})$$

Temperatur der Luft im Reaktoreingang:

$$T_{\text{RE}} := 37.525 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{A.60})$$

Temperatur des Kompostes an der Oberseite in der 4. Stufe:

$$T_4 := 42.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{A.61})$$

$$T_{\text{Rab}} := T_{\text{MR}}(T_4, T_{\text{RE}}) = 40.012 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{A.62})$$

Als Nullpunkt zur Berechnung der Enthalpie wird die Temperatur des Tripelpunktes des Wassers angenommen.

$$T_{\text{Tr}} := 273.16 \text{ K} \quad (\text{A.63})$$

Anhang

Die entstehende Wärmemenge ergibt sich aus der freigesetzten Enthalpie und der Wärmemenge welche zu bzw. abgegeben wird.

$$Q_{\text{Gesamt}}^{\circ} := \frac{m_{\text{R}} \cdot h_{\text{RottegutGesamt}}}{\Delta t} \dots = 6.342 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{s}} \quad (\text{A.64})$$

$$+ \frac{\frac{m_{\text{R}}}{(1-x_{\text{W}})} \cdot c_{\text{pR}} \cdot (T_{\text{Rzu}} - T_{\text{Tr}})}{\Delta t} - \frac{\frac{m_{\text{Rab}}}{(1-x_{\text{W}})} \cdot c_{\text{pR}} \cdot (T_{\text{Rab}} - T_{\text{Tr}})}{\Delta t}$$

4. Ermitteln des erforderlichen Luftmassenstromes:

Die freigesetzte Wärmemenge wird mit feuchter Luft entnommen.

Stoffspezifische Daten der feuchten Luft:

trockene Luft:

$$\text{Gaskonstante:} \quad R_{\text{L}} := 287.1 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (\text{A.65})$$

$$\text{spez. Wärmekapazität:} \quad c_{\text{pL}} := 1.0046 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (\text{A.66})$$

Wasserdampf:

$$\text{Gaskonstante:} \quad R_{\text{D}} := 461.40 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (\text{A.67})$$

$$\text{spez. Wärmekapazität:} \quad c_{\text{pD}} := 1.863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (\text{A.68})$$

$$\text{spez. Verdampfungsenthalpie:} \quad \Delta h_{\text{Dtr}} := 2501 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.69})$$

$$\text{Temperatur Tripelpunkt:} \quad T_{\text{Tr}} = 273.16 \text{ K} \quad (\text{A.70})$$

Wasser:

$$\text{spez. Wärmekapazität:} \quad c_{\text{pWasser}} := 4.182 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (\text{A.71})$$

Der Sättigungsdampfdruck des Wassers errechnet sich aus der Antoine Gleichung(2.25):

$$p_{\text{s}}(\vartheta) := 611.657 \text{ Pa} \cdot \exp \left(17.2799 - \frac{4102.99}{\frac{\vartheta - 273.15 \text{ K}}{\text{K}} + 237.431} \right) \quad (\text{A.72})$$

Anhang

Die Wasserbeladung errechnet sich aus (2.4).

$$X(\vartheta, p, \varphi) := \frac{R_L \cdot p_s(\vartheta)}{R_D \cdot \frac{p}{\varphi} - p_s(\vartheta)} \quad (\text{A.73})$$

Annahme: Der Umgebungsdruck im Reaktor wird vereinfacht für die Berechnung des Massenstromes bzw. der Wärmemengen konstant mit 1 bar angenommen.

$$p := 1 \text{ bar} \quad p = 1 \times 10^5 \text{ Pa} \quad (\text{A.74})$$

Annahme: Die Luftfeuchte im Reaktor beträgt in jedem Punkt 100%

$$\varphi_R := 100\% \quad (\text{A.75})$$

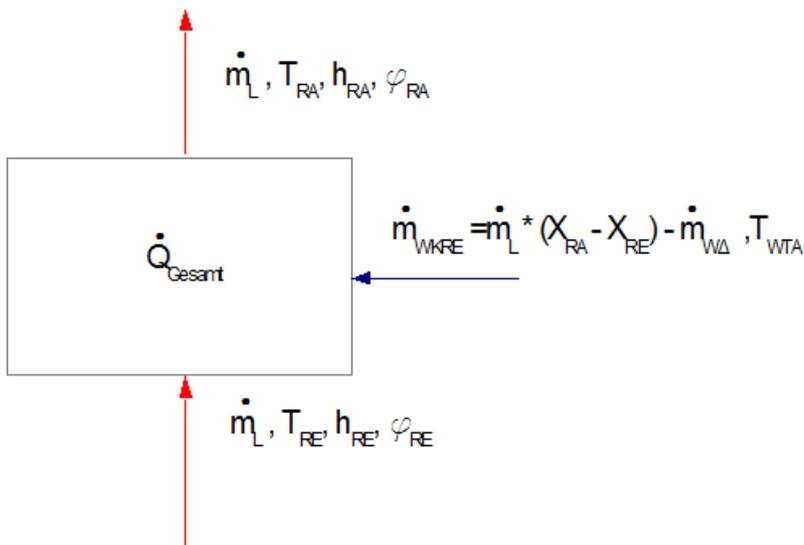
Die Enthalpie der ungesättigten feuchten Luft errechnet sich aus (2.15).

$$h_{1X}(T, \varphi) := c_{pL} \cdot (T - T_{Tr}) + X(T, p, \varphi) [\Delta h_{DTr} + c_{pD} \cdot (T - T_{Tr})] \quad (\text{A.76})$$

Und die Enthalpie der gesättigten feuchten Luft aus (2.16).

$$h_{s1X}(T, X) := h_{1X}(T, 100\%) + (X - X(T, p, 100\%)) \cdot c_{pWasser} \cdot (T - T_{Tr}) \quad (\text{A.77})$$

Die grafische Darstellung für den Luftmassenstrom zur Erstellung der Bilanz :



Anhang

Die Temperatur der Luft beim Reaktoraus- bzw. Eingang beträgt:

$$T_{RA} := 53.9 \text{ °C} \quad (\text{A.78})$$

$$T_{RE} = 37.525 \text{ °C} \quad (\text{A.60})$$

Das Kondensat, welches vom Wärmetauscher in den Reaktor zurückgeleitet wird, hat eine Temperatur von:

$$T_{WTA} := 40 \text{ °C} \quad (\text{A.79})$$

Die Luftfeuchte im Eingang bzw. Ausgang beträgt:

$$\varphi_{RE} := 100\% \quad (\text{A.80})$$

$$\varphi_{RA} := 100\% \quad (\text{A.81})$$

Dadurch ergeben sich die Enthalpien mit (4.76) zu:

$$h_{RE} := h_{1x}(T_{RE}, \varphi_{RE}) = 1.482 \times 10^5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.82})$$

$$h_{RA} := h_{1x}(T_{RA}, \varphi_{RA}) = 3.387 \times 10^5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.83})$$

Der benötigte Luftmassenstrom, um die Wärme zu entziehen, beträgt:

$$m_{oL} := \frac{Q_{oGesamt} - m_{oW\Delta} \cdot c_{pWasser} \cdot (T_{WTA} - T_{Tr})}{h_{RA} - h_{RE} - (T_{WTA} - T_{Tr}) \cdot c_{pWasser} \cdot (X(T_{RA}, p, \varphi_R) - X(T_{RE}, p, \varphi_R))} = 0.035 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.84})$$

Die benötigte Menge Wasserkondensat beträgt:

$$m_{oWKRE} := m_{oL} \cdot (X(T_{RA}, p, \varphi_R) - X(T_{RE}, p, \varphi_R)) - m_{oW\Delta} = 1.666 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.85})$$

Und die zur Verfügung stehende Menge ist:

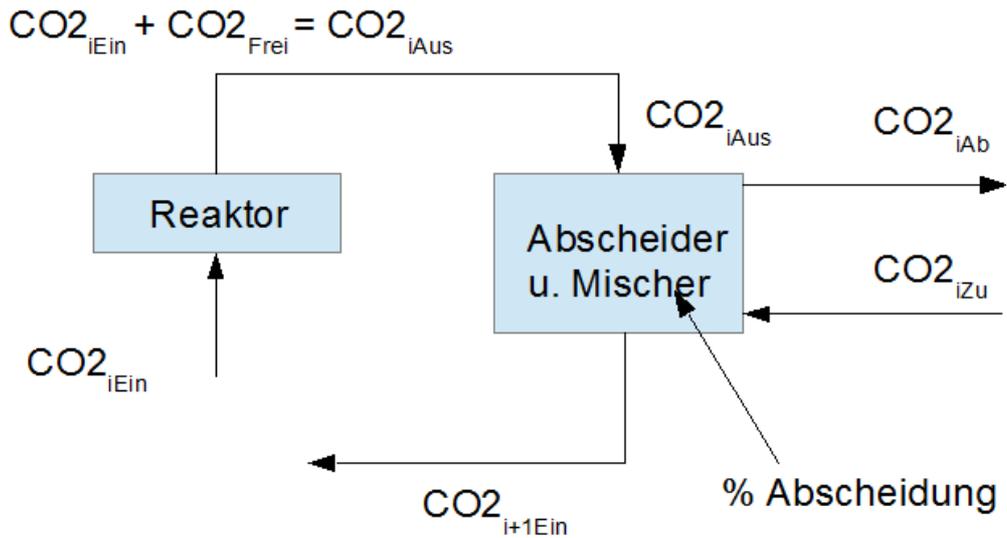
$$m_{oKondensatWT} := m_{oL} \cdot (X(T_{RA}, p, \varphi_R) - X(T_{WTA}, p, \varphi_R)) = 2.08 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} > m_{oWKRE} \quad (\text{A.86})$$

Dies ist größer als (A.85), daher muss Kondensat abgeschieden werden.

5. Sauerstoff und Kohlendioxidgehalt der feuchten zirkulierenden Luft

Aufgrund des verbrauchten Sauerstoffes und des freiwerdenden Kohlendioxids muss ständig neue Luft der zirkulierenden Luft beigemischt werden. Dies erfolgt, indem zuerst diejenige Menge an Luft abgeschieden und dann frische Umgebungsluft beigemischt wird.

Ermitteln des CO₂ Austausches:



Massenanteil an CO₂ in der Umgebungsluft: $\xi_{CO2U} := 0.058\%$ (A.87)

Massenanteil an O₂ in der Umgebungsluft: $\xi_{O2U} := 23.135\%$ (A.88)

Verbrauchter Sauerstoff:

$$m_{6O2Gebunden} := m_R \cdot \frac{\xi_{6O2AbbauGesamt}}{\Delta t} = 4.274 \times 10^{-4} \frac{kg}{s} \quad (A.89)$$

Umgewandeltes Kohlendioxid:

$$m_{6CO2Frei} := \frac{m_R \cdot \xi_{6CO2AbbauGesamt}}{\Delta t} = 5.878 \times 10^{-4} \frac{kg}{s} \quad (A.90)$$

Anhang

Ermitteln des sich einstellenden CO₂ Gehaltes

$$\begin{aligned}
 \text{Massestrom trockene Luft im Reaktor} & \quad m_{0L} = 0.035 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\
 \text{CO}_2 \text{ in der Luft} & \quad \xi_{\text{CO}_2\text{U}} = 0.058 \cdot \% \\
 \text{Im Reaktor frei werdendes CO}_2 & \quad m_{06\text{CO}_2\text{Frei}} = 5.878 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\
 \text{Massenabscheidung} & \quad A_{\%} := 15\% \quad (\text{A.91})
 \end{aligned}$$

$$\text{Anfangsmasse an CO}_2 \text{ in der Luft} \quad m_{6\text{CO}_2_0} := \xi_{\text{CO}_2\text{U}} \cdot m_{0L} = 2.016 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.92})$$

$$n := 1..300 \quad (\text{A.93})$$

$$m_{6\text{CO}_2_n} := \left(m_{6\text{CO}_2_{n-1}} + m_{06\text{CO}_2\text{Frei}} \right) (1 - A_{\%}) + \left(\xi_{\text{CO}_2\text{U}} \cdot m_{0L} \cdot A_{\%} \right) \quad (\text{A.94})$$

$$m_{6\text{CO}_2_1} = 5.198 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m_{6\text{CO}_2_2} = 9.445 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m_{6\text{CO}_2_{12}} = 2.877 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m_{6\text{CO}_2_{50}} = 3.35 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m_{6\text{CO}_2_{100}} = 3.351 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m_{6\text{CO}_2_{300}} = 3.351 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.95})$$

$$\text{Der sich einstellende CO}_2 \text{ Gehalt der Luft: } \frac{m_{6\text{CO}_2_{300}}}{m_{0L}} = 9.641 \cdot \% \quad (\text{A.96})$$

Ermitteln des sich einstellenden O₂ Gehaltes

$$\text{Sauerstoff in der Umgebung} \quad \xi_{\text{O}_2\text{U}} = 23.135 \cdot \%$$

$$\text{Anfangsmasse an Sauerstoff in der Luft: } m_{6\text{O}_2_0} := \xi_{\text{O}_2\text{U}} \cdot m_{0L} = 8.041 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.97})$$

$$n := 1..300 \quad (\text{A.98})$$

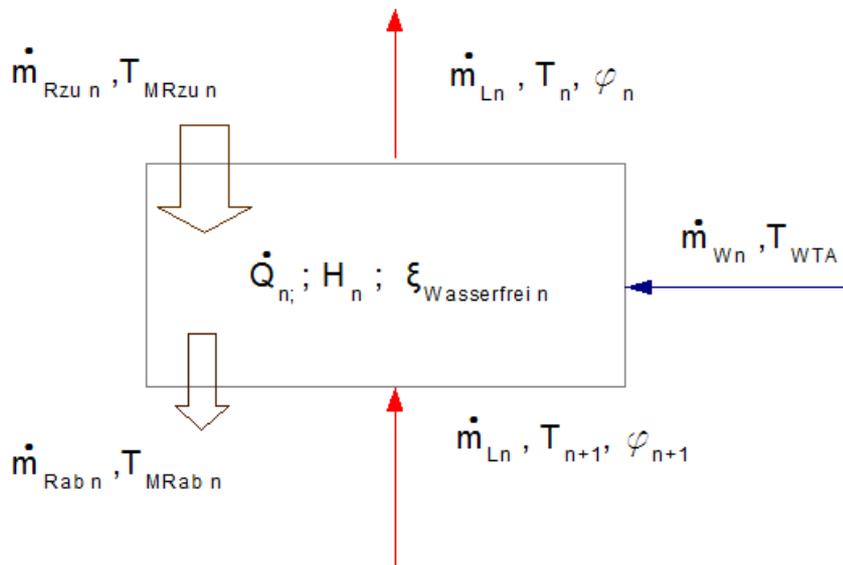
$$m_{6\text{O}_2_n} := \left(m_{6\text{O}_2_{n-1}} - m_{06\text{O}_2\text{Gebunden}} \right) (1 - A_{\%}) + \left(\xi_{\text{O}_2\text{U}} \cdot m_{0L} \cdot A_{\%} \right) \quad (\text{A.99})$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{6O2_1} &= 7.678 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\
 \dot{m}_{6O2_2} &= 7.369 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\
 \dot{m}_{6O2_{12}} &= 5.964 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\
 \dot{m}_{6O2_{50}} &= 5.62 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\
 \dot{m}_{6O2_{100}} &= 5.62 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\
 \dot{m}_{6O2_{300}} &= 5.62 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}
 \end{aligned} \tag{A.100}$$

Der sich einstellende Sauerstoffgehalt: $\frac{\dot{m}_{6O2_{300}}}{\dot{m}_{O_2}} = 16.167\%$ (A.101)

6. Ermitteln der Parameter in den einzelnen Stufen des Reaktors:

Um die einzelnen Parameter in den Stufen zu errechnen, muss iteriert werden, da einerseits die Eingangstemperatur der Luft sich aus der vorherigen Stufe ergibt, andererseits aber das Rottegut mit einer bestimmten Temperatur von oben nach unten befördert wird.



Anhang

Das benötigte Kondensat aus dem Wärmetauscher in der jeweiligen Stufe ergibt sich aus:

$$m_{WStufe}(T_A, T_E, \xi_{WasserfreiStufe}, m_{Rzu}, m_{Rab}) := m_{oL} \cdot (X(T_A, p, 100\%) - X(T_E, p, 100\%)) \cdot \Delta t \dots \quad (A.102)$$

$$+ \left[m_R \cdot \xi_{WasserfreiStufe} + \frac{1}{\frac{1}{x_W} - 1} \cdot (m_{Rzu} - m_{Rab}) \right]$$

Die entstehende Wärmemenge in der Stufe errechnet sich aus:

$$Q_{Stufe}(h_{Stufe}, m_{Rzu}, T_{MRzu}, m_{Rab}, T_{MRab}) := \frac{m_R \cdot h_{Stufe} + \frac{m_{Rzu}}{1 - x_W} \cdot c_{pR} \cdot (T_{MRzu} - T_{Tr})}{\Delta t} \dots \quad (A.103)$$

$$+ \frac{\left[\frac{m_{Rab}}{1 - x_W} \cdot c_{pR} \cdot (T_{MRab} - T_{Tr}) \right]}{\Delta t}$$

Und der benötigte Luftmassenstrom in der jeweiligen Stufe ergibt sich aus: (A.104)

$$m_{LStufe}(Q_{Stufe}, m_{Wasserweg}, T_A, T_E) := \frac{Q_{Stufe} - m_{Wasserweg} \cdot c_{pWasser} \cdot (T_{WTA} - T_{Tr})}{h_{1x}(T_A, 100\%) - h_{1x}(T_E, 100\%) \dots + 0 - (T_{WTA} - T_{Tr}) \cdot \left(X(T_A, p, 100\%) \dots + 0 - X(T_E, p, 100\%) \right)} \cdot c_{pWasser}$$

Der erforderliche Luftmassenstrom beträgt:

$$m_{oL} = 0.035 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

An diesen wird der Luftmassenstrom der Stufen nahe genug angenähert.

1. Stufe

$$T_{Rzu} = 15.^\circ\text{C}$$

Temperatur der Oberseite:

$$T_1 := T_{RA} = 53.9.^\circ\text{C} \quad (A.105)$$

Temperatur der Unterseite:

$$T_2 := 49.82.^\circ\text{C} \quad (A.106)$$

$$m_{Rzu1} := m_R = 700 \text{ kg} \quad (A.107)$$

$$m_{Rab1} := m_{Rzu1} \cdot (1 - \xi_{C6H12O6Abbau1}) = 613.374 \text{ kg} \quad (A.108)$$

Anhang

Die Menge an Kondensat, welche in der Stufe zurückgebracht werden muss:

$$m_{W1} := m_{WStufe}(T_1, T_2, \xi_{6H_2OFrei1}, m_{Rzu1}, m_{Rab1}) = 336.407 \text{ kg} \quad (\text{A.109})$$

$$m_{oWStufe1} := \frac{m_{W1}}{\Delta t} = 5.562 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.110})$$

Die in Summe wegzubringende Menge an Wasser in der Stufe beträgt:

$$m_{oWStufe1weg} := \frac{m_R \cdot \xi_{6H_2OFrei1} + \frac{1}{\frac{1}{x_W} - 1} \cdot (m_{Rzu1} - m_{Rab1})}{\Delta t} = 2.292 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.111})$$

Die umgewandelte Wärmemenge in der ersten Stufe ist:

$$Q_1 := Q_{Stufe}(h_{G11.Stufe}, m_{Rzu1}, T_{Rzu}, m_{Rab1}, T_{MR}(T_1, T_2)) = 2.1 \times 10^3 \text{ W} \quad (\text{A.112})$$

Der Luftmassenstrom in der ersten Stufe beträgt:

$$m_{oL1} := m_{LStufe}(Q_1, m_{oWStufe1weg}, T_{RA}, T_2) = 0.0345 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.113})$$

2. Stufe

$$T_1 = 53.9 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 49.82 \cdot ^\circ\text{C} \quad T_3 := 48.035 \cdot ^\circ\text{C} \quad (\text{A.114})$$

$$m_{Rzu2} := m_{Rab1} = 613.374 \text{ kg} \quad (\text{A.115})$$

$$m_{Rab2} := m_R \cdot (1 - \xi_{C_6H_{12}O_6Abbau1} - \xi_{C_6H_{12}O_6Abbau2}) = 584.498 \text{ kg} \quad (\text{A.116})$$

$$m_{W2} := m_{WStufe}(T_2, T_3, \xi_{6H_2OFrei2}, m_{Rzu2}, m_{Rab2}) = 129.321 \text{ kg} \quad (\text{A.117})$$

$$m_{oWStufe2} := \frac{m_{W2}}{\Delta t} = 2.138 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.118})$$

$$m_{oWStufe2weg} := \frac{m_R \cdot \xi_{6H_2OFrei2} + \frac{1}{\frac{1}{x_W} - 1} \cdot (m_{Rzu2} - m_{Rab2})}{\Delta t} = 7.639 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.119})$$

$$Q_2 := Q_{Stufe}(h_{G12.Stufe}, m_{Rzu2}, T_{MR}(T_1, T_2), m_{Rab2}, T_{MR}(T_2, T_3)) = 791.871 \text{ W} \quad (\text{A.120})$$

$$m_{oL2} := m_{LStufe}(Q_2, m_{oWStufe2weg}, T_2, T_3) = 0.0349 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.121})$$

3. Stufe

$$T_3 = 48.035 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$m_{Rzu3} := m_{Rab2} = 584.498 \text{ kg} \quad (\text{A.122})$$

Anhang

$$m_{\text{Rab3}} := m_{\text{R}} \cdot (1 - \xi_{\text{C6H12O6Abbau1}} - \xi_{\text{C6H12O6Abbau2}} - \xi_{\text{C6H12O6Abbau3}}) = 509.422 \text{ kg} \quad (\text{A.123})$$

$$m_{\text{W3}} := m_{\text{WStufe}}(T_3, T_4, \xi_{\text{6H2OFrei3}}, m_{\text{Rzu3}}, m_{\text{Rab3}}) = 325.28 \text{ kg} \quad (\text{A.124})$$

$$m_{\text{0WStufe3}} := \frac{m_{\text{W3}}}{\Delta t} = 5.378 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.125})$$

$$m_{\text{0WStufe3weg}} := \frac{m_{\text{R}} \cdot \xi_{\text{6H2OFrei3}} + \frac{1}{\frac{1}{x_{\text{W}}} - 1} \cdot (m_{\text{Rzu3}} - m_{\text{Rab3}})}{\Delta t} = 1.986 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.126})$$

$$Q_3 := Q_{\text{Stufe}}(h_{\text{Gl3.Stufe}}, m_{\text{Rzu3}}, T_{\text{MR}}(T_2, T_3), m_{\text{Rab3}}, T_{\text{MR}}(T_3, T_4)) = 2.034 \times 10^3 \text{ W} \quad (\text{A.127})$$

$$m_{\text{0L3}} := m_{\text{LStufe}}(Q_3, m_{\text{0WStufe3weg}}, T_3, T_4) = 0.0348 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.128})$$

4. Stufe

$$T_{\text{RE}} = 37.525 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 42.5 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$m_{\text{Rzu4}} := m_{\text{Rab3}} = 509.422 \text{ kg} \quad (\text{A.129})$$

$$m_{\text{Rab4}} := m_{\text{R}} \cdot (1 - \xi_{\text{C6H12O6AbbauGesamt}}) = 457.446 \text{ kg} \quad (\text{A.130})$$

$$m_{\text{W4}} := m_{\text{WStufe}}(T_4, T_{\text{RE}}, \xi_{\text{6H2OFrei4}}, m_{\text{Rzu4}}, m_{\text{Rab4}}) = 216.539 \text{ kg} \quad (\text{A.131})$$

$$m_{\text{0WStufe4}} := \frac{m_{\text{W4}}}{\Delta t} = 3.58 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.132})$$

$$m_{\text{0WStufe4weg}} := \frac{m_{\text{R}} \cdot \xi_{\text{6H2OFrei4}} + \frac{1}{\frac{1}{x_{\text{W}}} - 1} \cdot (m_{\text{Rzu4}} - m_{\text{Rab4}})}{\Delta t} = 1.375 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.133})$$

(A.134)

$$Q_4 := Q_{\text{Stufe}}(h_{\text{Gl4.Stufe}}, m_{\text{Rzu4}}, T_{\text{MR}}(T_3, T_4), m_{\text{Rab4}}, T_{\text{MR}}(T_4, T_{\text{RE}})) = 1.416 \times 10^3 \text{ W}$$

$$m_{\text{0L4}} := m_{\text{LStufe}}(Q_4, m_{\text{0WStufe4weg}}, T_4, T_{\text{RE}}) = 0.035 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.135})$$

Anhang

Vergleich des Gesamten:

$$\dot{m}_{\text{WGesamtVergleich}} := \dot{m}_{\text{WStufe1}} + \dot{m}_{\text{WStufe2}} + \dot{m}_{\text{WStufe3}} + \dot{m}_{\text{WStufe4}} = 1.666 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.136})$$

$$\dot{m}_{\text{WGesamtFrei}} := \dot{m}_{\text{WStufe1weg}} + \dot{m}_{\text{WStufe2weg}} + \dot{m}_{\text{WStufe3weg}} + \dot{m}_{\text{WStufe4weg}} = 6.4 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.137})$$

$$\dot{m}_{\text{W}\Delta} = 6.417 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{\text{WKRE}} = 1.666 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

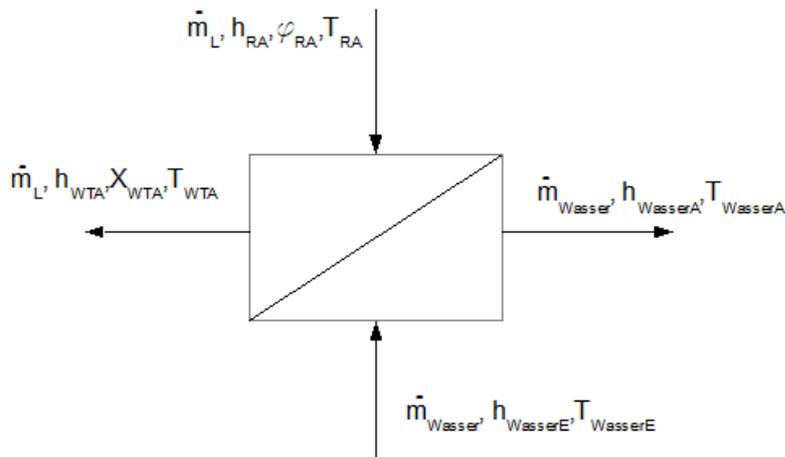
$$Q_{\text{GesamtVergleich}} := Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 6.342 \times 10^3 \text{ W} \quad (\text{A.138})$$

$$Q_{\text{Gesamt}} = 6.342 \times 10^3 \text{ W}$$

Würde das Kondensat in der Wärmemenge mit eingerechnet, ergäbe sich

$$Q_{\text{VGesamt2}} := \dot{m}_{\text{L}} \cdot (h_{1\text{x}}(T_{\text{RA}}, 100\%) - h_{1\text{x}}(T_{\text{RE}}, 100\%)) = 6.62 \times 10^3 \text{ W} \quad (\text{A.139})$$

7. Auslegung des Gegenstromwärmetauschers:



Anhang

Luft

$$T_{RA} = 53.9 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$T_{WTA} = 40 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$h_{RA} = 3.387 \times 10^5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$X_{RA} := X(T_{RA}, p, \varphi_{RA}) = 0.109 \quad (\text{A.142})$$

$$m_{WRA} := X(T_{RA}, p, \varphi_{RA}) m_{oL} = 3.802 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.143})$$

$$X_{WTA} := X_{RA} = 0.109 \quad (\text{A.144})$$

$$X_{sTA} := X(T_{WTA}, p, 100\%) = 0.05 \quad (\text{A.145})$$

$$m_{WTA} := m_{WRA} = 3.802 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.146})$$

$$h_{sTA} := (h_{s1x}(T_{WTA}, X_{WTA})) = 1.779 \times 10^5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.147})$$

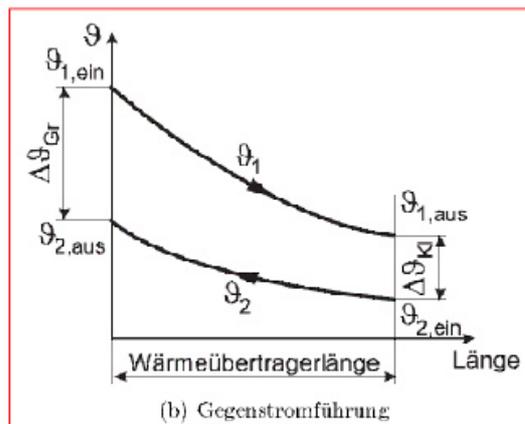
$$m_{WKondensat} := (X_{WTA} - X_{sTA}) \cdot m_{oL} = 2.078 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.148})$$

$$m_{oWasser} := \frac{m_{oL} \cdot (h_{RA} - h_{sTA})}{c_{pWasser} \cdot (T_{WasserA} - T_{WasserE})} = 0.134 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.149})$$

Wasser

$$T_{WasserE} := 30 \cdot ^\circ\text{C} \quad (\text{A.140})$$

$$T_{WasserA} := 40 \cdot ^\circ\text{C} \quad (\text{A.141})$$



Anhang

$$\Delta T_{Gr} := T_{RA} - T_{WasserA} = 13.9 \text{ K} \quad (\text{A.150})$$

$$\Delta T_{Kl} := T_{WTA} - T_{WasserE} = 10 \text{ K} \quad (\text{A.151})$$

$$\Delta T_m := \frac{\Delta T_{Gr} - \Delta T_{Kl}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{Gr}}{\Delta T_{Kl}}\right)} = 11.843 \text{ K} \quad (\text{A.152})$$

Als Wärmetauscher soll ein Schlangenkühler verwendet werden.

$$k = 20\text{-}60 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{vgl. VDI 2013, 3_7})$$

$$\text{Wärmedurchgangskoeffizient: } k_{\text{Schlangenkuehler}} = 60 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (\text{A.153})$$

$$\text{Durchmesser der Rohre } d_{WT} := 80 \text{ mm} \quad (\text{A.154})$$

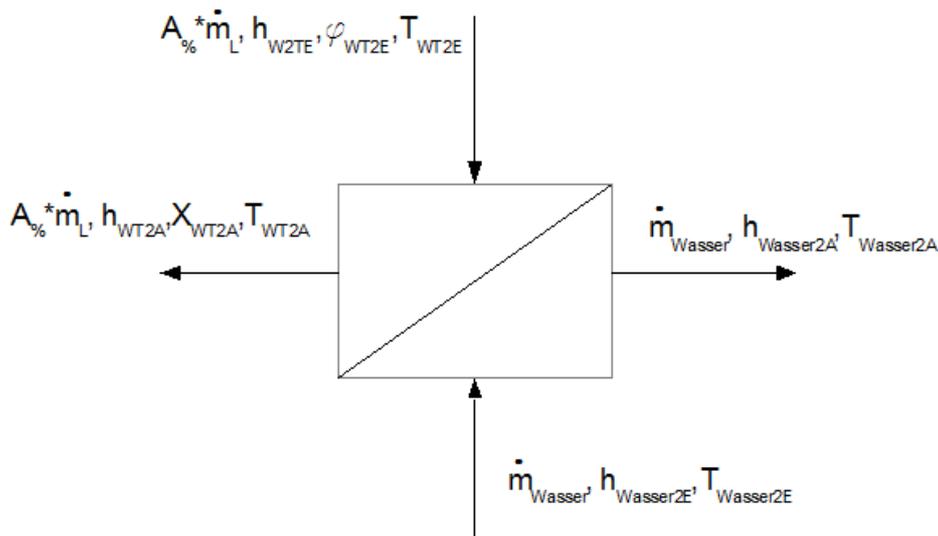
$$\text{erforderliche Fläche } A_{WT} := \frac{-m \cdot L \cdot (h_{sTA} - h_{RA})}{\Delta T_m \cdot k_{\text{Schlangenkuehler}}} = 7.864 \text{ m}^2 \quad (\text{A.155})$$

$$\text{erforderliche Länge } L_{WT} := \frac{A_{WT}}{d_{WT} \cdot 3.1415} = 31.29 \text{ m} \quad (\text{A.156})$$

8. Temperatur nach dem Tauscher

Wärmetauscher 2 (nicht im Konzept):

Anhang



Luft

$$T_{WT2E} := T_{WTA} = 40 \cdot ^\circ\text{C} \quad (\text{A.157})$$

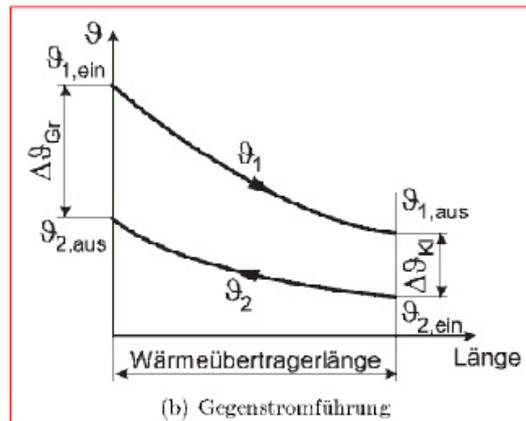
$$T_{WT2A} := 30 \cdot ^\circ\text{C} \quad (\text{A.159})$$

$$X_{WT2E} := X(T_{WT2E}, p, 100\%) = 0.05 \quad (\text{A.160})$$

Wasser

$$T_{Wasser2E} := 29.449 \cdot ^\circ\text{C} \quad (\text{A.158})$$

$$T_{Wasser2A} := \frac{\dot{m}_{Wasser} \cdot c_{pWasser} \cdot T_{Wasser2E} \dots + 0 - \dot{m}_L \cdot A_{\%} \cdot (h_{s1x}(T_{WT2A}, X_{WT2E}) - h_{1x}(T_{WT2E}, 100\%))}{\dot{m}_{Wasser} \cdot c_{pWasser}} = 30.051 \cdot ^\circ\text{C} \quad (\text{A.161})$$



Anhang

$$\Delta T_{Gr2} := T_{WT2E} - T_{Wasser2A} = 9.949 \text{ K} \quad (\text{A.162})$$

$$\Delta T_{K12} := T_{WT2A} - T_{Wasser2E} = 0.551 \text{ K} \quad (\text{A.163})$$

$$\Delta T_{m2} := \frac{\Delta T_{Gr2} - \Delta T_{K12}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{Gr2}}{\Delta T_{K12}}\right)} = 3.248 \text{ K} \quad (\text{A.164})$$

$$A_{WT2} := \frac{-m_{oL} \cdot (h_{s1x}(T_{WT2A}, X_{WT2E}) - h_{1x}(T_{WT2E}, 100\%)) \cdot A_{\%}}{\Delta T_{m2} \cdot k_{Schlangenkuehler}} = 1.725 \text{ m}^2 \quad (\text{A.165})$$

$$L_{WT2} := \frac{A_{WT2}}{d_{WT} \cdot 3.1415} = 6.863 \text{ m} \quad (\text{A.166})$$

Ermitteln der sich einstellende Temperatur nach dem Mischer:

Umgebungsluft:

$$T_U := 15 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{A.167})$$

$$\varphi_U := 80\% \quad (\text{A.168})$$

$$m_{oU} := A_{\%} \cdot m_{oL} = 5.214 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.169})$$

$$X(T_U, p, \varphi_U) = 8.612 \times 10^{-3} \quad (\text{A.170})$$

$$h_U := h_{1x}(T_U, \varphi_U) = 3.684 \times 10^4 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.171})$$

Eingang des Abscheiders

$$T_{AE} := T_{WTA} = 40 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{A.172})$$

$$\varphi_{AE} := 100\% \quad (\text{A.173})$$

$$h_{AE} := h_{1x}(T_{AE}, 100\%) = 1.679 \times 10^5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.174})$$

$$m_{oAE} := (1 - A_{\%}) \cdot m_{oL} = 0.03 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{A.175})$$

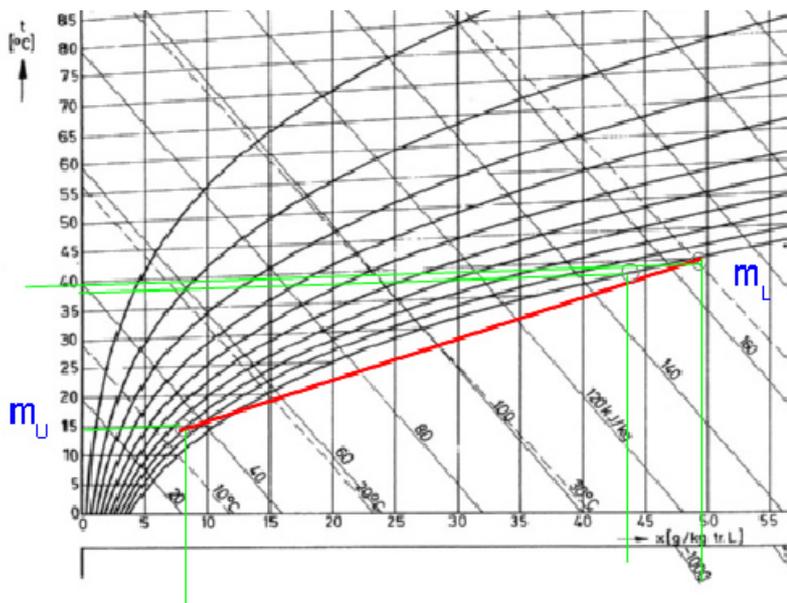
Anhang

Gemisch:

$$X_{\text{Gemisch}} := A\% \cdot X(T_U, p, \varphi_U) + (1 - A\%) X(T_{AE}, p, \varphi_{AE}) = 0.043449 \quad (\text{A.176})$$

$$h_{\text{Gemisch}} := \frac{m_{O_U} \cdot h_U + m_{O_{AE}} \cdot h_{AE}}{m_{O_U} + m_{O_{AE}}} = 1.483 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.177})$$

Im hx Diagramm ist ersichtlich, dass das Gemisch sich im übersättigten Gebiet befindet. Daher wird die Temperatur durch Annäherung an die Enthalpie ermittelt.



$$T_{\text{Gemisch}} := 37.525 \text{ °C} \quad (\text{Annäherung}) \quad (\text{A.178})$$

$$h_{\text{Gemisch}} = 1.483 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.177})$$

$$h_{s1x}(T_{\text{Gemisch}}, X_{\text{Gemisch}}) = 1.483 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.179})$$

Dies entspricht der Enthalpie, welche in den Reaktor geht.

9. Druckverlust der Schüttung

Die erforderliche Kaminhöhe wird ermittelt, damit aufgrund der thermischen Konvektion ein Naturluftzug entsteht. Dabei wird nur der Druckverlust der Schüttung beachtet.

Die Gastkonstante der feuchten Luft

$$p_0 := 1 \text{ bar} \quad (\text{A.180})$$

$$R_f(\varphi, T) := \frac{R_L}{1 - \varphi \cdot \frac{p_s(T)}{p_0} \cdot \left(1 - \frac{R_L}{R_D}\right)} \quad (\text{A.181})$$

und die Dichte der feuchten Luft

$$\rho(R_f, T) := \frac{p_0}{R_f \cdot T} \quad (\text{A.182})$$

ergibt:

$$\rho(\varphi, T) := \frac{p_0}{\frac{R_L}{1 - \varphi \cdot \frac{p_s(T)}{p_0} \cdot \left(1 - \frac{R_L}{R_D}\right)} \cdot T} \quad (\text{A.183})$$

$$\rho_{RE} := \rho(100\%, T_{RE}) = 1.094 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (\text{A.184})$$

Die Fläche des Reaktors beträgt:

$$A_{\text{Reaktor}} := 2.5 \cdot \text{m}^2 \quad (\text{A.185})$$

Dadurch ergibt sich eine Geschwindigkeit von:

$$u_{\text{Reaktor}} := \frac{\dot{m}_L}{\rho_{RE} \cdot A_{\text{Reaktor}}} = 0.013 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{A.186})$$

Und damit die Leerrohrgeschwindigkeit:

$$v_L := u_{\text{Reaktor}} = 0.013 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{A.187})$$

Anhang

Als Annäherung an den Kompost wird mit den physikalischen Eigenschaften von Quarzsand und Split gerechnet, für welche es Werte aus dem VDI gibt.

	Split :		Quarzsand:	
Sauter Durchmesser	$d_{pSplit} := 6.4\text{mm}$	(A.188)	$d_{pQuarz} := 2.3\text{mm}$	(A.189)
Porosität:	$\Psi_{Split} := 0.47$	(A.190)	$\Psi_{Quarz} := 0.395$	(A.191)
Druckverlustformfaktor:	$\Phi_{DSplit} := 0.52$	(A.192)	$\Phi_{DQuarz} := 0.74$	(A.193)

kinematische Viskosität der Luft:

$$v_{Luft} := 14.8 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (\text{A.194})$$

Partikel-Reynolds-Zahl:

$$\text{Re}_{Split} := \frac{v_L \cdot d_{pSplit}}{\Psi_{Split} \cdot v_{Luft}} = 116.956 \quad (\text{A.195})$$

$$\text{Re}_{Quarz} := \frac{v_L \cdot d_{pQuarz}}{\Psi_{Quarz} \cdot v_{Luft}} = 50.011 \quad (\text{A.196})$$

Längenverhältnis:

$$\text{Lv}_{Split} := \left(\frac{0.95}{3 \sqrt{1 - \Psi_{Split}}} - 1 \right)^{-1} = 5.75 \quad (\text{A.197})$$

$$\text{Lv}_{Quarz} := \left(\frac{0.95}{3 \sqrt{1 - \Psi_{Quarz}}} - 1 \right)^{-1} = 8.114 \quad (\text{A.198})$$

EulerZahl für kugelige Partikel(Quarzsand):

$$A_{Quarz} := \frac{24}{\text{Re}_{Quarz}} \left[1 + 0.692 \left[\text{Lv}_{Quarz} + 0.5 (\text{Lv}_{Quarz})^2 \right] \right] \quad (\text{A.199})$$

$$B_{Quarz} := \frac{4}{\sqrt{\text{Re}_{Quarz}}} \left[1 + 0.12 (\text{Lv}_{Quarz})^{1.5} \right] \quad (\text{A.200})$$

$$C_{Quarz} := \left(0.4 + 0.891 \cdot \text{Lv}_{Quarz} \cdot \text{Re}_{Quarz}^{-0.1} \right) \quad (\text{A.201})$$

Anhang

$$Eu_{KP} := A_{Quarz} + B_{Quarz} + C_{Quarz} = 21.531 \quad (A.202)$$

Die Eulerzahl für nichtkugelige Partikeln(Split):

$$A_{Split} := \frac{24}{Re_{Split} \cdot \Phi_{DSplit}} \left[1 + 0.685 \left[Lv_{Split} + 0.5 (Lv_{Split})^2 \right] \right] \quad (A.203)$$

$$B_{Split} := \frac{4}{\sqrt{Re_{Split} \cdot \Phi_{DSplit}}} \left[1 + 0.289 (Lv_{Split})^{1.5} \right] \quad (A.204)$$

$$C_{Split} := \frac{1}{\Phi_{DSplit}} (0.4 + 0.514 \cdot Lv_{Split}) \quad (A.205)$$

$$Eu_{NKP} := A_{Split} + B_{Split} + C_{Split} = 23.714 \quad (A.206)$$

Der Druckverlust der Schüttung ergibt sich aus:

$$\Delta p_{Schüttung}(L, \rho_F, v_L, d_p, \psi, Eu) := L \cdot \frac{3}{4} \cdot \rho_F \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{d_p} \cdot \frac{1 - \psi}{\psi^2} \cdot Eu \quad (A.207)$$

Die Schütthöhe ergibt sich zu:

Die Dichte, welche im Rotteprozess zunimmt, wird in den jeweiligen Stufen gering angenommen. Dadurch vergrößert sich die Schütthöhe.

$$\rho_{R1} := 200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (A.208)$$

$$\rho_{R2} := 300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (A.209)$$

$$\rho_{R3} := 400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (A.210)$$

$$\rho_{R4} := 500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (A.211)$$

Anhang

Es werden die Starthöhen der Stufen im Rotteprozess herangezogen.

$$\text{Schütthöhe1} := \frac{\frac{m_R}{\rho_{R1}}}{A_{\text{Reaktor}}} = 1.4 \text{ m} \quad (\text{A.211})$$

$$\text{Schütthöhe2} := \frac{\frac{m_R \cdot (1 - \xi_{\text{C6H12O6Abbau}})}{\rho_{R2}}}{A_{\text{Reaktor}}} = 0.818 \text{ m} \quad (\text{A.212})$$

$$\text{Schütthöhe3} := \frac{\frac{m_R \cdot (1 - \xi_{\text{C6H12O6Abbau}} \cdot \xi_{\text{C6H12O6Abbau}})}{\rho_{R3}}}{A_{\text{Reaktor}}} = 0.584 \text{ m} \quad (\text{A.213})$$

$$\text{Schütthöhe4} := \frac{\frac{m_R \cdot (1 - \xi_{\text{C6H12O6Abbau}} \cdot \xi_{\text{C6H12O6Abbau}} \cdot \xi_{\text{C6H12O6Abbau}})}{\rho_{R4}}}{A_{\text{Reaktor}}} = 0.408 \text{ m} \quad (\text{A.214})$$

$$\text{Schütthöhe} := \text{Schütthöhe1} + \text{Schütthöhe2} + \text{Schütthöhe3} + \text{Schütthöhe4} = 3.21 \text{ m} \quad (\text{A.215})$$

Der Druckverlust, würde die Schüttung aus Split bestehen, beträgt:

$$\Delta p_{\text{VerlustSplit}} := \left(\Delta p_{\text{Schüttung}} \left(\text{Schütthöhe}, \rho_{\text{RE}}, v_L, d_{\text{pSplit}}, \psi_{\text{Split}}, E_{\text{uNKP}} \right) \right) = 3.78245 \text{ Pa} \quad (\text{A.216})$$

Und aus Quarzsand:

$$\Delta p_{\text{VerlustQuarz}} := \Delta p_{\text{Schüttung}} \left(\text{Schütthöhe}, \rho_{\text{RE}}, v_L, d_{\text{pQuarz}}, \psi_{\text{Quarz}}, E_{\text{uKP}} \right) = 15.444 \text{ Pa} \quad (\text{A.217})$$

Es besteht ein großer Unterschied zwischen den Druckverlusten von Split und Quarzsand. Der reale Druckverlust muss durch Feldversuche ermittelt werden.

Es wird die mittlere Dichte zur Berechnung des Druckes herangezogen.

Anhang

Die mittlere Dichte in den Stufen ergibt sich zu:

$$\rho_M(T_{\text{Eingang}}, T_{\text{Ausgang}}) := \frac{\rho(100\%, T_{\text{Eingang}}) + \rho(100\%, T_{\text{Ausgang}})}{2} \quad (\text{A.218})$$

Die Höhe der Stufen werden mit 2 Meter in den ersten zwei und einem Meter in der 3. und 4. Stufe angenommen.

Der benötigte Druckunterschied für Split und Quarzsand, damit sich die Reaktorgeschwindigkeit einstellt, wird gleich dem Druckverlust der durchströmten Schüttung angenommen, da die verschiedenen Geschwindigkeiten gering sind.

(A.219)

$$\Delta p_{\text{Split}} := \Delta p_{\text{VerlustSplit}} = 3.78245 \text{ Pa}$$

(A.220)

$$\Delta p_{\text{Quarz}} := \Delta p_{\text{VerlustQuarz}} = 15.444 \text{ Pa}$$

Die Kaminhöhe für Quarzsand: $Z_{\text{KaminQuarz}} := 17\text{m}$ (A.221)

Der Druck auf der Reaktorseite beträgt:

$$\text{Höhe der Stufen: } Z_1 := 2\text{m} \quad (\text{A.222}) \quad Z_3 := 1\text{m} \quad (\text{A.223})$$

$$Z_2 := 2\text{m} \quad (\text{A.224}) \quad Z_4 := 1\text{m} \quad (\text{A.225})$$

$$P_{\text{RQuarz}} := \left(\begin{array}{l} \rho_M(T_1, T_2) \cdot Z_1 \dots \\ + \rho_M(T_2, T_3) \cdot Z_2 \dots \\ + \rho_M(T_3, T_4) \cdot Z_3 \dots \\ + \rho_M(T_4, T_{\text{RE}}) \cdot Z_4 \end{array} \right) g + \rho(100\%, T_1) \cdot g \cdot Z_{\text{KaminQuarz}} = 228.67 \cdot \text{Pa} \quad (\text{A.226})$$

Der Druck auf der Kühlseite beträgt:

$$Z_{\text{WT}} := 4\text{m} \quad Z_{\text{Tauscher}} := 0.5\text{m} \quad (\text{A.227})$$

$$P_{\text{TQuarz}} := \rho_M(T_{\text{RA}}, T_{\text{WTA}}) \cdot g \cdot Z_{\text{WT}} \dots = 244.684 \cdot \text{Pa} \\ + \rho_M(T_{\text{WTA}}, T_{\text{Gemisch}}) \cdot g \cdot Z_{\text{Tauscher}} \dots \\ + \rho(100\%, T_{\text{Gemisch}}) \cdot g \cdot (Z_{\text{KaminQuarz}} + 1.5\text{m}) \quad (\text{A.228})$$

Dadurch errechnet sich der Druck zu:

$$\Delta p_{\text{Quarz}} := P_{\text{TQuarz}} - P_{\text{RQuarz}} = 16.014 \text{ Pa} \quad (\text{A.229})$$

Und die Kaminhöhe für Split: $Z_{\text{KaminSplit}} := 3\text{m}$ (A.230)

Anhang

$$P_{RSplit} := \left(\rho_M(T_1, T_2) \cdot Z_1 + \rho_M(T_2, T_3) \cdot Z_2 \dots \right) g + \rho(100\%, T_1) \cdot g \cdot Z_{KaminSplit} = 90.709 \cdot \text{Pa} \quad (\text{A.231})$$

$$P_{TSplit} := \rho_M(T_{RA}, T_{WTA}) \cdot g \cdot Z_{WT} + \rho_M(T_{WTA}, T_{Gemisch}) \cdot g \cdot Z_{Tauscher} \dots = 94.516 \cdot \text{Pa} \\ + \rho(100\%, T_{Gemisch}) \cdot g \cdot (Z_{KaminSplit} + 1.5\text{m}) \quad (\text{A.232})$$

$$\Delta p_{Split} := P_{TSplit} - P_{RSplit} = 3.807 \text{ Pa} \quad (\text{A.233})$$

10. Leistungen des gesamten Reaktors im Überblick

Die Leistung des Kompostes:

$$H_{oRzuT} := \frac{\frac{m_R}{1 - x_W} \cdot c_{pR} \cdot (T_{Rzu} - T_{Tr})}{\Delta t} = 93.514 \text{ W} \quad (\text{A.234})$$

$$H_{oRzuC} := \frac{m_R \cdot \left(\frac{\xi_{C.Rottegut}^{100\%}}{M_{6C}} \cdot h_{Gl} \right)}{\Delta t} = 1.527 \times 10^4 \text{ W} \quad (\text{A.235})$$

$$H_{oRzu} := H_{oRzuT} + H_{oRzuC} = 1.536 \times 10^4 \text{ W} \quad (\text{A.236})$$

$$H_{oRabT} := \frac{\frac{m_{Rab}}{1 - x_W} \cdot c_{pR} \cdot (T_{Rab} - T_{Tr})}{\Delta t} = 163.081 \text{ W} \quad (\text{A.237})$$

$$H_{oRabC} := \frac{m_R \cdot \left[\frac{\xi_{C.Rottegut} (1 - \xi_{C.AbbauStufenGesamt})}{M_{6C}} \cdot h_{Gl} \right]}{\Delta t} = 8.854 \times 10^3 \text{ W} \quad (\text{A.238})$$

$$H_{oRab} := H_{oRabC} + H_{oRabT} = 9.017 \times 10^3 \text{ W} \quad (\text{A.239})$$

$$H_{oRzu} - H_{oRab} = 6.342 \times 10^3 \text{ W} \quad (\text{A.240})$$

Die Leistung der Luft im Reaktor:

$$H_{oLRE} := m_{oL} \cdot h_{1x}(T_{RE}, \varphi_{RE}) = 5.151 \times 10^3 \text{ W} \quad (\text{A.241})$$

$$H_{oLRA} := m_{oL} \cdot h_{1x}(T_{RA}, \varphi_{RA}) = 1.177 \times 10^4 \text{ W} \quad (\text{A.242})$$

$$H_{oLRE} - H_{oLRA} = -6.62 \times 10^3 \text{ W} \quad (\text{A.243})$$

Und die Leistung des Kondensatrückflusses in den Reaktor:

$$H_{oWKRE} := m_{oWKRE} \cdot c_{pWasser} \cdot (T_{WTA} - T_{Tr}) = 278.605 \text{ W} \quad (\text{A.244})$$

Anhang

Die Leistungen im Wärmetauscher:

$$Ho_{LWTE} := Ho_{LRA} = 1.177 \times 10^4 \text{ W} \quad (\text{A.245})$$

$$Ho_{LWTA} := m_{oL} \cdot h_{s1x}(T_{WTA}, X_{RA}) = 6.184 \times 10^3 \text{ W} \quad (\text{A.246})$$

$$Ho_{KondensatWT} := m_{oKondensatWT} \cdot c_{pWasser} \cdot (T_{WTA} - T_{Tr}) = 347.5 \text{ W} \quad (\text{A.247})$$

$$Ho_{WTE} := m_{oWasser} \cdot c_{pWasser} \cdot (T_{WasserE} - T_{Tr}) = 1.676 \times 10^4 \text{ W} \quad (\text{A.248})$$

$$Ho_{WTA} := m_{oWasser} \cdot c_{pWasser} \cdot (T_{WasserA} - T_{Tr}) = 2.235 \times 10^4 \text{ W} \quad (\text{A.249})$$

Die Leistung, welche entnommen wird pro kg TM, beträgt:

$$(Ho_{WTA} - Ho_{WTE}) \cdot \frac{\Delta t}{m_R} = 4.828 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (\text{A.250})$$

Die Leistungen des Kondensates:

$$Ho_{KondensatWT} = 347.5 \text{ W} \quad (\text{A.251})$$

$$Ho_{KondensatReaktor} := m_{oWKRE} \cdot c_{pWasser} \cdot (T_{WTA} - T_{Tr}) = 278.605 \text{ W} \quad (\text{A.252})$$

$$Ho_{KondensatAbluss1} := Ho_{KondensatWT} - Ho_{KondensatReaktor} = 68.895 \text{ W} \quad (\text{A.253})$$

Die Leistungen beim Abscheider:

$$Ho_{LAE} := m_{oL} \cdot h_{1x}(T_{WTA}, 100\%) = 5.836 \times 10^3 \text{ W} \quad (\text{A.254})$$

$$Ho_{LAA} := m_{oL} \cdot h_{s1x}(T_{Gemisch}, X_{Gemisch}) = 5.154 \times 10^3 \text{ W} \quad (\text{A.255})$$

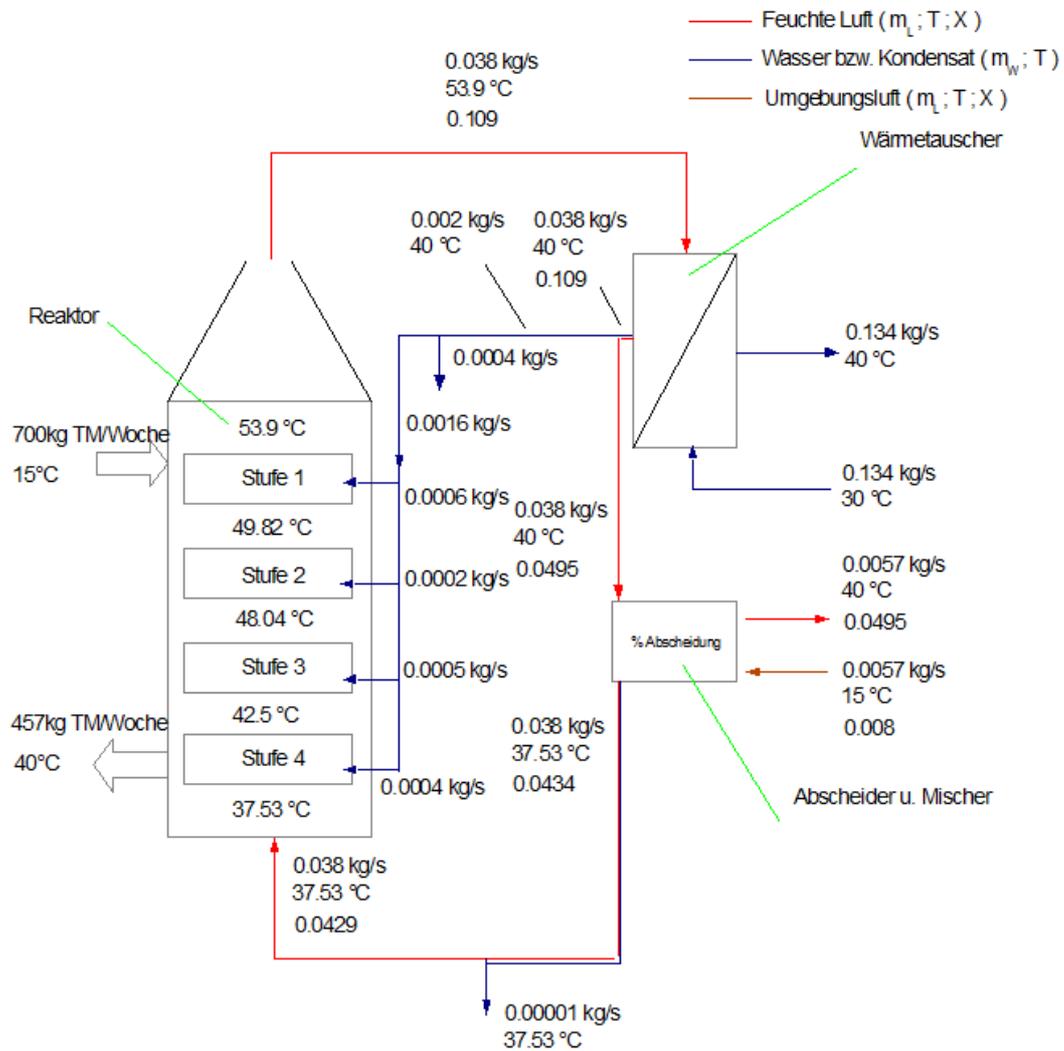
$$Ho_{LzuA} := m_{oL} \cdot A_{\%} \cdot h_{1x}(T_U, 80\%) = 192.069 \text{ W} \quad (\text{A.256})$$

$$Ho_{LabA} := m_{oL} \cdot A_{\%} \cdot h_{1x}(T_{WTA}, 100\%) = 875.464 \text{ W} \quad (\text{A.257})$$

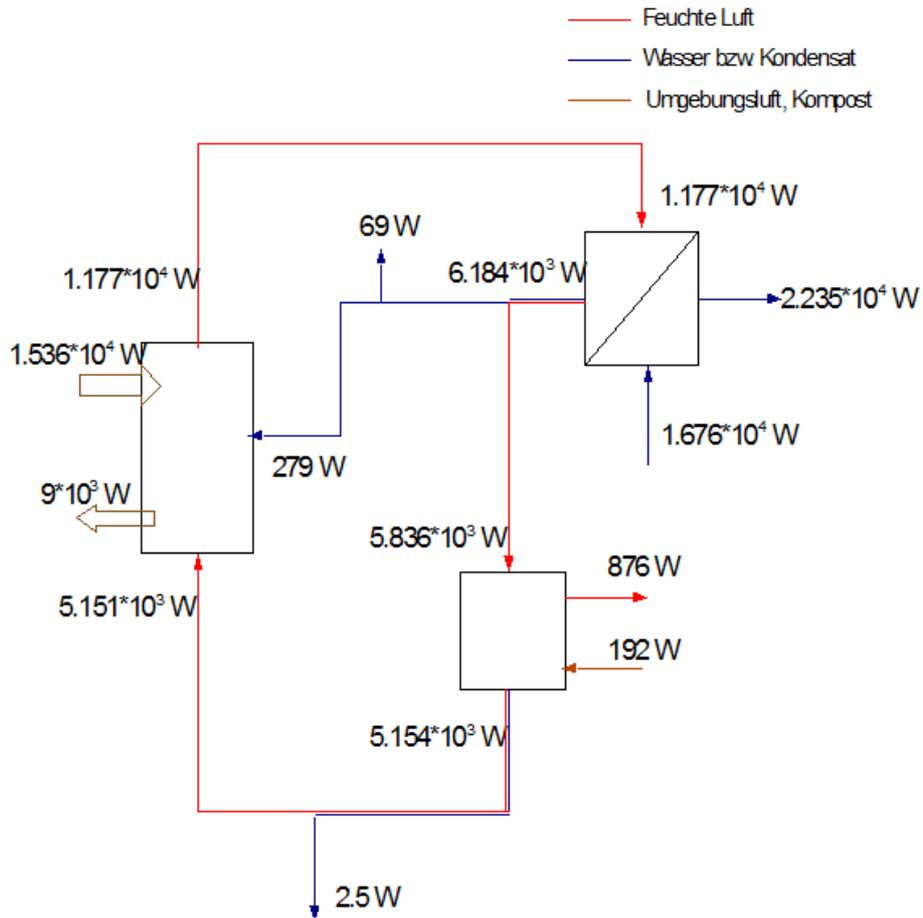
$$Ho_{KondensatAbluss2} := m_{oL} \cdot (X_{Gemisch} - X(T_{Gemisch}, p, 100\%)) \cdot [c_{pWasser} \cdot (T_{Gemisch} - T_{Tr})] = 2.5 \text{ W} \quad (\text{A.258})$$

Anhang

Gesamtreaktor Übersicht:



Enthalpie Übersicht



6.2 Ableitungen und Stücklisten

Hier ist nochmal die Tabelle 9 mit allen Zeichnungen und dazugehörigen Stücklisten aufgelistet.

Tabelle 10: Zeichnungen-Verzeichnis 2

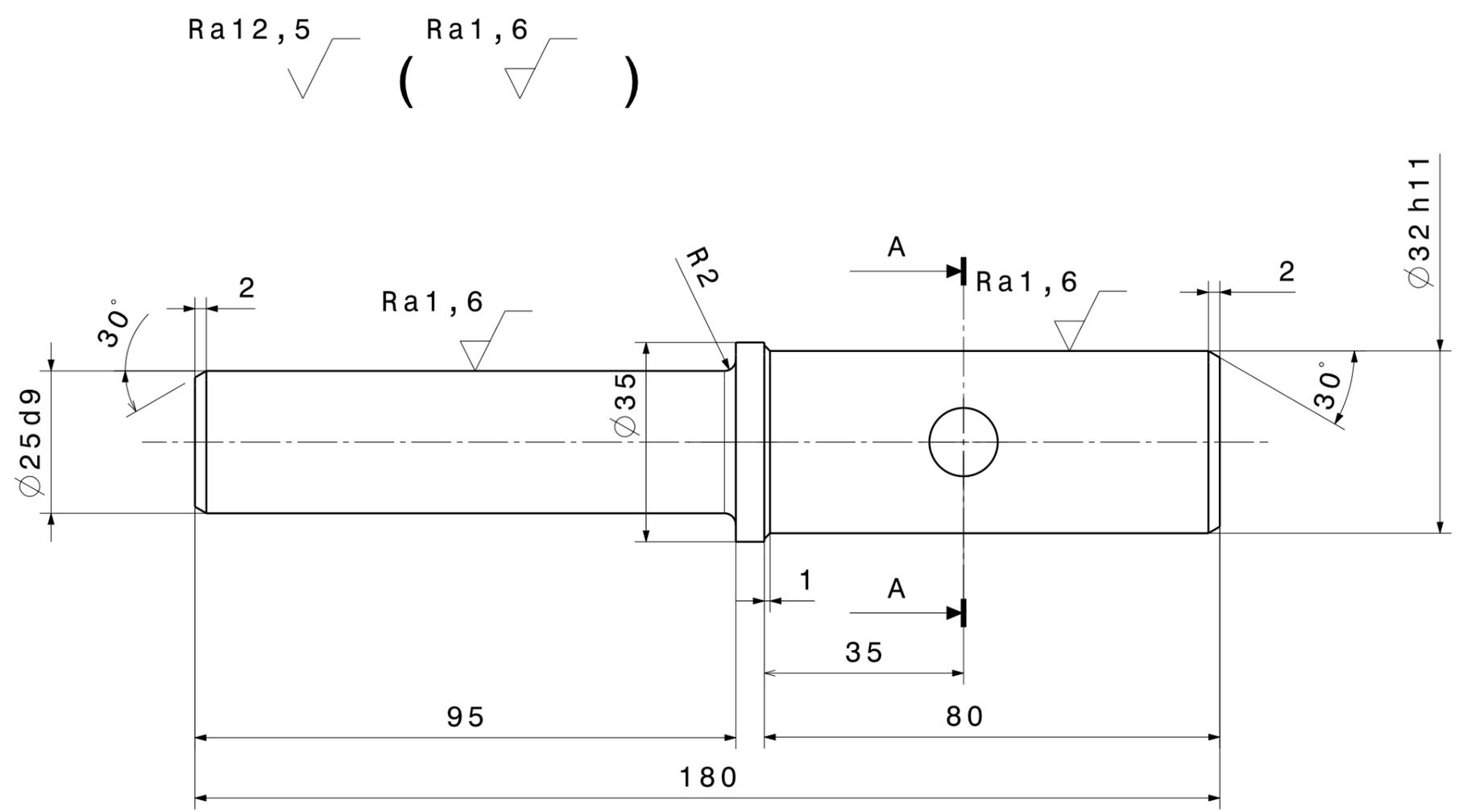
Nr.	Zeichnungstitel	Zeichnungsnummer
1	Welle Frei	1
2	Welle Antrieb	2
3	Kupplungsscheibe	3
4	Streuwelle	4
5	Platte Front	5
6	Platte Seite	6
7	Platte Front 2	7
8	Abdichtungsring	8
9	Baugruppe 1 (B1)	B1
10	Baugruppe 2 (B2)	B2
11	Baugruppe 3 (B3)	B3
12	Baugruppe 4 (B4)	B4
13	Baugruppe 5 (B5)	B5
14	Zusammenbau	B6

Anhang

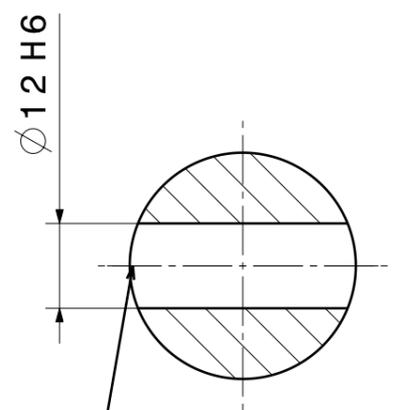
Zeichnungstitel:	Welle Frei
Zeichnungsnummer:	1

Teile- nummer	Men- ge	Ein- heit	Bezeich- nung	Nor- m	Abmes- sungen	Werk- stoff	Bemer- kung	Fir- ma	Bestell- nummer
1	1	Stk	Welle Frei			E335			

H G F E D C B A



SchnittA-A



gebohrt mit Kupplungsscheibe und Streuwelle (B3)

$\phi 32h11$	31,840	32,000
$\phi 25d9$	24,883	24,935
$\phi 12H6$	12,000	12,011
Passung	Mindestmaß	Höchstmaß

Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-1 grob		DASSAULT SYSTEMES		
DRAWN BY Peitl Michael		DRAWING TITLE Welle Frei		
DATE 30.04.2014	CHECKED BY	SIZE A3	DRAWING NUMBER 1	REV
DESIGNED BY	DATE	SCALE 1:1	WEIGHT (kg)	SHEET 1/1

H G B A

Anhang

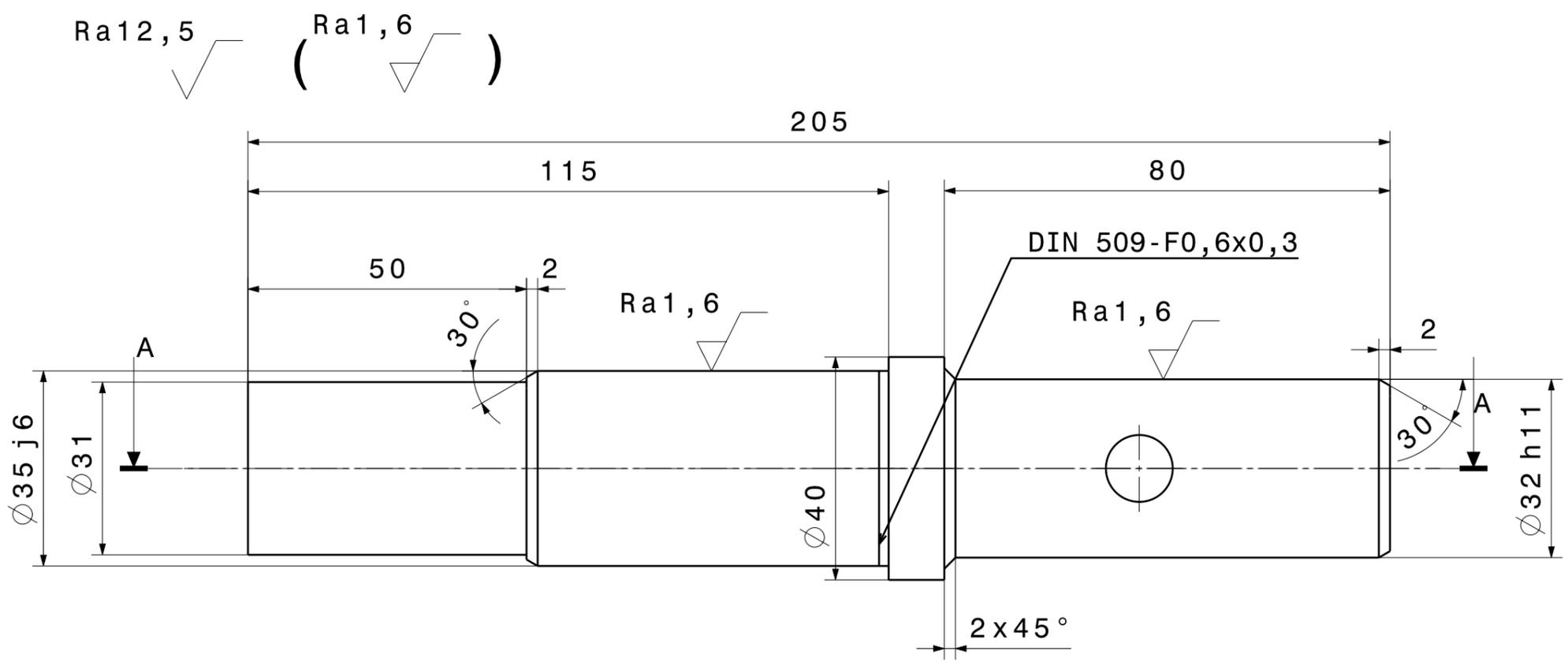
Zeichnungstitel:	Welle Antrieb
Zeichnungsnummer:	2

Teile- nummer	Men- ge	Ein- heit	Bezeich- nung	Nor- m	Abmes- sungen	Werk- stoff	Bemer- kung	Fir- ma	Bestell- nummer
2	1	Stk	Welle Antrieb			E335			

H G F E D C B A

4

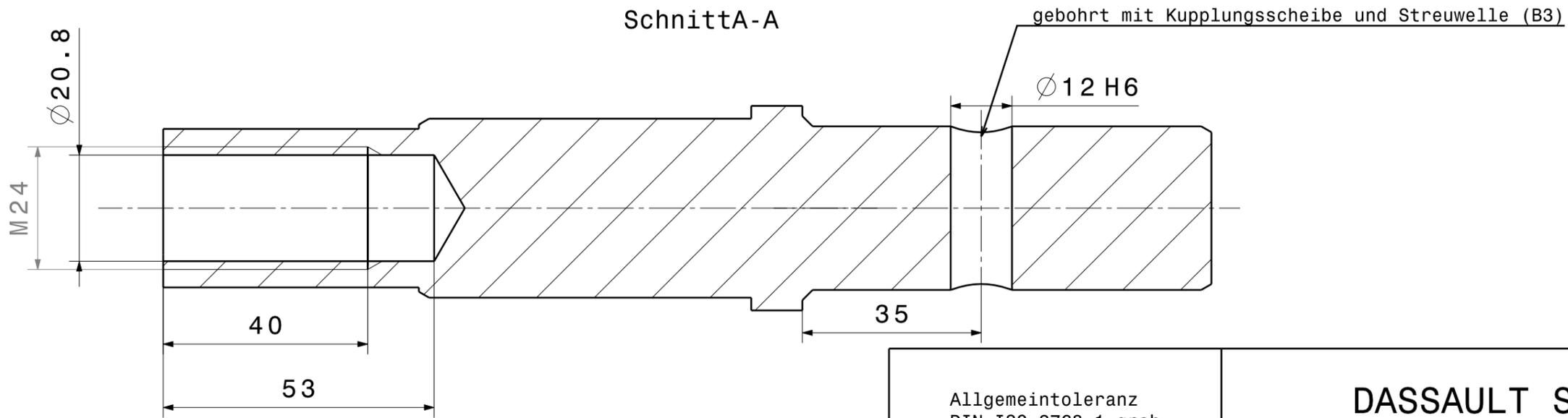
4



3

3

SchnittA-A



2

2

1

1

∅35j6	34,995	35,011
∅32h11	31,840	32,000
∅12H6	12,000	12,011
Passung	Mindestmaß	Höchstmaß

Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-1 grob		DASSAULT SYSTEMES			
DRAWING TITLE					
DRAWN BY Peitl Michael		DATE 30.04.2014		Welle Antrieb	
CHECKED BY		DATE		SIZE A3	DRAWING NUMBER 2
DESIGNED BY		DATE		SCALE 1:1	WEIGHT (kg)
				SHEET	1/1

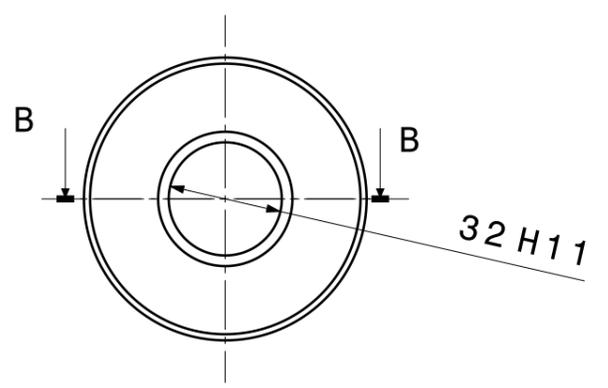
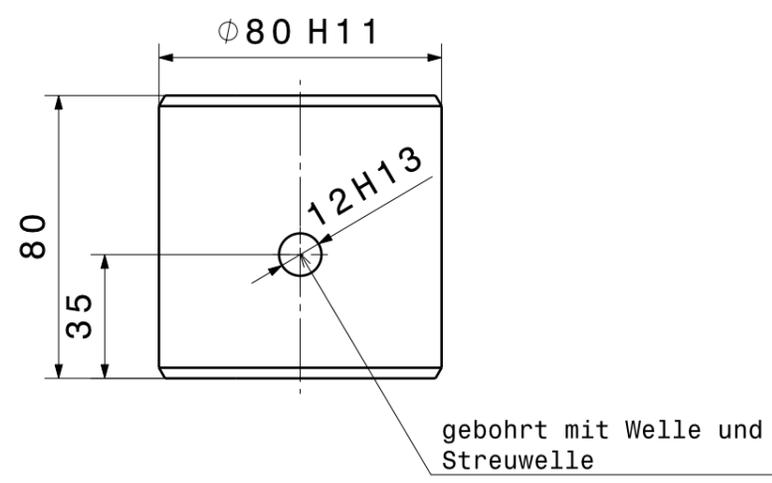
H G B A

Anhang

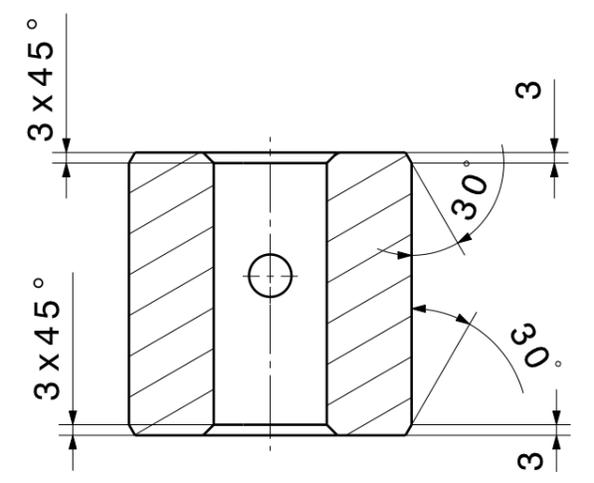
Zeichnungstitel:	Kupplungs- scheibe
Zeichnungsnummer:	3

Teile- nummer	Men- ge	Ein- heit	Bezeichnung	Nor- m	Abmes- sungen	Werk- stoff	Bemer- kung	Fir- ma	Bestell- nummer
3	1	Stk	Kupplungs- scheibe			POM			

Ra6,3



Schnitt B-B



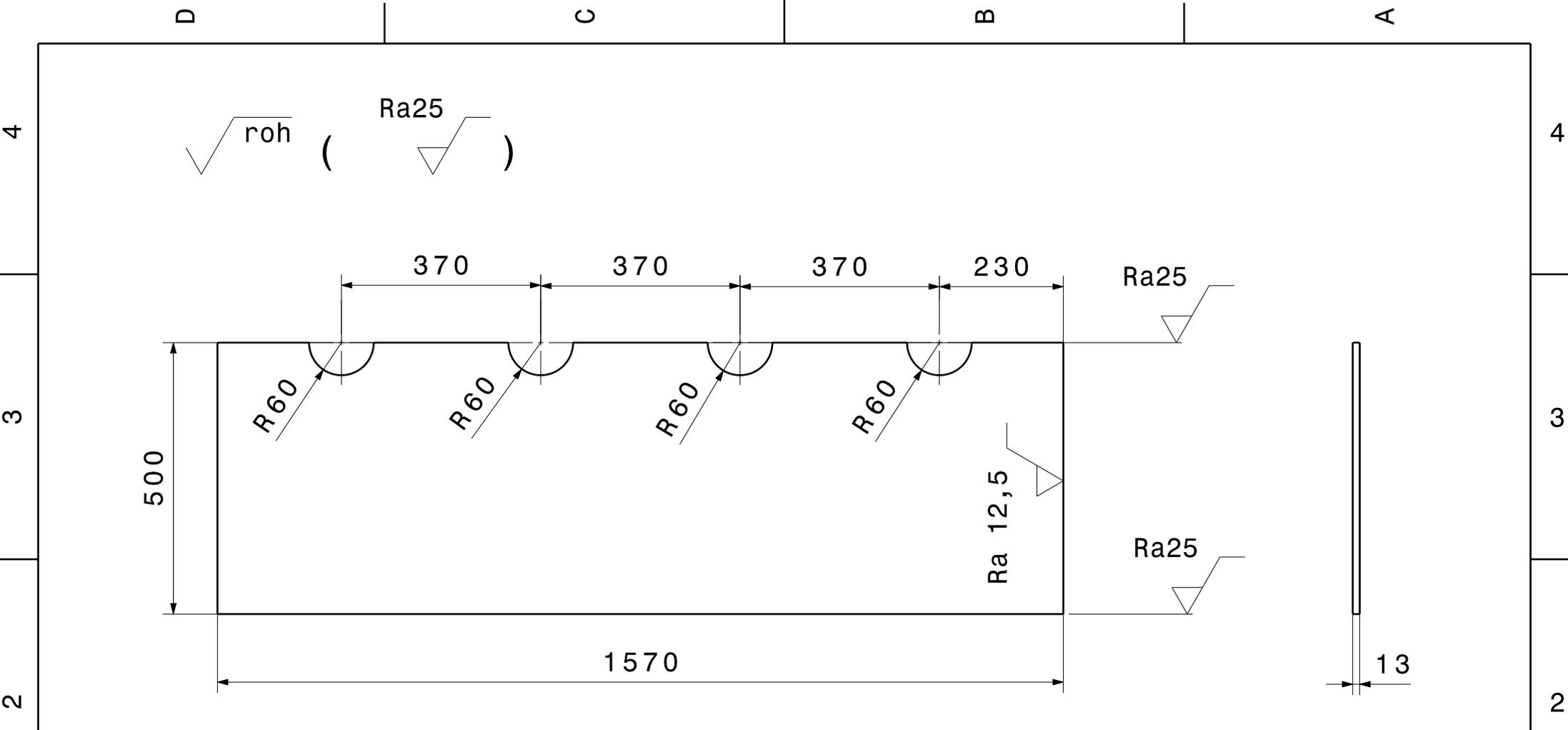
$\varnothing 80 H11$	80,000	80,190
$\varnothing 32 h11$	31,840	32,000
$\varnothing 12 H13$	12,000	12,270
Passung	Mindestmaß	Höchstmaß

Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-1 grob		DASSAULT SYSTEMES			
DRAWN BY Peitl Michael		DRAWING TITLE Kupplungsscheibe			
DATE 02.05.2014	CHECKED BY	SIZE A3	DRAWING NUMBER 3	REV	
DESIGNED BY	DATE	SCALE 1:2	WEIGHT (kg)	SHEET 1/1	

Anhang

Zeichnungstitel:	Platte Front
Zeichnungsnummer:	5

Teile- nummer	Men- ge	Ein- heit	Bezeich- nung	Nor- m	Abmes- sungen	Werk- stoff	Bemer- kung	Fir- ma	Bestell- nummer
13	1	Stk	Platte Front			Holz			



Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-1 grob		DASSAULT SYSTEMES		
DRAWING TITLE				
DRAWN BY Peitl Michael	DATE 30.04.2014	DRAWING NUMBER		
CHECKED BY	DATE	SIZE A4	5	REV
DESIGNED BY	DATE	SCALE	1:10	WEIGHT (kg)
			SHEET	1/1

Anhang

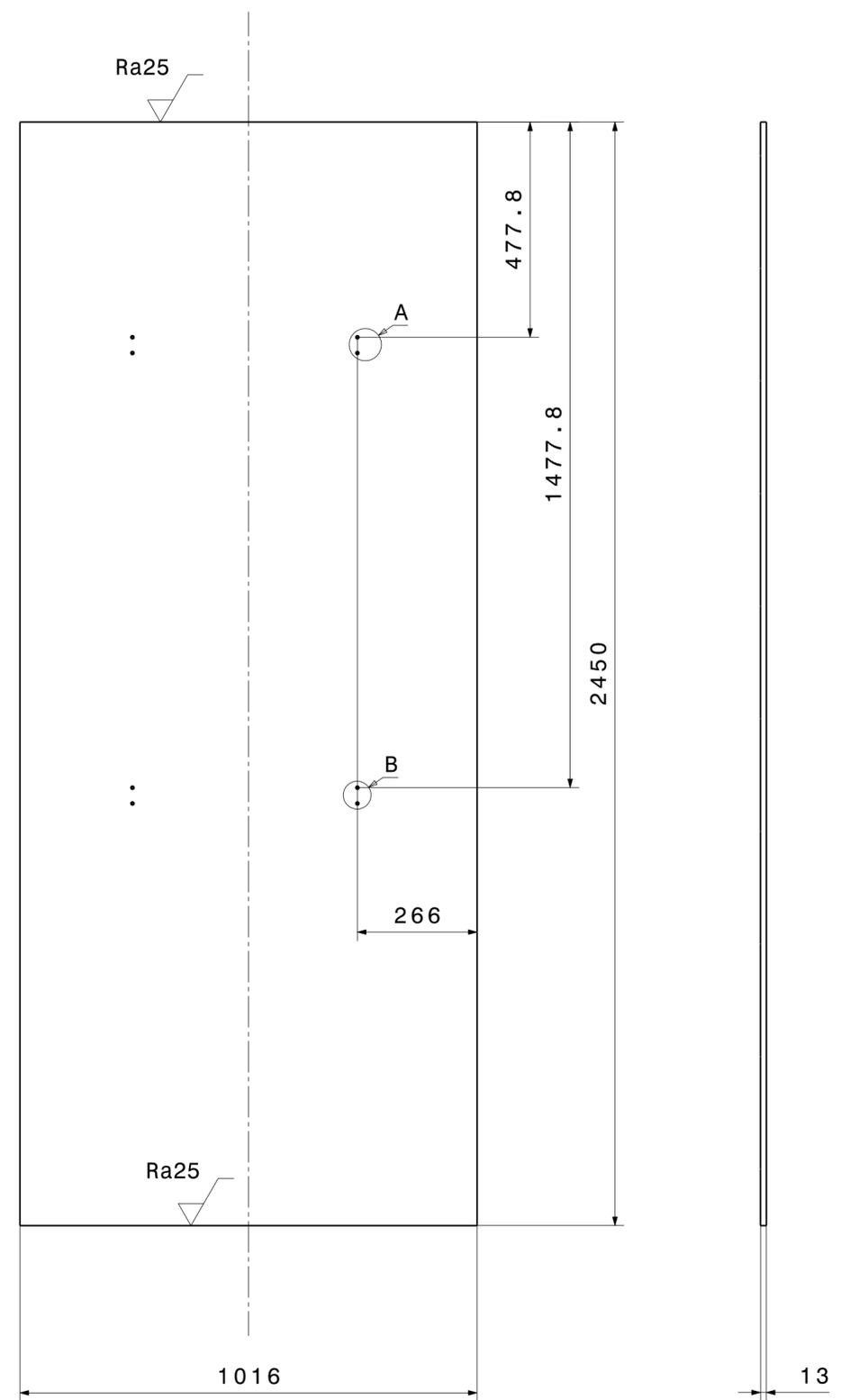
Zeichnungstitel:	Platte Seite
Zeichnungsnummer:	6

Teile- nummer	Men- ge	Ein- heit	Bezeich- nung	Nor- m	Abmes- sungen	Werk- stoff	Bemer- kung	Fir- ma	Bestell- nummer
14	1	Stk	Platte Seite		1016x2450 x13	Holz			

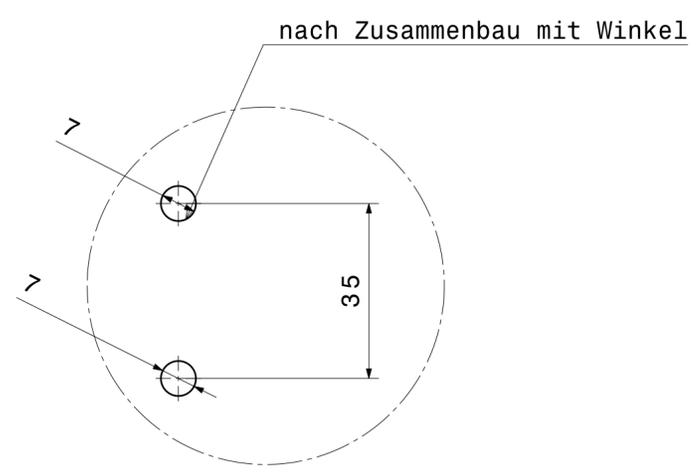
H G F E D C B A

8
7
6
5
4
3
2
1

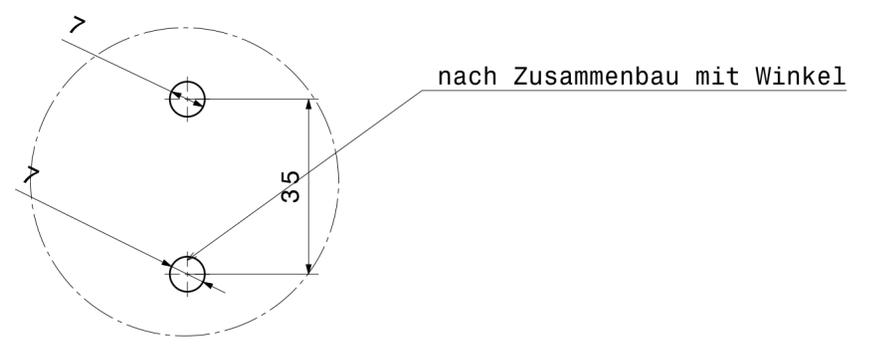
roh (Ra25)



Detail A
Maßstab: 1:1



Detail B
Maßstab: 1:1



Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-1 grob		DASSAULT SYSTEMES		
DRAWN BY Peitl Michael		DRAWING TITLE Platte Seite		
CHECKED BY	DATE 29.04.2014	SIZE A2	DRAWING NUMBER 6	REV
DESIGNED BY	DATE	SCALE 1:10	WEIGHT(kg)	SHEET 1/1

H G F E D C B A

Anhang

Zeichnungstitel:	Platte Front 2
Zeichnungsnummer:	7

Teile- nummer	Men- ge	Ein- heit	Bezeich- nung	Nor- m	Abmes- sungen	Werk- stoff	Bemer- kung	Fir- ma	Bestell- nummer
35	1	Stk	Platte Front 2			Holz			

D

C

B

A

4

4

roh (Ra25)

Ra25

1570

450

Ra25

3

3

13

2

2

Allgemeintoleranz
DIN ISO 2768-1 grob

DASSAULT SYSTEMES

DRAWING TITLE

DRAWN BY

DATE

Peitl Michael

05.05.2014

Platte Front 2

CHECKED BY

DATE

SIZE

DRAWING NUMBER

REV

A4

7

DESIGNED BY

DATE

SCALE

1:10

WEIGHT (kg)

SHEET

1/1

1

1

D

A

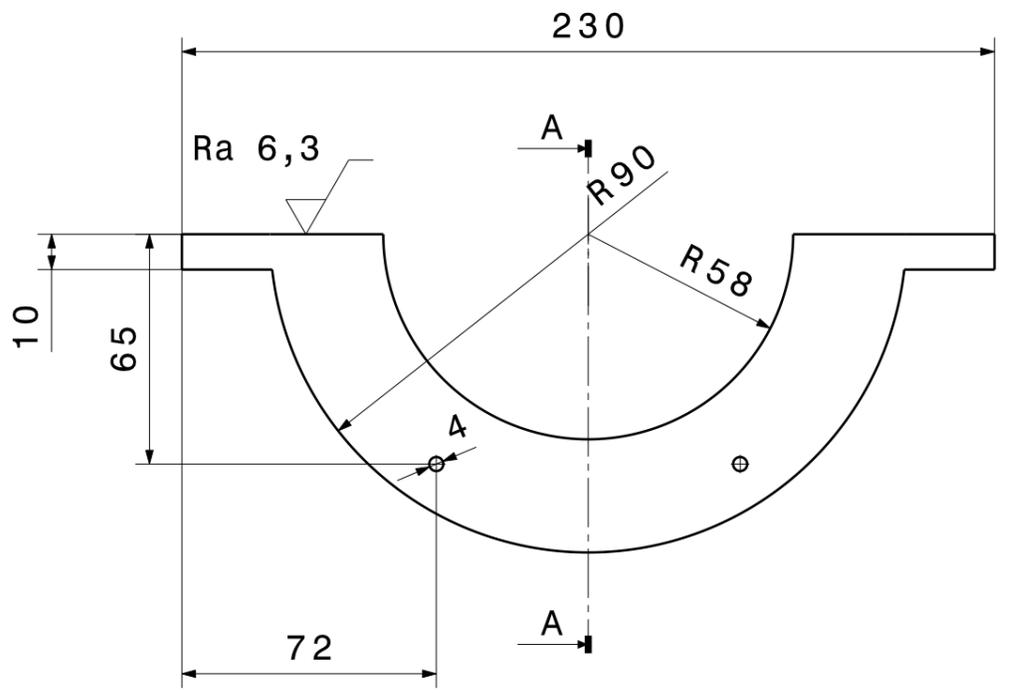
Anhang

Zeichnungstitel:	Abdichtungsring
Zeichnungsnummer:	8

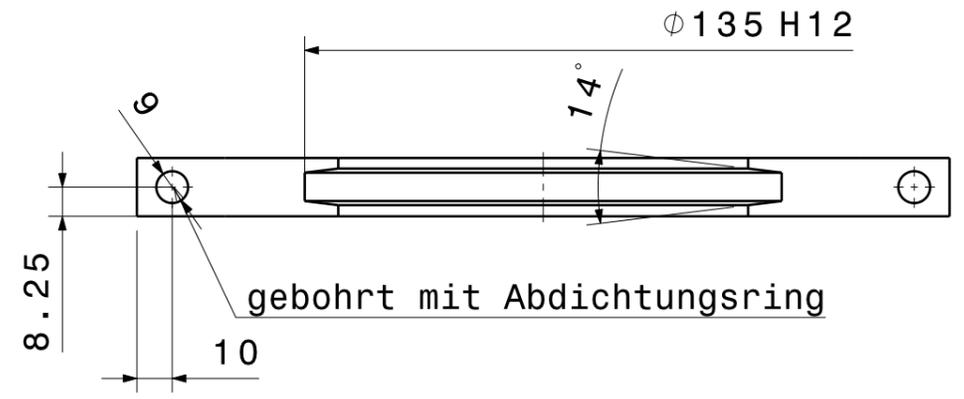
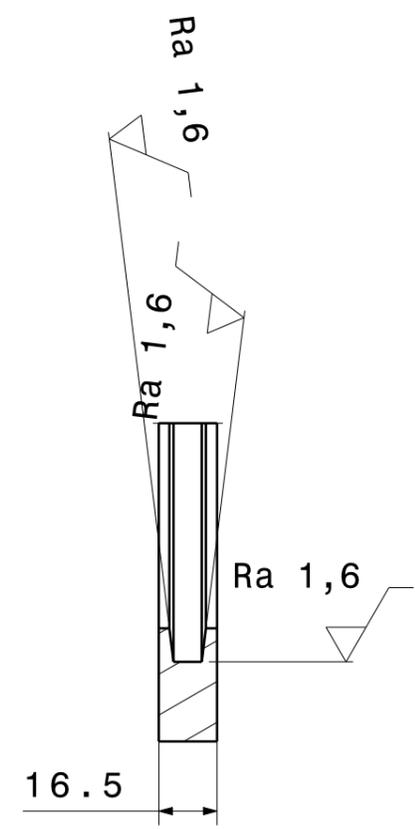
Teile- nummer	Men- ge	Ein- heit	Bezeich- nung	Nor- m	Abmes- sungen	Werk- stoff	Bemer- kung	Fir- ma	Bestell- nummer
12	1	Stk	Abdich- tungsring			Al			

H G F E D C B A

Ra 6,3 (Ra 1,6)



Schnitt A-A



$\phi 135H12$	135,00	135,400
Passung	Mindest maß	Höchst maß

Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-1 grob		DASSAULT SYSTEMES		
DRAWING TITLE				
DRAWN BY Peitl Michael	DATE 29.04.2014	SIZE A3	DRAWING NUMBER 8	REV
CHECKED BY	DATE	SCALE 1:2		SHEET 1/1
DESIGNED BY	DATE			

4
3
2
1

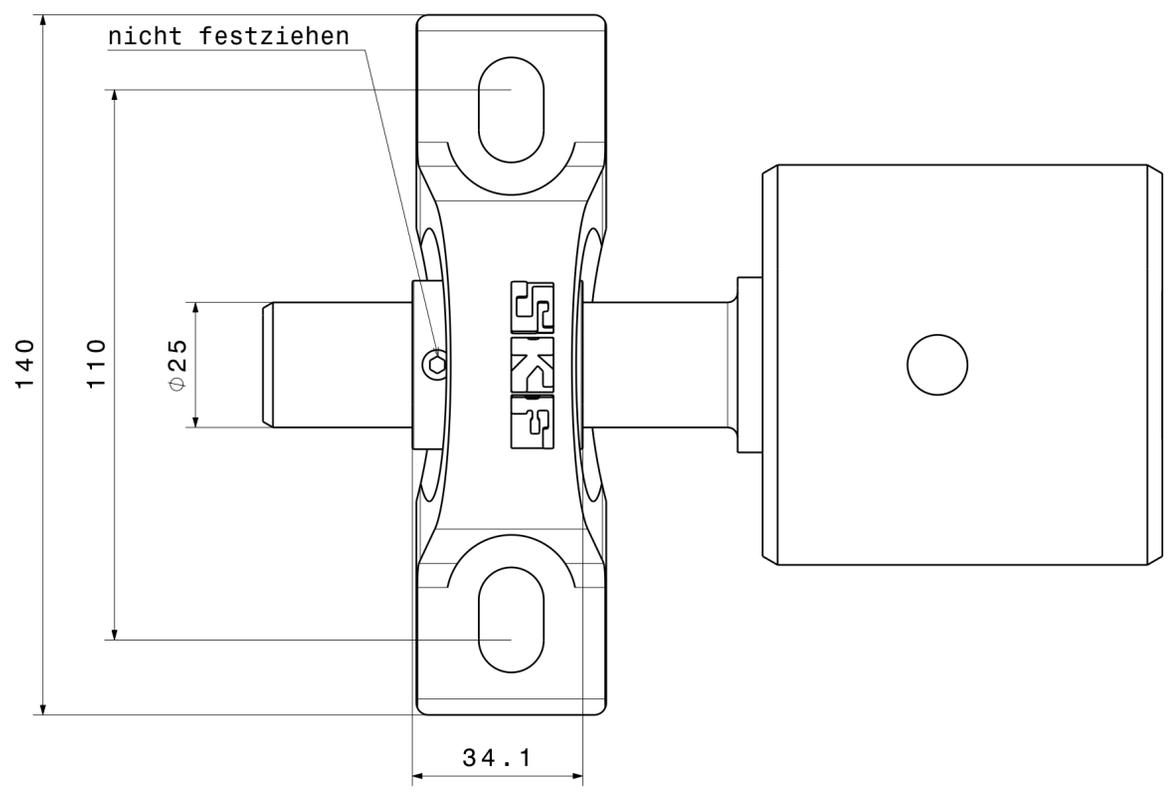
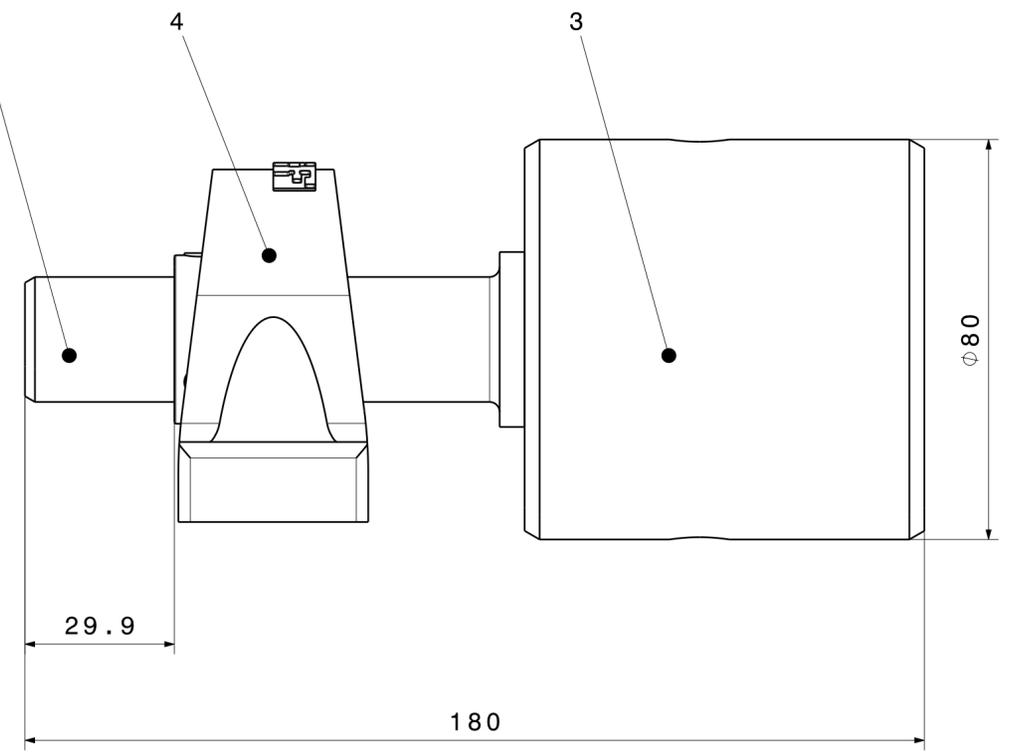
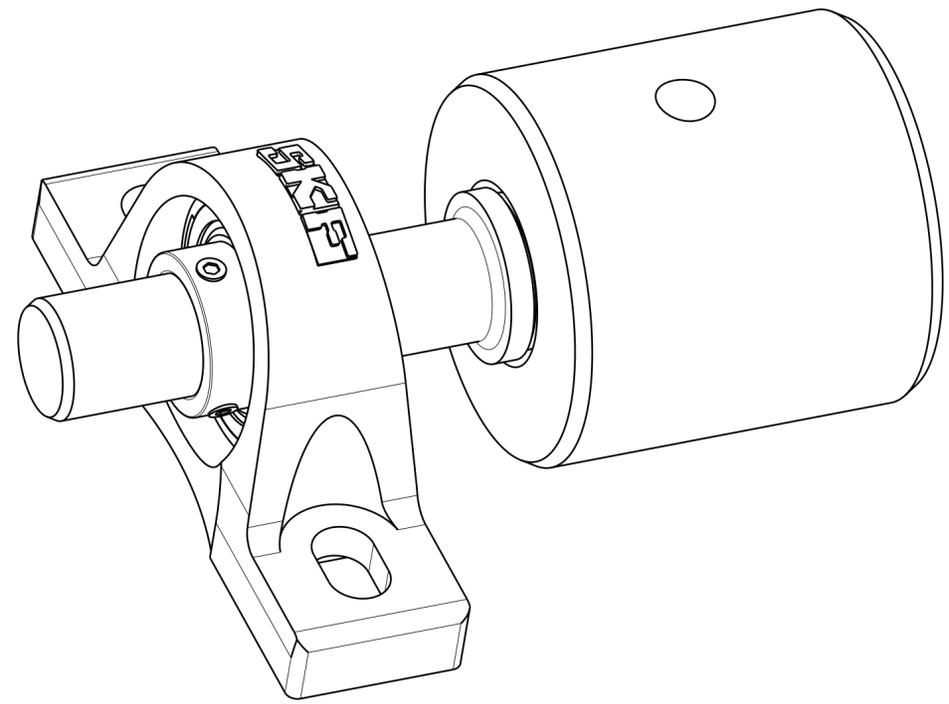
4
3
2
1

H G F E D C B A

Anhang

Baugruppe 1
Zeichnungstitel: (B1)
Zeichnungsnummer: B1

Teile- nummer	Men- ge	Ein- heit	Bezeichnung	Nor- m	Abmes- sungen	Werk- stoff	Bemer- kung	Fir- ma	Bestell- nummer
1	1	Stk	Welle Frei			E335			
3	1	Stk	Kupplungs- scheibe			POM			
4	1	Stk	Kugellager SKF 35					SK F	SYJ 35 TF



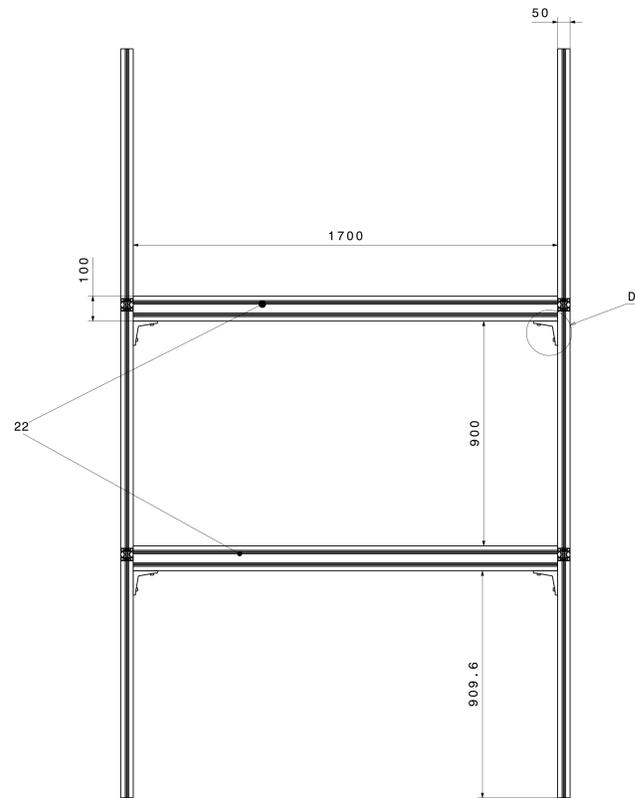
Zusammenbau		DASSAULT SYSTEMES			
DRAWN BY Peitl Michael		DATE 30.04.2014		DRAWING TITLE Baugruppe 1 (B1)	
CHECKED BY	DATE	SIZE A2	DRAWING NUMBER B1		REV
DESIGNED BY	DATE	SCALE 1:1	WEIGHT(kg)	SHEET 1/1	

Anhang

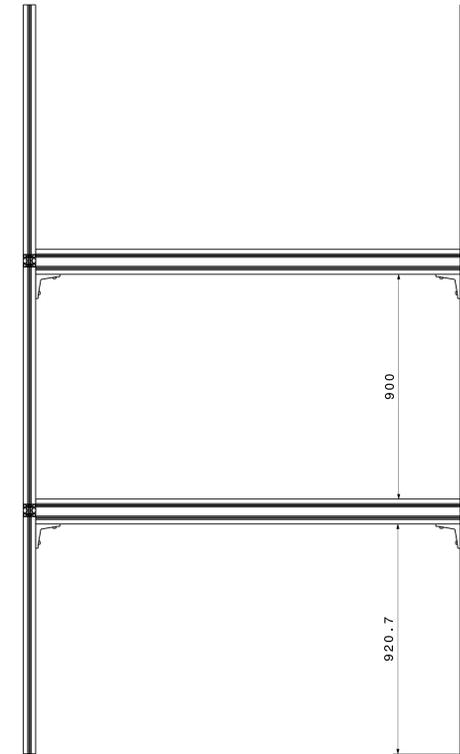
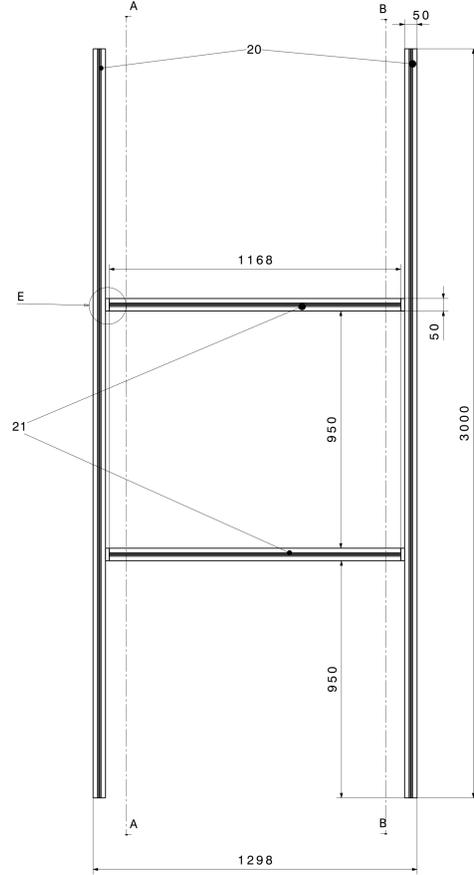
Zeichnungstitel:	Baugruppe 4 (B4)
Zeichnungsnummer:	B4

Teilenummer	Menge	Einheit	Bezeichnung	Norm	Abmessungen	Werkstoff	Bemerkung	Firma	Bestellnummer
20	4	Stk	Profil 50x100x3000		50x100x 3000			Robounits	PIL 5010 SNN 3000
21	4	Stk	Profil 50x500x3000		50x50x1 168			Robounits	PIL 5050 SNN 1168
22	4	Stk	Profil 50x100x1700		50x100x 1700			Robounits	PIL 5010 SNN 1700
23	8	Stk	Verbinder FAS 5051		50x50x1 4		Ganzes Set	Robounits	FAS 5051
24	8	Stk	Winkelverbindung GUS 1001		97x97x3 7		Ganzes Set	Robounits	GUS 1001

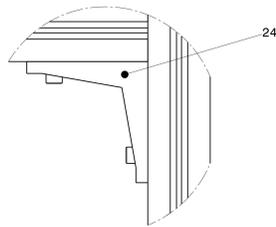
Schnitt A-A



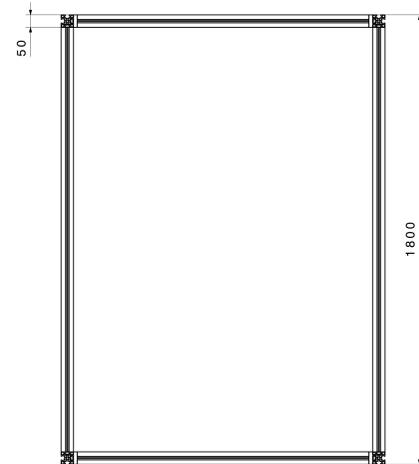
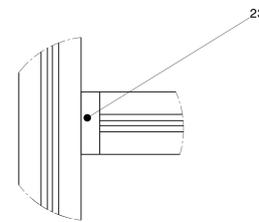
Schnitt B-B



Detail D
Maßstab: 1:2



Detail E
Maßstab: 1:2



		DASSAULT SYSTEMES	
DRAWN BY	DATE	DRAWING TITLE	
Peitl Michael	14.04.2014	Baugruppe 4 (B4)	
CHECKED BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER
		A0	B4
DESIGNED BY	DATE	SCALE	WEIGHT (kg)
		1:10	
			SHEET 1/1

Literaturverzeichnis

Baehr Hand Dieter, Kabelac Stephan (2009): Thermodynamik- Grundlagen und technische Anwendungen, 14. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg

Beffa T., Blanc M., Marilley L., Lott-Fischer J., Lyon P.F.& Aragno M. (1995): Taxonomic and metabolic microbial diversity during composting, In: De Bertoldi M., Sequi P., Lemmes B. & Pap T. (Hrsg): The Science of Composting, Blackies Academic and Professional, Glasgow, 149-161, zit. nach: Wagner A., Illmer P. (2004): Kompostierung - neue Betrachtung einer alten Technik, Band 91, Ber. Nat.-med. Verein Innsbruck, Innsbruck,

Binner E. (2012): Kompostierung von getrennt gesammelt biogenen Abfällen, Universität für Bodenkultur, Wien,

Canet R. & Pomares F. (1995): Changes in physical, chemical and physicochemical parameters during the composting of municipal solid wastes in two plants in valencia, Bioresource Technol 51, 259-264, zit. nach: Wagner A., Illmer P. (2004): Kompostierung - neue Betrachtung einer alten Technik, Band 91, Ber. Nat.-med. Verein Innsbruck, Innsbruck,

Eiland F., Klamer M., Lind A.M., Leth M. & Baath E. (2001): Influence of initial C/N ratio on chemical and microbial composting during long term composting of straw, Microb. Ecol., 272-280, zit. nach: Wagner A., Illmer P. (2004): Kompostierung - neue Betrachtung einer alten Technik, Band 91, Ber. Nat.-med. Verein Innsbruck, Innsbruck,

Epstein E. (1997): The Science of Composting – Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, 487pp. zit. nach: Wagner A., Illmer P. (2004): Kompostierung - neue Betrachtung einer alten Technik, Band 91, Ber. Nat.-med. Verein Innsbruck, Innsbruck,

Geller Wolfgang (2006): Thermodynamik für Maschinenbauer, Grundlagen für die Praxis, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg

Gray K.R., Biddlestone AJ. (1971): A review of composting – part 1. Process biochemistry, Process Biochem, 32-36, zit. nach: Wagner A., Illmer P. (2004): Kompostierung - neue Betrachtung einer alten Technik, Band 91, Ber. Nat.-med. Verein Innsbruck, Innsbruck,

Illmer P. (2000): Kompoststarter- funktioniert er doch? Mitt. Österr. Bodenkdl. Gesell., 77-80, , zit. nach: Wagner A., Illmer P. (2004): Kompostierung - neue Betrachtung einer alten Technik, Band 91, Ber. Nat.-med. Verein Innsbruck, Innsbruck,

Literaturverzeichnis

Körner I. & Stegmann R. (1998): Influence of biowaster composition and composting parameters on the nitrogen dynamic during composting and on nitrogen contents in coost, *Acta Horticult*, 97-110, zit. nach: Wagner A., Illmer P. (2004): *Kompostierung - neue Betrachtung einer alten Technik*, Band 91, Ber. Nat.-med. Verein Innsbruck, Innsbruck,

Langeheinecke Klaus, Jany Peter, Thieleke Gern (2009): *Thermodynamik für Ingenieure- Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium*, 7. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden

Lott-Fischer J., Albrecht A. & Kämpfer P. (2001): *Mikrobiologie der Kompostierung fester Abfälle*, In: P. Kämpfer & Weißenfels W.D. (Hrsg.): *Biologische Behandlung von organischen Abfällen*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York: 3-44, zit. nach: Wagner A., Illmer P. (2004): *Kompostierung - neue Betrachtung einer alten Technik*, Band 91, Ber. Nat.-med. Verein Innsbruck, Innsbruck,

Lucas Klaus (2009): *Thermodynamik, Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlungen*, 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg

Mathur S.P. (1991): *Composting processes*. In: A. M. Martin (Hrsg.): *Bioconversion of Waster Materials to Industrial Products*, Elsevier, London, New York: 147-186, zit. nach: Wagner A., Illmer P. (2004): *Kompostierung - neue Betrachtung einer alten Technik*, Band 91, Ber. Nat.-med. Verein Innsbruck, Innsbruck,

Miller F.C. (1989): *Matrix water potential as an ecological determinant in compost, a substrate dense system*, *Microb Ecol.* 18, 59-71, zit. nach: Wagner A., Illmer P. (2004): *Kompostierung - neue Betrachtung einer alten Technik*, Band 91, Ber. Nat.-med. Verein Innsbruck, Innsbruck,

Steinrück Herbert (2012): *Wärmeübertragung*, Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, Technische Universität Wien

Stentiford E.I. (1996): *Composting control: principles and practice*, In: M. De Bertoldi P. Sequi, Lemmes B. & Papi T. (Hrsg.): *European Commission International Symposium: The Science of Composting, Part 1*, Chapman and Hall: 49-59, zit. nach: Wagner A., Illmer P. (2004): *Kompostierung - neue Betrachtung einer alten Technik*, Band 91, Ber. Nat.-med. Verein Innsbruck, Innsbruck,

VDI-Wärmeatlas (2013): *VDI-Wärmeatlas*, 11. Auflage, VDI e. V., Düsseldorf

Wagner A., Illmer P. (2004): *Kompostierung – neue Betrachtung einer alten Technik*, Band 91, Ber. Nat. –med. Verein Innsbruck, Innsbruck

Walker L.P., Nock T.D., Gossett J.M. & Vandergheynst J.S. (1999): *The role of periodic agitation and water addition in managing moisture limitations during high*

Literaturverzeichnis

solids aerobic decomposition, Process Bioche, 601-612, zit. nach: Wagner A., Illmer P. (2004): Kompostierung - neue Betrachtung einer alten Technik, Band 91, Ber. Nat.-med. Verein Innsbruck, Innsbruck,

Wittel Herbert, Muhs Dieter, Jannasch Dieter, Voßiek Joachim (2013): Roloff/Matek Maschinenelement, Normung, Berechnung, Gestaltung, 21. Auflage, Springer Vieweg, Berlin-Heidelberg

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Biologie des Rotteprozesses	4
Abbildung 2: Schematische Darstellung von Temperatur, Kohlenstoffabbau, Ammoniumfreisetzung und pH- Wert im Verlauf der Rotte	6
Abbildung 3: Biomeiler.....	11
Abbildung 4: Massen und Energieströme in einer Mischkammer	17
Abbildung 5: Mischung im h,x Diagramm	18
Abbildung 6: Temperaturverlauf eines Wärmetauschers	19
Abbildung 7: Kamineffekt.....	22
Abbildung 8: Aufbereitete Material der MA48	23
Abbildung 9: Dichteermittlung.....	24
Abbildung 10: Miststreuer	25
Abbildung 11: Streuerkonzept.....	26
Abbildung 12: Mahlkonzept	26
Abbildung 13: Siebkette.....	27
Abbildung 14: Siebkettenkonzept	27
Abbildung 15: Betonmischer.....	28
Abbildung 16: Mischerkonzept.....	28
Abbildung 17: Gesamtkonzept.....	32
Abbildung 18: Kohlenstoffabbauraten.....	33
Abbildung 19: Luftmassenstrom	35
Abbildung 20: Kreislauf Kohlendioxid	36
Abbildung 21: Stufe n	37
Abbildung 22: h,x-Diagramm Mischer.....	39
Abbildung 23: Gesamtübersicht.....	41
Abbildung 24: h,x-Diagramm feuchte Luft	42
Abbildung 25: Enthalpieströme.....	43
Abbildung 26: Versuchsreaktor	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Dichtermittlung	24
Tabelle 2: Gesamtbewertung	29
Tabelle 3: Bewertungen	30
Tabelle 4: Enthalpie der Stufen (A.17-A.21).....	33
Tabelle 5: Stoffanalyse (A.30-A.49)	34
Tabelle 6: Parameter der Stufen	38
Tabelle 7: Werte Quarzsand und Split	39
Tabelle 8: Reynolds und Eulerzahl	39
Tabelle 9: Zeichnungs-Verzeichnis	45
Tabelle 10: Ableitungen-Verzeichnis 2	95