

# DIPLOMARBEIT

## Ermittlung von Auslegungsgrundlagen für die Biomassetrocknung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann HOFBAUER  
Dipl.-Ing. Clemens JÜNGER

am Institut für

Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften  
Inst. 166

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Michael Meixner  
Siegfriedgasse 64/31  
A-1210 Wien

Wien, Februar 2007

.....  
(Michael Meixner)

Diese Arbeit ist am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der Technischen Universität Wien entstanden.

Ich bedanke mich bei Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann Hofbauer für die freundliche Aufnahme am Institut, die fachliche Unterstützung und die Möglichkeit, eine interessante Arbeit ausführen zu dürfen.

An dieser Stelle sei auch den Partnern des „Kompetenznetzwerkes Energie aus Biomasse“ RENET Austria Dank ausgesprochen, die mit der Finanzierung des Projektes diese Diplomarbeit erst möglich gemacht haben.

Weiters möchte ich mich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Clemens Jünger für die hervorragende persönliche Betreuung und fachliche Beratung bedanken.

Danken möchte ich auch meinen Kollegen in der Arbeitsgruppe für die gute Teamarbeit und das angenehme Klima, den Kollegen am Institut und jenen, die mich während des Studiums begleitet haben.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglichten und mich immer unterstützt haben.

## Kurzfassung

Bei der Verwendung von biogenen Brennstoffen zur Erzeugung von Elektrizität, Wärme und Treibstoff spielt der Wassergehalt der eingesetzten Biomasse eine wesentliche Rolle. Eine hierfür einsetzbare Zweibett-Wirbelschicht-Vergasungsanlage besteht aus dem Vergasungsteil, in dem der Brennstoff getrocknet und entgast wird und dem Verbrennungsteil, in dem der unvergaste Brennstoff verbrannt und weiters das Bettmaterial erhitzt wird, um die benötigte Energie für die endothermen Vergasungsreaktionen bereit zu stellen. Der eingebrachte Massenstrom an Wasser muss erst im Prozess verdampft werden. Die Energie dazu wird im Verbrennungsteil der Anlage aufgebracht. Dies führt zu einem verminderten Gesamtwirkungsgrad der Anlage. Um den Wassergehalt noch vor Eintritt der Biomasse in die Anlage zu vermindern, ist eine vorgeschaltete Trocknung der Biomasse von Vorteil. Die Grundlage für die Auslegung eines solchen Trocknungsschrittes liefert aufbauend auf verschiedenen Versuchen mit Einzelpartikeln bzw. Schüttungen von Hackschnitzeln die vorliegende Arbeit.

Bei den Versuchen mit Einzelpartikeln wurde – nach einem vergleichenden Versuch zwischen rohfeuchten und wiederbefeuchteten Partikeln – mit wiederbefeuchteten Partikeln gearbeitet. Hier zeigt sich, dass die Partikeldicke große Bedeutung für das Trocknungsverhalten hat, während die anderen variierten Parameter (Holzart, Faserrichtung, Temperatur der Trocknungsluft und Leerrohrgeschwindigkeit) eher geringen Einfluss haben.

Bei den Versuchen mit Schüttungen ist als Ergebnis die Höhe der Trocknungsfront in der Schüttung von Interesse, da dadurch die Trocknergeometrie beeinflusst wird. Hier zeigen sich große Abhängigkeiten der Höhe der Trocknungsfront von der Leerrohrgeschwindigkeit und der Partikelgröße der eingesetzten Hackschnitzel, während die Temperatur der Trocknungsluft keine signifikante Rolle spielt.

## **Abstract**

During the utilisation of biogenic combustibles for the production of electricity, heat and fuels the water content of the used biomass plays a considerable role. A two-bed fluidized bed gasification plant for this purpose consists of a gasification part, where the biomass is dried and devolatilized and a combustion part, in which the ungasified combustible is burned and the bed material is heated to provide the necessary energy for the endothermic gasification-reactions. The inserted mass flow of water has to be vaporised in the process. The energy for this purpose is raised in the combustion-part of the plant. This leads to a reduced efficiency of the plant. To lower the water content, a drying step before upstream the gasification is beneficial. The basics for the design of such a step are provided with this thesis by running several tests with single particles respectively bulks of wood chips.

The tests with single particles have been run – after a comparison between particles with original humidity and remoistened particles – with remoistened particles. Here is revealed, that the thickness of a particle has big influence on the drying behaviour, whereas the other researched parameters (wood-type, direction of fibre, temperature of the drying-air and superficial velocity) have rather small influence.

In the tests with bulks of wood chips the height of the drying front is of interest, because the geometry of the dryer is influenced by this factor. This height of the drying front is highly dependent on the superficial velocity and the size of the used particles, whereas the temperature of the drying air plays no significant role.

---

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Trocknung</b>	<b>10</b>
2.1	Allgemeines	10
2.2	Wassergehalt und Feuchte	11
2.3	Bindung der Flüssigkeit	12
2.4	Sorptionsisothermen	13
2.5	Kinetik der Trocknung	15
2.6	Eigenschaften des feuchten Gases	17
2.7	Trocknerbauarten	18
2.8	Abluftbehandlung	19
<b>3</b>	<b>Industrielle Feuchtemessung</b>	<b>20</b>
3.1	<b>Grundprinzipien der Materialfeuchtemessung</b>	<b>20</b>
3.1.1	Berührungslose Messung	20
3.1.2	Berührende Messung	21
3.2	<b>Messung der relativen Feuchte</b>	<b>21</b>
3.2.1	Psychrometer	21
3.2.2	Kapazitive Sensoren	24
3.2.3	Resistive Sensoren	25
3.2.4	Keramische Sensoren	26
<b>4</b>	<b>Anlage Güssing</b>	<b>27</b>
4.1	Allgemeines – Gründe für die Errichtung	27
4.2	Anlagenbeschreibung	28
<b>5</b>	<b>Beschreibung der Trocknungs-Versuchsanlage</b>	<b>33</b>
5.1	Gebälse	34
5.2	Heizschale	34
5.3	Trocknungsreaktor	34
5.4	Messtechnik	35

<u>Auslegungsgrundlagen für die Biomassetrocknung</u>	<u>Inhalt</u>	
5.4.1	Temperaturmessung	35
5.4.2	Durchflussmessung	36
5.4.3	Feuchtemessung	37
5.4.4	Druckmessung	37
5.4.5	Messwerterfassung	37
<b>6</b>	<b>Trocknungsverhalten von Einzelpartikeln</b>	<b>39</b>
<b>6.1</b>	<b>Versuchsvorbereitung - Einzelpartikel</b>	<b>39</b>
<b>6.2</b>	<b>Versuchsanlage</b>	<b>39</b>
<b>6.3</b>	<b>Durchführung der Versuche</b>	<b>41</b>
6.3.1	Vergleich von gesägten und gehackten Partikeln	42
6.3.2	Vergleich von rohfeuchten und wiederbefeuchteten Partikeln	44
6.3.3	Holzartvariation	46
6.3.4	Temperaturvariation	47
6.3.5	Geschwindigkeitsvariation	49
6.3.6	Partikeldickenvariation	50
6.3.7	Variation der Faserrichtung	52
<b>7</b>	<b>Trocknungsverhalten von Schüttungen</b>	<b>54</b>
<b>7.1</b>	<b>Vorbereitung der Partikel (Hackschnitzel)</b>	<b>54</b>
7.1.1	Siebung	54
7.1.2	Charakterisierung der Partikel	56
<b>7.2</b>	<b>Porosität der Schüttung</b>	<b>58</b>
<b>7.3</b>	<b>Druckverlust der trockenen Schüttung</b>	<b>59</b>
<b>7.4</b>	<b>Versuchsvorbereitung – Trocknung von Schüttungen</b>	<b>62</b>
<b>7.5</b>	<b>Gleichmäßig durchströmte Schüttungen</b>	<b>62</b>
7.5.1	Allgemeines zum Verlauf der Trocknung in Schüttungen	62
7.5.2	Versuchsprogramm	65
7.5.3	Auswertung	65
7.5.4	Partikelgrößenvariation	69
7.5.5	Temperaturvariation	72
7.5.6	Geschwindigkeitsvariation	75
7.5.7	Druckverlust	78

<u>Auslegungsgrundlagen für die Biomassetrocknung</u>	<u>Inhalt</u>
7.6 Punktförmige Eindüsung	79
8 Zusammenfassung und Ausblick	89
9 Formelzeichen	91
10 Verzeichnisse	94
10.1 Abbildungsverzeichnis	94
10.2 Tabellenverzeichnis	98
10.3 Literaturverzeichnis	99
11 Anhang	102

# 1 Einleitung und Motivation

Die Welt, bedacht auf platten Nutzen,  
sucht auch die Seelen auszuputzen.  
Das Sumpfwässern, Wälderroden,  
schafft einwandfreien Ackerboden.  
Und schon kann die Statistik prahlen,  
mit beispiellosen Fortschrittszahlen.  
Doch langsam merken's auch die Deppen,  
die Seelen schwinden und versteppen!  
Denn nirgends mehr so weit man sieht,  
gibt es ein Seelenschutzgebiet.  
Kein Wald drin Traumes Vöglein sitzen,  
kein Bach drin Frohsinns Fischlein blitzen,  
kein Busch im Schmerz sich zu verkriechen,  
kein Blümlein Andacht rauszuriechen.  
Nichts als ein ödes Feld mit Leuten,  
bestellt es restlos auszubeuten.  
Drum wollt ihr nicht zugrunde gehen,  
lasst noch ein bisschen Wildnis stehen!

*Eugen Roth (1895-1976), deutscher Autor*

„Lasst noch ein bisschen Wildnis stehen!“ Dieses Zitat von Eugen Roth an den Beginn einer Abhandlung zu stellen, die sich mit Teilbereichen intensiver Waldnutzung befasst, scheint ungewöhnlich. Jedoch steht eben diese Waldnutzung in keinem Widerspruch zu genanntem Zitat. Im Gegenteil – Holz als nachwachsender Rohstoff hat in Österreich großes Potenzial. Insgesamt stehen im österreichischen Wald 1,095 Mrd. m<sup>3</sup> Holz, jährlich wachsen 31,28 Mio. m<sup>3</sup> zu, nur zwei Drittel davon werden pro Jahr geschlägert. [BMLFUW, 2006]

Der weltweit jährlich steigende Energiebedarf und die damit verbundene Erhöhung des Kohlendioxidausstoßes – Hauptverursacher des anthropogenen Treibhauseffektes – fordert Handlungen. Österreich arbeitet an der Erfüllung der „Ziele von Toronto“ – beschlossen auf der Klimakonferenz in Toronto, Kanada 1998. Diese Ziele beinhalten die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 20 % bis 2005 und um 50 % bis 2050. [AAAC, 2006]

Der jährliche Verbrauch an Primärenergieträgern hat sich in Österreich seit 1960 mehr als verdoppelt. Erneuerbare Energieträger erleben absolut gesehen einen Aufschwung; der Verbrauch an Erdöl bleibt seit Mitte der Siebziger Jahre konstant. Mit einem Biomasseanteil am

Gesamtenergieaufkommen von 10 % (Stand 2004) [AEA, 2006] nimmt Österreich im internationalen Vergleich einen Spitzenplatz ein. Um diesen zu halten bzw. zu verbessern wird die Vergasung von biogenen Brennstoffen zur Gewinnung von brennbarem Gas, welches weiters zur Erzeugung von Wärme, elektrischer Energie und Synthesegas genutzt werden kann, forciert. Am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften ist seit 1995 eine 100 kW<sub>th</sub> Wirbelschichtvergasungs-Pilotanlage in Betrieb.

Im April 1999 wurde die ARGE „Kompetenznetzwerk Energie aus Biomasse“ gegründet. Gründungsmitglieder waren die Energieversorger EVN AG und Güssinger Fernwärme GmbH, das Industrieunternehmen AE Energietechnik GmbH und von Seiten der Wissenschaft das Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der Technischen Universität Wien. Unter dem Namen RENET-Austria (kurz für Renewable Energy Network Austria) verfolgt die ARGE das Ziel, die Forschung und Entwicklung im Bereich erneuerbare Energien zu intensivieren und damit neue Technologien zur energetischen Nutzung von Biomasse zu fördern. An zwei Kompetenzknoten in Güssing und Wiener Neustadt wurden Demonstrationsanlagen errichtet. In Güssing ging bereits im September 2001 ein Biomasse-Kraftwerk mit 8 MW<sub>BWL\*</sub> in Betrieb. [Krain, 2002]

In einer zirkulierenden Wirbelschicht werden hier Hackschnitzel aus der Umgebung des Kraftwerkes vergast. Der Kaltgaswirkungsgrad – definiert als das Verhältnis aus abgeführter chemischer Energie des Produktgases zu eingebrachter chemischer Energie des Brennstoffes [Puchner, 2004] – sinkt deutlich mit steigendem Wassergehalt des eingesetzten Hackguts. Dies wird durch steigende Exergieverluste im Verbrennungs- und Vergasungsteil verursacht, da die Verdampfungsenergie direkt aus der Verbrennung der Biomasse aufgebracht werden muss. Daher soll das Hackgut einen Wassergehalt von weniger als 20 % besitzen. Bis dato wird größtenteils Brennstoff mit einem Wassergehalt von über 20 % eingesetzt. Eine Steigerung des Wirkungsgrades wird nur erzielt, wenn die eingesetzte Biomasse den entsprechenden Wassergehalt aufweist. Weiters wird dadurch eine Entlastung der Anlage erreicht, da ein geringerer Wassergehalt auch geringere Volumenströme in der Anlage bedeutet, was wiederum in kleineren Querschnitten bei Rohrleitungen resultiert. Bewerkstelligen ließe sich dies mittels einer dem Verfahren vorgeschalteten Trocknung mit exergetisch niedriger Wärme. Mit den Auslegungsgrundlagen einer solchen Niedertemperaturtrocknung befasst sich diese Arbeit.

\* Brennstoffwärmeleistung

## 2 Grundlagen der Trocknung

### 2.1 Allgemeines

Das Abtrennen von Flüssigkeit aus feuchten Gütern wird allgemein unter dem Begriff Trocknen zusammengefasst.

Es werden drei Arten der Trocknung unterschieden: Das mechanische, das chemische und das thermische Trocknen.

Als *mechanisches Trocknen* werden die Verfahrensschritte Zentrifugieren, Pressen und Filtrieren bezeichnet. Hierbei erfolgt keine Phasenänderung. Der Energieaufwand ist relativ gering; allerdings ist die Restfeuchte hoch.

Aus Gasgemischen kann Feuchte mit Hilfe spezieller hygroskopischer Trocknungsmittel entfernt werden. Die Feuchte geht dabei eine chemische Verbindung mit dem Trocknungsmittel ein oder wird adsorptiv an das Trocknungsmittel gebunden. Die Feuchte kann auch als Hydratwasser Bestandteil des Trocknungsmittels werden, wenn dieses kristallwasserfrei, amorph und damit sehr hygroskopisch, mit dem Feuchtgut in Berührung kommt. Dies wird als *chemisches Trocknen* bezeichnet.

Wird die Wärme durch Leitung, Strahlung oder Konvektion von außen an das Trocknungsgut herangeführt oder im Gutinneren erzeugt, spricht man von *thermischem Trocknen*. Dabei handelt es sich um die bei weitem häufigste Trocknungsmethode. Die Flüssigkeit wird durch Verdunsten (der Gesamtdruck ist größer als der Teildruck des entstehenden Dampfes) oder Verdampfen (der Gesamtdruck ist gleich dem Teildruck des entstehenden Dampfes) aus dem Trocknungsgut entfernt. [Friedl, 2000]

## 2.2 Wassergehalt und Feuchte

Der Wassergehalt hat Einfluss auf trocknungs- und verbrennungstechnische Fragen.

Er wird definiert durch

$$w = \frac{m_W}{m_W + m_{TM}}. \quad (2.1)$$

Die Feuchte ist definiert über

$$X = \frac{m_W}{m_{TM}}. \quad (2.2)$$

Wassergehalt und Feuchte stehen in Beziehung zueinander.

$$w = \frac{X}{1 + X} \quad (2.3)$$

$$X = \frac{w}{1 - w} \quad (2.4)$$

In der Literatur finden sich neben den Formelzeichen  $x$  anstelle von  $w$  für den Wassergehalt und  $u$  anstelle von  $X$  für die Feuchte.

In weiterer Folge werden in dieser Arbeit der Wassergehalt mit  $w$  und die Feuchte mit  $X$  bezeichnet.

## 2.3 Bindung der Flüssigkeit

In Abhängigkeit von der Art der Bindung zwischen dem Gut und der Feuchtigkeit wird zwischen Haft-, Kapillar-, Quellflüssigkeit und Kristallwasser unterschieden.

Die *Haftflüssigkeit* bildet einen zusammenhängenden Film an der Oberfläche des nassen Guts, wobei ihr Dampfdruck dem der reinen Flüssigkeit bei gleichem Außendruck und gleicher Temperatur entspricht.

Als *Kapillarflüssigkeit* wird die zurückgehaltene Flüssigkeit in den Kapillaren des Guts bezeichnet. Indirekt proportional zum Kapillarradius kommt es zu einer Dampfdruckerniedrigung der Flüssigkeit. Daher herrscht zwischen miteinander verbundenen Poren unterschiedlichen Durchmessers ein Druckunterschied, der durch einen höheren Flüssigkeitsstand in den dünneren Kapillaren ausgeglichen wird. Bei grobporigen Stoffen entspricht der Dampfdruck, ebenso wie bei der Haftflüssigkeit, der herrschenden Partikeltemperatur. Solche Stoffe nennt man „nicht hygroskopisch“. Bei feinporigen Stoffen mit geringem Kapillarradius ( $r < 10^{-7}$  m) tritt eine deutliche Dampfdruckerniedrigung auf, die im weiteren Trocknungsverlauf noch weiter zunimmt, da die Flüssigkeit mit abnehmendem Feuchtegehalt in immer dünneren Kapillaren zurückgehalten wird. Stoffe, bei denen solche Erscheinungen auftreten, werden als „hygroskopisch“ bezeichnet.

Die *Quellflüssigkeit* benetzt nicht nur die innere und äußere Oberfläche des Stoffes, sondern durchdringt ihn vollständig und bewirkt dadurch eine Volumenzunahme. Verantwortlich für die Bindung der Quellflüssigkeit sind osmotische Kräfte. Stoffe mit Quellflüssigkeit zeigen hygroskopisches Verhalten.

Das *Kristallwasser* bildet einen festen formbildenden Bestandteil des Trocknungsguts. Entfernt werden kann das Kristallwasser erst durch Überschreiten der Zersetzungstemperatur.

Die Feuchtebindung an den Feststoff wird in verschiedene Formen unterschieden: Die chemisch gebundene Feuchte bzw. chemische Adsorption ist die stärkste Form der Feuchtebindung. Danach folgt die physikalische Adsorption aufgrund von van der Waals-Kräften an der inneren und äußeren Oberfläche des Partikels. Als freie oder ungebundene Feuchte wird die nur als schwach gebundene Kapillarflüssigkeit im Porensystem des Feststoffes vorliegende Feuchte bezeichnet. Sie macht den weitaus größten Anteil der Feuchte aus.

## 2.4 Sorptionsisothermen

Der Feuchtegehalt von Holz als hygroskopem Stoff ist von Umgebungsbedingungen abhängig. Die Abhängigkeit der Feuchte der Biomasse (in der Literatur auch Gutsfeuchte oder Feuchtebeladung  $X_G$  – angegeben in kg Feuchte zu kg Trockengut) von der relativen Luftfeuchtigkeit  $rF$  in der Umgebung im Gleichgewicht bei konstanter Temperatur wird mit Hilfe von sogenannten Sorptionsisothermen dargestellt. (Abb. 1) Zur mathematischen Beschreibung wurden verschiedene Modelle entwickelt. Dazu zählen z.B. die Modelle von Langmuir, weiters von Brunbauer, Emmet und Teller – kurz B.E.T. und von Thomson. In der Praxis müssen Sorptionsisothermen experimentell bestimmt werden.

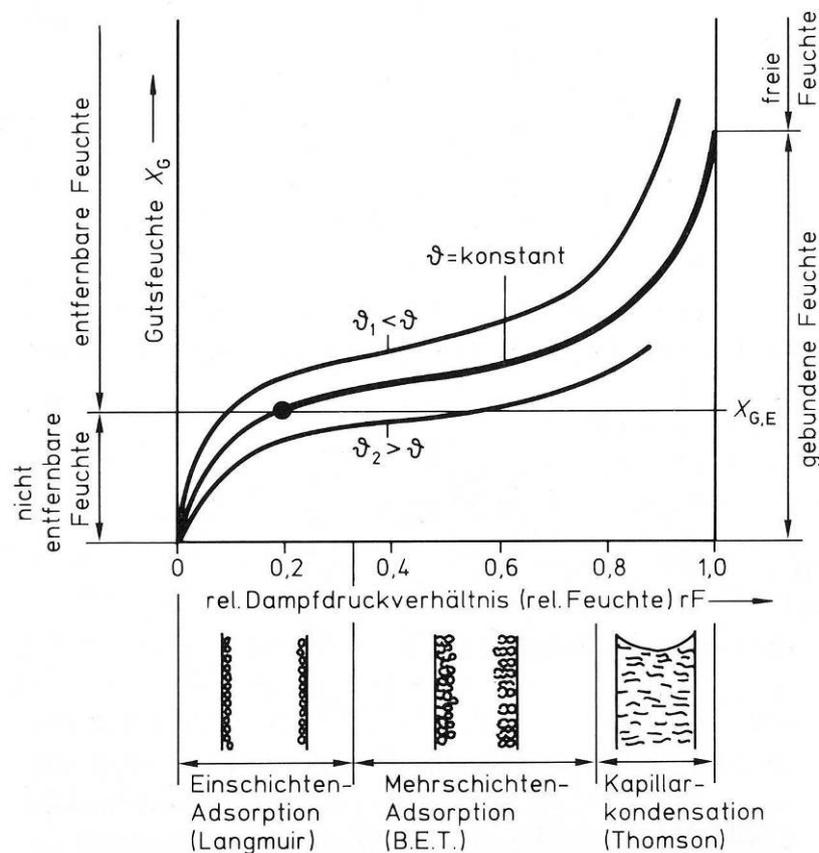


Abb. 1: Typische Sorptionsisothermen für ein hygroskopisches Gut [Sattler, 1995]

Das Sorptionsgleichgewicht von Holz liegt bei der Desorption, wenn dem Sorbens Wasser entzogen wird, höher als bei der Adsorption, wenn ihm Wasser zugeführt wird. Stellt man das Gleichgewicht in beide Richtungen experimentell fest, indem man den Dampfdruck der Atmosphäre das eine Mal erniedrigt, das andere Mal erhöht, dann erhält man zwei Sorptionskurven, die zusammen eine Schleife oder Sorptionsrunde bilden. Der Unterschied zwischen dem hygroskopischen Gleichgewicht bei Desorption und Adsorption wird als Hysterese

bezeichnet. Sorptionsisothermen weisen typische Formen auf, die über die Wechselwirkung der Feuchte mit dem Feststoff Auskunft geben. Für Biomasse ist ein S-förmiger Verlauf charakteristisch. (Abb. 2)

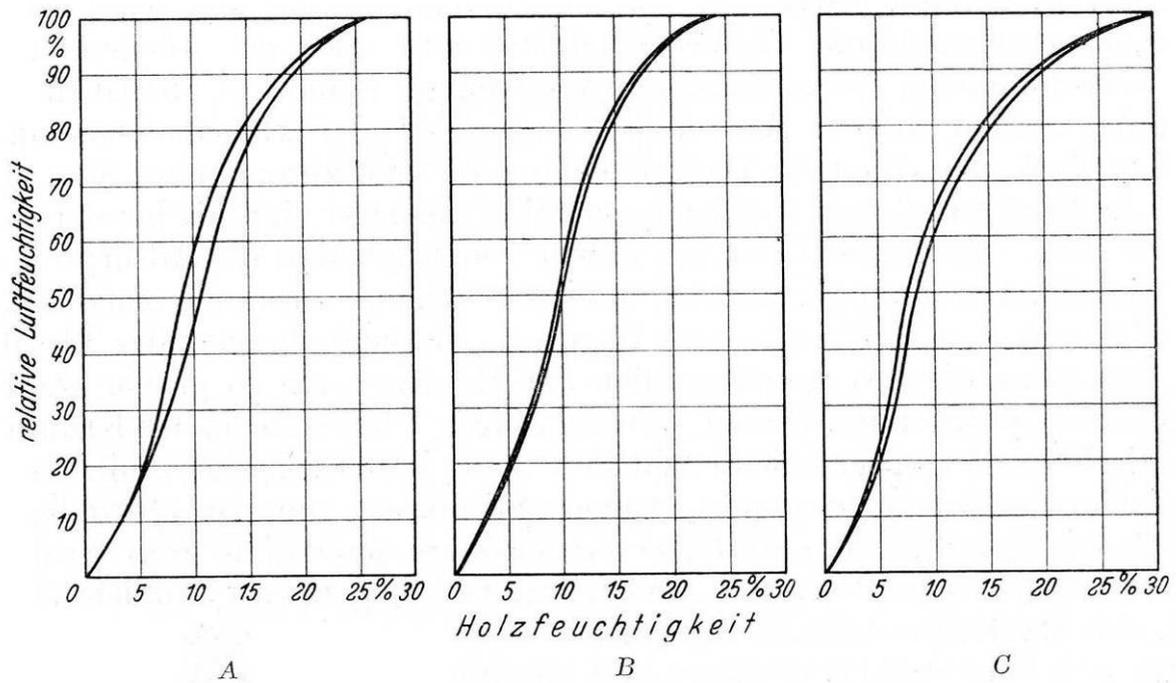


Abb. 2: Hygroskopische Isothermen für Desorption und Adsorption bei 20 °C  
für A Kiefer, B Eiche, C Rotbuche [Kollmann, 1951]

## 2.5 Kinetik der Trocknung

Darunter ist die Veränderung der mittleren Gutsfeuchte und der mittleren Gutstemperatur mit der Trocknungszeit zu verstehen. Die Kinetik der Trocknung beschreibt also den zeitlichen Ablauf des Trocknungsvorganges. Dieser Trocknungsverlauf wird durch die Art des Feuchteguts und seine Feuchtebindung, durch das gewählte Trocknungsverfahren und die bei der Trocknung eingestellten Betriebsbedingungen bestimmt. Durch Auftragen des Feuchtegehaltes des Guts als Feuchtebelastung  $X_G$  über der Zeit  $t$  wird der Trocknungsverlauf charakterisiert (Abb. 3a). Differenziert man diese Kurve, erhält man mit der Ableitung  $dX_G/dt$  die Trocknungsgeschwindigkeit (Abb. 3b). Das Auftragen der Trocknungsgeschwindigkeit über der Gutsfeuchte ist für die Ermittlung der Trocknungsdauer besonders zweckmäßig (Abb. 3c).

In einer kurzen *Aufwärmperiode* wird das Feuchtgut mit einer Anfangsfeuchte  $X_{G,1}$  auf Arbeitstemperatur vorgewärmt, wobei geringfügig Feuchte verdunstet. (Abb. 3, Bereich A – B). Im *ersten Trocknungsabschnitt* (Abb. 3, Bereich B – C) verringert sich die Feuchte linear mit der Zeit. Die Kapillaren sind noch mit Feuchtigkeit gefüllt; der Trocknungsverlauf wird durch die Oberflächenfeuchte bestimmt. Der erste Trocknungsabschnitt dauert solange an, bis die kapillare Feuchteleitung nicht mehr ausreicht, um die an der Gutoberfläche verdunstete Feuchte aus dem Gutinneren nachzuführen. Dies ist bei einer experimentell festzulegenden Feuchtebelastung  $X_{G,kr}$  der „Knickpunktsfeuchte“ des Guts der Fall. In diesem Bereich verdunsten die oberflächige Haftflüssigkeit und ein Teil der im Makroporensystem gebundenen Feuchte.

Im *zweiten Trocknungsabschnitt* (Abb. 3, Bereich C – D) wird die Trocknungsgeschwindigkeit durch die Wärmeleitung in der ausgetrockneten Gutoberflächenschicht, durch die kapillare Feuchteleitung aus dem Gutsinneren an den Verdunstungsspiegel, durch die Feuchtedampfdiffusion vom Verdunstungsspiegel an die Gutoberfläche und durch den Übergang des Feuchtedampfes an das Feuchtegas bestimmt. Die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt stetig ab. Äußere Stoff- und Wärmeübergangsbedingungen haben nur noch geringen Einfluss. Der zweite Trocknungsabschnitt endet für nicht hygroskopische Stoffe mit der völligen Austrocknung (Abb. 3,  $X_G=0$ , Punkt F). Hygroskopische Stoffe können nur dann vollständig getrocknet werden, wenn das Trockengas keine Feuchte enthält, was in der Praxis nicht der Fall ist.

Daher schließt noch ein *dritter Trocknungsabschnitt* an (Abb. 3, Bereich D – E, strichlierte Linie). Er beginnt am Knickpunkt D, sobald an allen Stellen des Guts der maximale hygroskopische Feuchtegehalt  $X_{G,H}$  erreicht wird. Im dritten Trocknungsabschnitt fällt die Trocknungsgeschwindigkeit weiter ab, bis sie bei Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte  $X_{G,E}$  zu

Null wird.  $X_{G,E}$  ist die Restfeuchte des im Sorptionsgleichgewicht mit dem umgebenden Trocknungsgas stehenden Guts. Sie ergibt sich aus der experimentell festzulegenden Sorptionsisothermen.

Besitzen Feuchtgüter kein Porensystem (z.B. gelatinöse Güter, Teige, Pasten), weisen ihre Trocknungsverlaufkurven keine Knickpunkte auf. [Sattler, 1995]

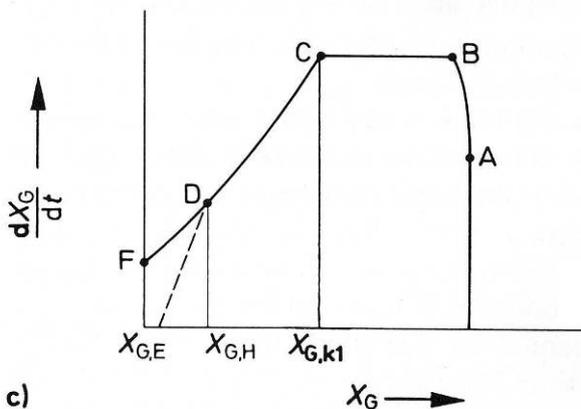
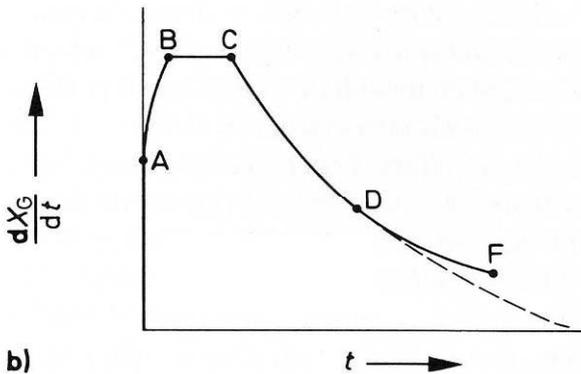
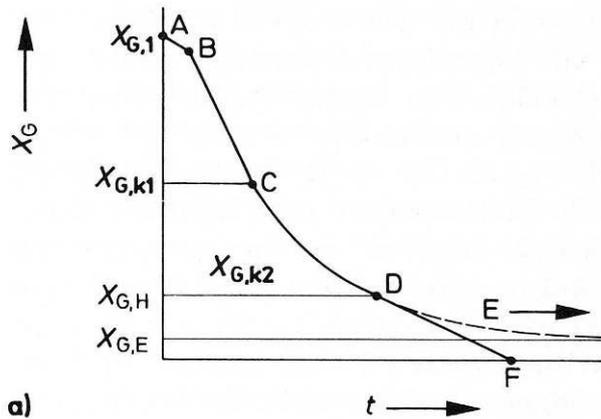


Abb. 3: Trocknungsverlauf bei kapillar-porösem Festgut [Sattler, 1995]

- a) Feuchtebeladung des Guts  $X_G$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$
- b) Trocknungsgeschwindigkeit  $dX_G$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$
- c) Trocknungsgeschwindigkeit  $dX_G$  in Abhängigkeit von der Feuchtebeladung  $X_G$  des Guts

Durchgezogene Linie:

Nicht hygroskopisches Gut

Strichlierte Linie:

Hygroskopisches Gut

## 2.6 Eigenschaften des feuchten Gases

Bei unter Normal- und Überdruck durchgeführten Trocknungsverfahren wird der aus dem Trocknungsgut entweichende Dampf durch ein für das Gut inertes Gas, das das Gut durchdringt oder über seine Oberfläche hinwegstreicht, aufgenommen und abtransportiert. Dieses Gas ist in den meisten Fällen Luft und dient auch als Lieferant der Wärme, die für die Trocknung erforderlich ist. Der Quotient aus im feuchten Gas enthaltener Dampfmasse zur im feuchten Gas enthaltenen Trockengasmenge, die absolute Feuchte oder die Feuchtebelastung  $X_L$  des Gases wird bestimmt aus

$$X_L = \frac{m_D}{m_L} = \frac{M_D}{M_L} \cdot \frac{p_D}{p - p_D} \quad (2.5)$$

Mit Hilfe der relativen Feuchte  $rF$

$$rF = \frac{p_D}{p_{0,D}} = \frac{\rho_D}{\rho_{0,D}} \quad (2.6)$$

und

$$\frac{M_D}{M_L} = \frac{18,015}{29,85} = 0,622 \quad (2.7)$$

ergibt sich für  $X_L$

$$X_L = \frac{M_D}{M_L} \cdot \frac{rF \cdot p_{0,D}}{p - rF \cdot p_{0,D}} = 0,622 \cdot \frac{rF \cdot p_{0,D}}{p - rF \cdot p_{0,D}} \quad (2.8)$$

Die Antoine-Gleichung dient zur Bestimmung des Sättigungsdampfdruckes  $p_{0,D}$ .

$$\log p_{0,D} = A - \frac{B}{C + \vartheta} \quad (2.9)$$

## 2.7 Trocknerbauarten

Im Folgenden soll eine Übersicht über vorhandene Trocknerbauarten bzw. -systeme gegeben werden. Die meisten Einteilungen erfolgen nach den Hauptkriterien wie Betriebsart (batch oder kontinuierlich), nach der Art der Wärmezufuhr (Kontakt, Konvektion, Strahlung, etc.) oder der Form des Feed (partikelförmig, pastös, etc.). Weiters wird generell nach Kriterien wie Strömungsform oder der Art des Trockenmediums unterteilt. Die Unterteilung von Kemp und Bahu [Kemp / Bahu, 1995] orientiert sich an drei Haupt- und fünf Unterkriterien:

### 1.) Hauptkriterien:

- Betriebsart
  - Batch (inkl. Semi-batch)
  - Kontinuierlich (inkl. Semi-kontinuierlich)
- Zustand des Trocknungsguts am Ein- und Austritt
  - Partikel (inkl. Granulat, Agglomerat, Pellets)
  - Dünner Film
  - Platte, Block
  - Pasten, Breie oder Lösungen
- Wärmezufuhr
  - Kontakt
  - Konvektion
  - Strahlung
  - Dielektrisch
  - Kombinationen

### 2.) Unterkriterien

- Arbeitsdruck
- Strömungsform des Gases
- Strömungsform des Feststoffes
- Art des Feststofftransportes
- Art der Feststoffmischung

## 2.8 Abluftbehandlung

Biomasse hat einen hohen Anteil an flüchtigen Stoffen. Unter flüchtigen Bestandteilen werden Zersetzungsprodukte der organischen Substanz verstanden, die entstehen, wenn biogene Brennstoffe unter normierten Bedingungen (Probe von 1 g, 7 Minuten, Luftabschluss, 900 °C) erhitzt werden. Bei Lignocellulosebrennstoffen liegt der Anteil an flüchtigen Bestandteilen am gesamten Brennstoff bei 74 bis 83 % der Trockenmasse. Holzbrennstoffe liegen mit durchschnittlich 82 % im oberen Bereich der Bandbreite. [Hofbauer, 2006]

Emissionen entstehen entweder durch die Verdampfung flüchtiger Komponenten oder aus dem thermischen Abbau der Biomasse. Verdampfte Komponenten können weiter in flüchtig bleibende und bei Raumtemperatur auskondensierende Bestandteile unterteilt werden.

In Gegenwart von NO<sub>x</sub> und Sonnenlicht tragen flüchtige organische Verbindungen (VOC), die bei der Trocknung emittiert werden, zur Bildung von schädlichen Photo-Oxidantien bei. Diese beeinträchtigen die Lunge und die Atemwege.

Die flüchtigsten dampfförmigen Komponenten bestehen aus Monoterpenen, welche bereits bei Raumtemperatur entstehen, deren Emissionsrate jedoch bei Temperaturen über 100 °C stark ansteigt. Monoterpene (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>)<sub>2</sub> sind stark riechende Reizstoffe. Die höchsten Konzentrationen von Photo-Oxidantien kommen auf Grund der kurzen atmosphärischen Lebensdauer von Monoterpenen rund fünf Stunden nach dem Emittieren in einem Umkreis von 50 km um die Quelle vor. [Stahl et al., 2003]

Auskondensierende Komponenten bereiten größere Probleme. Die Belästigung durch bläulichen Dunst ist immer wieder Grund zur Besorgnis, weil dadurch ebenso Geruchsbelästigung entstehen kann. Diese auskondensierenden Komponenten kommen jedoch meist erst bei Trockentemperaturen jenseits 100 °C vor. Thermische Abbauprodukte werden bei höheren Temperaturen frei (über 200 °C für kurze Trocknungen, darunter für länger andauernde Trocknungen). Die Verlustrate steigt signifikant an, wenn die Temperatur weiter erhöht wird. Die Temperatur sollte daher im Generellen unter 100 °C gehalten werden. Für kurze Zeiten sind auch Temperaturen bis 150 °C zulässig. [Kemp / Bahu, 1995]

Eine andere Variante der Vermeidung von Terpenen ist die Verwendung von Dampf als Trockenmittel. In der Literatur finden sich Beschreibungen von Dampftrocknungsversuchen bei 170 °C, bei denen ein Großteil der Terpene im Trockengut verbleibt, d.h. nicht emittiert wird. [Rupar-Gadd, 2006] Setzt man Holz einer wasserdampfgesättigten Atmosphäre aus und steigert die Temperatur, so beginnen zwischen 50 und 60 °C pyrogene Substanzen auszutreten. [Brunnbauer, 1995]

Eine Dampftrocknung kommt im BKW Güssing aus energetischen Gründen nicht in Frage. Es ist daher eine Niedertemperaturtrocknung bei Temperaturen unter 60 °C anzustreben.

## 3 Industrielle Feuchtemessung

Der Feuchtegehalt in der Biomasse ist die für die Versuche wichtigste Messgröße, da in der Folge in der industriellen Anlage der Wassergehalt im Rohstoff ein Wirkungsgrad bestimmender Faktor und damit von ökonomischer Bedeutung ist. Im Folgenden werden die Grundprinzipien der Materialfeuchtemessung und die wichtigsten Messmethoden für Feuchte in Gasen vorgestellt.

### 3.1 Grundprinzipien der Materialfeuchtemessung

In Abhängigkeit vom Bewegungszustand des Messguts – Ruhezustand oder schnelle Bewegung – können Messsignale in unterschiedlicher Weise eingekoppelt werden. In dieser Weise bestimmt die Beschaffenheit des Messguts die Art der Einkopplung des Messsignales. Es werden folgende Arten der Einkoppelung unterschieden.

#### 3.1.1 Berührungslose Messung

Diese hat den Vorteil, dass die Messsonde nicht in direktem Kontakt mit dem Messgut steht. Verunreinigungen der Messsonde und Materialstaus werden dadurch vermieden. Bewegung und Form der unmittelbaren Umgebung des Messguts werden nicht beeinflusst. Für die berührungslose Messung werden vor allem optische, hochfrequente und elektromagnetische Messverfahren eingesetzt. Den genannten Vorteilen stehen auch einige Nachteile gegenüber. Es muss beachtet werden, dass

- die Messung bei den optischen Verfahren nur in unmittelbarer Umgebung der Oberfläche des Messguts erfolgt,
- durch Fokussierung des Messsignals am Sensor nur ein kleines Messvolumen erfasst wird,
- der Abstand bzw. mögliche Querempfindlichkeiten zwischen Signalquelle und Messgut zu berücksichtigen sind.

Eine spezielle Form der berührungslosen Feuchtemessung ist die Gleichgewichtsfeuchtebestimmung. Erfasst wird die Feuchte in einem Gas, die sich aufgrund des Wassergehaltes des Messguts einstellt. Der Sensor hat dabei keinen direkten Kontakt mit dem Messgut. Er kann sich, je nach Messsystem und Messaufgabe, in unmittelbarer Umgebung des Messguts befinden oder auch – bei Transport des Gases, welches sich im Gleichgewicht mit dem Messgut befindet (z.B. in einem Lüftungssystem) – in größerer Entfernung zur Messstelle.

### 3.1.2 Berührende Messung

Hier wird das Signal direkt über den Kontakt zwischen Sonde und Messgut eingekoppelt. Hauptunterschied zur berührungslosen Messung ist die eintretende Änderung der Umgebung des Messguts. Je nach verwendetem Messverfahren lässt sich das Messvolumen durch Konstruktion und geeignete Anbringung der Messsonde festlegen. Es lassen sich so Tiefenmessungen und Messungen über einen größeren Querschnitt durchführen. Als berührende Messverfahren werden vor allem spektroskopische, elektromagnetische und tensiometrische Verfahren eingesetzt.

Bei der Bestimmung der Materialfeuchte muss der Messwert stets materialbezogen betrachtet werden. Materialspezifische Kennlinien, die den Zusammenhang zwischen Materialfeuchte und dem Messverfahren widerspiegeln, finden in der praktischen Messtechnik Anwendung. Zwischen dem Messgut und der Messsonde muss ein gleichbleibender und reproduzierbarer Kontakt (direkt oder indirekt) hergestellt werden. Ist dies nicht der Fall, überdecken Querempfindlichkeiten und Fehlergrößen das eigentliche Messsignal. Die Eigenschaften des Messguts müssen in der Zusammensetzung, aber auch in der Konsistenz (z.B. geringere Streuung der Teilchengröße) konstant sein, da daraus resultierende Einflüsse (z.B. Schüttdichteschwankungen) eine Messwertverfälschung bewirken können. Ist für die Messung eine Probennahme erforderlich, muss sie nach festgelegten, gleichen Vorschriften erfolgen. Wird das Messgut während der Probennahme oder bei der Messung durch Wärme belastet, mit Lösungsmitteln in Kontakt gebracht oder auf andere Weise verändert, ist das bei der Beurteilung der Messergebnisse zu berücksichtigen. [Wernecke, 2003]

## 3.2 Messung der relativen Feuchte

### 3.2.1 Psychrometer

Ein Psychrometer ist eine Anordnung von zwei Temperaturfühlern, von denen einer ständig befeuchtet ist, während der andere trocken ist. Die Umrechnung der Temperaturdifferenz unter Berücksichtigung der am Thermometer gemessenen Lufttemperatur übernimmt bei elektrischen Psychrometern im Allgemeinen ein angeschlossenes mikroprozessorgesteuertes Gerät.

Verdunstung ist stets mit einer Abkühlung begleitet. Wird ein Thermometer mit einem feuchten Tuch umwickelt, sinkt seine Temperatur infolge der Verdunstungswärme, die ihm entzogen wurde. Wie stark diese Verdunstung ist, hängt von äußeren Faktoren wie dem Luftstrom und der Menge an Feuchtigkeit ab, welche die Umgebungsluft noch aufnehmen kann, also auch der relativen Feuchte. Weiters braucht man als Referenz noch ein weiteres Thermometer zur Messung der Lufttemperatur, da die Verdunstung auch von ihr abhängt.

Die Temperaturdifferenz zwischen angefeuchtetem und trockenem Thermometer heißt psychrometrische Differenz. Aus ihr und der Trockentemperatur kann auf die relative Feuchte der Umgebungsluft geschlossen werden. Dies geschieht beispielsweise über das Mollier-Diagramm. Der Wärmeinhalt der Luft bleibt konstant, da die Abkühlung des feuchten Thermometers ein adiabatischer Vorgang ist. Die Triebkraft der Verdunstung ist die Angleichung der Drücke des Dampfes im Luftvolumen und der Oberfläche des befeuchteten Thermometers. Sie ist beendet, wenn diese Drücke gleich sind und damit die Luft um das Thermometer gesättigt ist. Da feuchte Luft bei gleichem Wärmeinhalt eine geringere Temperatur hat, kühlt sie sich dabei ab.

Ausgehend von der Temperatur des feuchten Thermometers sucht man den Schnittpunkt mit der Sättigungskurve. Dies entspricht den Verhältnissen am feuchten Thermometer. Nun wird auf die Verhältnisse in der gemessenen Luft geschlossen. Bekannt sind Temperatur und der Umstand, dass der Wärmeinhalt der gleiche sein muss, d.h. es wird die Adiabate zur jeweiligen Isothermen verfolgt. Die relative Feuchte der gemessenen Luft ergibt sich aus der Kurve der relativen Feuchte, die im Schnittpunkt der Isothermen mit der Adiabaten liegt. (Abb. 4)

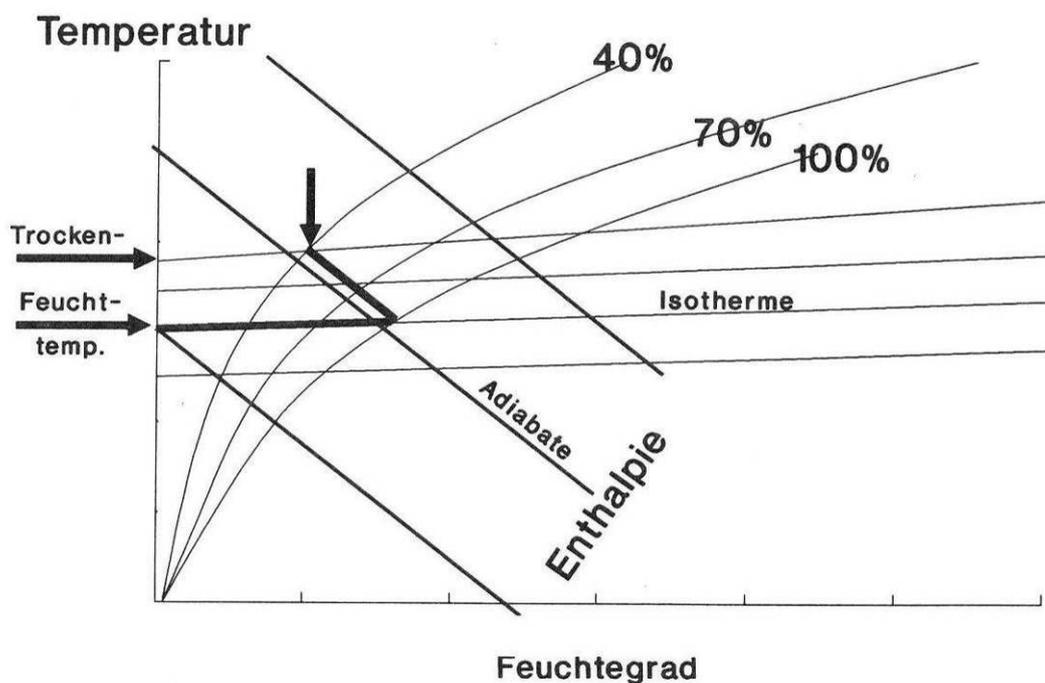


Abb. 4: Ermittlung der relativen Feuchte aus dem Mollier-Diagramm [Weber, 2002]

Es gilt folgender empirischer Zusammenhang:

$$p_w(\vartheta_{tr}) = p_{0,D}(\vartheta_f) - K \cdot (\vartheta_{tr} - \vartheta_f) \quad (3.1)$$

Der Wasserdampfdruck  $p_w(\vartheta_{tr})$ , welcher in der Luft bei Trocknungstemperatur vorliegt, ist gleich dem Sättigungsdruck  $p_{0,D}(\vartheta_f)$  bei Feuchtetemperatur, vermindert um einen Faktor, die Sprungschleife Konstante  $K$ .

Da die relative Feuchte der Quotient aus aktuellem Wasserdampfdruck und Sättigungsdampfdruck bei gleicher Temperatur ist, gilt

$$rF = \frac{p_w(\vartheta_r)}{p_{0,D}(\vartheta_r)} = \frac{p_{0,D}(\vartheta_f) - K \cdot (\vartheta_r - \vartheta_f)}{p_{0,D}(\vartheta_r)} \quad (3.2)$$

Die relative Feuchte ergibt sich damit aus den Sättigungsfeuchten der beiden Temperaturen, die aus Dampfdrucktabellen entnommen werden können.

Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung der relativen Feuchte bieten Tafeln. (Tab. 1)

<b>Psychrometertafel</b>										
Temperatur trockenes Thermometer	Unterschied Temperatur zwischen trockenem und feuchtem Thermometer (in °C) (abgelesene Zahl ergibt relative Feuchtigkeit in %)									
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100	82	64	47	31	14				
1	100	83	66	60	34	18				
2	100	84	68	52	37	22				
3	100	84	69	54	40	25	12			
4	100	85	70	56	42	28	18			
5	100	86	72	58	45	32	19	7		
6	100	86	73	60	47	35	23	11		
7	100	87	75	61	49	37	26	14		
8	100	87	75	62	51	40	29	18	7	
9	100	88	76	64	53	42	31	21	11	
10	100	88	77	65	55	44	34	24	14	5
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17
15	100	90	80	71	61	53	44	36	27	20
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22
17	100	90	81	72	63	56	47	39	32	24
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27
19	100	91	82	74	65	58	50	43	36	29
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	31
21	100	91	83	75	67	60	52	45	39	32
22	100	92	83	75	68	61	54	47	40	34
23	100	92	84	76	69	62	55	48	42	36
24	100	92	84	77	70	62	56	49	43	37
25	100	92	85	77	70	63	57	51	44	39
26	100	92	85	78	71	64	58	51	45	40
27	100	93	85	78	71	65	59	53	47	41
28	100	93	86	79	72	65	59	53	48	42
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44

Tab. 1: Psychrometertafel

Als Psychrometer wird eine Anordnung von zwei Temperaturfühlern, von denen einer ständig befeuchtet und einer trocken ist, bezeichnet. Die Umrechnung der Temperaturdifferenz unter Berücksichtigung der am trockenen Thermometer gemessenen Temperatur wird elektronisch bewältigt. Als Temperatursensoren kommen meist Pt-100 Messwiderstände zum Einsatz. Psychrometer sind – abgesehen von der Sicherstellung der Befeuchtung des einen Thermometers – absolut wartungsfrei und robust. Wichtig bei der Installation eines Psychrometers ist allerdings ausreichende Belüftung. Die Strömungsgeschwindigkeit der anströmenden Luft sollte zwischen 2 und 3 m/s liegen. Liegt am Messort die geforderte Strömungsgeschwindigkeit nicht vor, muss ein Lüfter installiert werden. Es existieren aber auch Geräte mit integriertem Lüfter.

Um Ablagerungen von Kalk zu verhindern sollte unbedingt demineralisiertes und destilliertes Wasser zur Befeuchtung des einen Temperaturfühlers verwendet werden. Die psychrometrische Messung ist luftdruckabhängig; der bei der Messung herrschende Luftdruck müsste also berücksichtigt werden. In der Praxis wird dieser Umstand jedoch meist unberücksichtigt gelassen, denn eine Schwankung von  $\pm 20$  mbar hätte rechnerisch einen Fehler von unter 1 % relativer Feuchte zur Folge.

Die Messunsicherheit liegt bei ca. 1 – 1,5 % relativer Feuchte. Das Gerät ist träge, bis zum Einstellen des richtigen Messwertes dauert es zwei bis zehn Minuten. [Weber, 2002]

### 3.2.2 Kapazitive Sensoren

Ein hygroskopisches Material, meist ein Polymer wie Celluloseacetat oder Polyamid, bildet das Dielektrikum eines Kondensators. Seine Kapazität ist eine Funktion der relativen Feuchte. Eine Auswertelektronik wandelt diese Kapazität in ein Einheitssignal um.

Kapazitive Sensoren bieten viele Vorteile wie kleine Bauform, hohe Empfindlichkeit, geringen Preis und schnelles Ansprechverhalten. Der prinzipielle Aufbau eines solchen Sensors kann Abb. 5 entnommen werden. Ein gewisser Nachteil ist die im Vergleich zu anderen Messmethoden vorhandene Hysterese und Temperaturempfindlichkeit sowie geringere Zuverlässigkeit und Kennlinienstabilität. Die Hysterese begründet sich darin, dass zunächst Wassermoleküle in einen Feststoff diffundieren müssen, und dieser naturgemäß eine unterschiedliche Adsorptions- und Desorptionskennlinie hat. Beachtung finden muss auch die Umgebung. Das Einsatzgebiet erstreckt sich nur bedingt auf aggressives Milieu.

Der Arbeitsbereich ist wieder von Temperatur und Feuchte abhängig. Die Kalibrierung muss vom Hersteller erfolgen, da dem Ausgangssignal kein allgemein gültiger Zusammenhang zugrunde liegt.

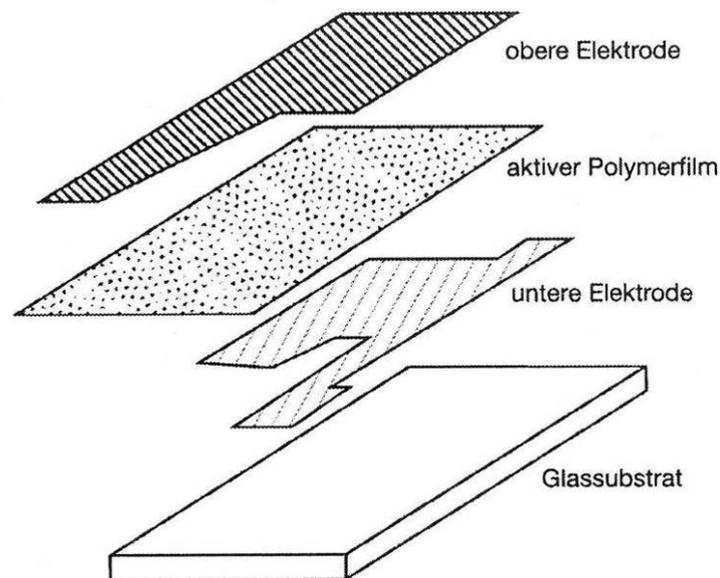


Abb. 5: Aufbau eines kapazitiven Sensors [Weber, 2002]

Kapazitive Sensoren haben prinzipiell einen Temperaturkoeffizienten. Auf Temperaturkompensation kann jedoch in vielen Fällen verzichtet werden, da er im Allgemeinen gering ist. In modernen Anordnungen besteht das Messsystem aus dem eigentlichen Sensor und einem in der Nähe angebrachten Temperaturfühler. Die ganze Anordnung ist von einer Sinterkappe oder gelochten Schutzkappe umgeben, die den Sensor vor mechanischen Einflüssen schützt und dennoch luftdurchlässig ist. [Weber, 2002]

### 3.2.3 Resistive Sensoren

Hier wird der Effekt ausgenutzt, dass ein mit einem hygroskopischen, ionisch aufgebauten Stoff überzogenes Trägermaterial seine Leitfähigkeit mit wachsendem Feuchtegehalt ändert. Da dieser Feuchtegehalt sich im Gleichgewicht mit der umgebenden Luftfeuchte befindet, kann solcherart die (relative) Feuchte erfasst werden. Abb. 6 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Sensors. Der Zusammenhang zwischen relativer Feuchte und Leitfähigkeit ist exponentiell. Es tritt ein starker Temperatureffekt auf, da auch die Temperatur die Leitfähigkeit ändert. Es besteht Empfindlichkeit gegenüber chemischen Einflüssen und Einfrieren. Die Drift ist hingegen gering. Ebenso sind die Temperatur-Zyklusbeständigkeit sowie die Beständigkeit gegenüber hohen und niedrigen Dauerfeuchten und Betauung gut.

Der Betrieb erfolgt mit Wechselspannungen von 50 bis 1000 Hz, um eine echte Ionenwanderung und damit verbunden eine Elektrolyse zu vermeiden. Dies ermöglicht auch preisgünstige Applikationen, da eine einfache Wechselstrom-Widerstandsmessung zur Ermittlung der relativen Feuchte ausreichend ist, was schaltungstechnisch recht einfach zu realisieren ist. Auch dem Nachteil der hohen Temperaturabhängigkeit kann mit einer Temperaturkompensation einfach begegnet werden. Insgesamt werden an die Elektronik

erheblich geringere Anforderungen gestellt als bei den kapazitiven Sensoren. Die Kalibrierung muss allerdings auch einzeln erfolgen.

Resistive Sensoren zeigen nahezu hysterese-freies Verhalten mit sehr kleiner Drift. Das liegt daran, dass die Feuchtigkeit mit keinem Feststoff, sondern einer Lösung reagiert. Ein weiterer Vorteil liegt im schnellen Einstellen des Gleichgewichtes und somit kurzer Messzeit.

[Weber, 2002]

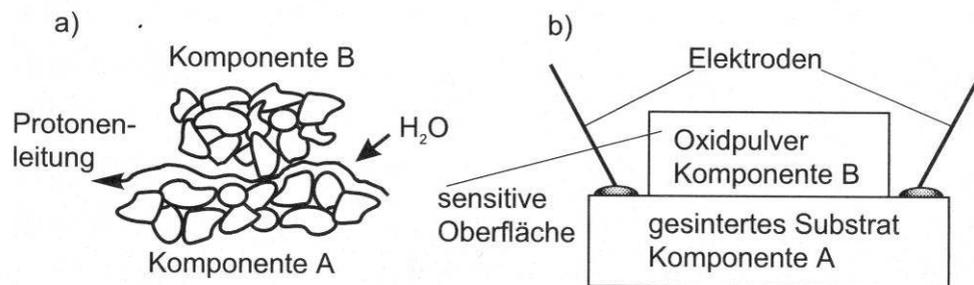


Abb. 6: Schematischer Aufbau eines resistiven Sensors [Wernecke, 2003]

a) Funktionsprinzip, b) Sensoraufbau

### 3.2.4 Keramische Sensoren

Keramische oder genauer piezokeramische Sensoren bestehen aus einem dünnen Kristall, der zwischen zwei Elektroden befestigt ist. Kristallmaterialien sind unter anderem Bariumtitanat oder Siliciumdioxid, das ein Gitter mit genau definierter Struktur bildet. Der piezoelektrische Effekt entsteht bei Anlegen einer äußeren Spannung durch Deformation dieses Gitters, da die Sauerstoffatome partiell negativ und die Siliciumatome stärker positiv geladen sind. Wird umgekehrt der Kristall von außen verformt, entspricht dies einer leichten Verschiebung der Atome und somit ihrer Ladung; eine Spannung entsteht an den Enden des Kristalls. Mit einer äußeren Spannung verformt sich der Kristall etwas. Ist diese Spannung eine Wechselspannung, so schwingt der Kristall im Takt mit. Wie jedes mechanische System besitzt er eine Resonanzfrequenz die nur in geringem Maß von der Temperatur abhängt. Frequenzen können genau bestimmt werden, indem man die Schwingungen mit einem entsprechend schnellen Zähler auszählt. Die Messgenauigkeit ist dabei beachtlich. Schwingquarze können so zur Temperatur- und Feuchtemessung eingesetzt werden.

Keramische Sensoren nutzen diesen Effekt. Zur Feuchtemessung ist Temperaturkompensation erforderlich, um den Temperatureinfluss auszuschalten. Eine Messanordnung kann so aussehen, dass sich ein Sensor in absolut trockener Luft befindet und ein anderer bei gleicher Temperatur dem Messgas ausgesetzt ist. Zusammengeführt ergibt sich aus den beiden Frequenzen eine Differenzfrequenz. Durch die Benutzung zweier Fühler wird der Temperatureinfluss eliminiert. Wegen der Genauigkeit des Verfahrens eignet es sich besonders im Bereich geringer Feuchten. [Weber, 2002]

## 4 Anlage Güssing

### 4.1 Allgemeines – Gründe für die Errichtung

Die Stadt Güssing im südlichen Burgenland/Österreich erstellte bereits 1990 ein Energiekonzept, das die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energieträger bis zur weitgehenden regionalen Unabhängigkeit von Energieimporten anstrebt. Hauptmotivation war die Belassung der Wertschöpfung aus dem Energiemarkt in der Region. Die positive Wirkung der energiepolitischen Maßnahmen auf die strukturelle Entwicklung des traditionell benachteiligten Gebietes trägt wesentlich zum volkswirtschaftlichen Gesamteffekt des Konzeptes bei (Betriebsansiedlung, Öko-Tourismus, qualifizierte Arbeitsplätze). Nach Maßnahmen zur effizienteren Energienutzung (Gebäudeisolierung, Optimierung der Straßenbeleuchtung, etc.) folgte der Aufbau eines Wärmenetzes. Im Fernheizwerk wird ausschließlich Waldhackgut aus der Region eingesetzt. Auf Grund des großen Waldreichtums (Waldbestand mehr als 40 % der Gesamtfläche in der Region um die Stadt Güssing) bietet sich in erster Linie holzartige Biomasse als nachwachsender Energieträger an. Eine parallel dazu errichtete Anlage zur Erzeugung von Rapsöl-Methylester (RME, Biodiesel) stellt mehr RME bereit, als in der Region an flüssigen Treibstoffen verbraucht wird.

Die Erzeugung von elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen wurde durch das Biomassekraftwerk Güssing ermöglicht, das auf der Wirbelschicht-Dampfvergasung fester Biomasse in einer Zweibett-Wirbelschicht beruht. Als Brennstoff dient Waldhackgut. Die elektrische Energie wird in einem Gasmotor-Generator-Aggregat aus dem Produktgas gewonnen, die im Prozess anfallende Wärme als Fernwärme ausgekoppelt. Das Projekt stellt die Demonstration des Verfahrens in einer für wirtschaftliche Anwendung interessanten Leistungsklasse von 8 MW Brennstoffleistung dar. Ermöglicht wurde das Vorhaben im Rahmen des Kompetenznetzwerkes RENET Austria, in dem sich Anlagenbauer, Anlagenbetreiber und die Technische Universität Wien als Forschungsinstitution zusammengeschlossen haben.

Nach genau einem Jahr Bauzeit erfolgte im September 2001 die erste Gasproduktion in der Anlage Güssing. Nach 1300 Betriebsstunden und umfangreichen Messungen der Gasqualität wurde im April 2002 der Gasmotor in Betrieb genommen. Startschwierigkeiten bereiteten die Prozessschritte Produktgaskühlung und Brennstoffzuführung, während die im Vorfeld an der TU Wien ausführlich untersuchte Vergaser- und Gasreinigungstechnologie von Beginn an die Erwartungen erfüllte. Mittlerweile befindet sich die Anlage im durchgehenden Betrieb. Im Jahr 2006 sollen laut Prognose vom August 2006 rund 7000 Volllaststunden (80 % Verfügbarkeit) des Gasmotors erreicht werden. [BKW – Jour Fixe, 2006]

Mittelfristiges Ziel ist die ökonomische Optimierung im Bezug auf Verfügbarkeit, Effizienz und Betriebsmittelverbrauch. Langfristig wird ein automatisierter Anlagenbetrieb ohne ständiges Personal angestrebt.

## 4.2 Anlagenbeschreibung

Das Biomassekraftwerk Güssing ist in Abb. 7 schematisch dargestellt. Im Folgenden wird kurz auf die Teilbereiche des Prozesses eingegangen.

Als Brennstoff wird Waldhackgut mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von 25 Gew.-% eingesetzt. Aus dem Tagesbunker wird der Brennstoff über einen Schubboden, ein Förderband und ein Becherwerk in einen hochgelegenen Zwischenbehälter transportiert. Von dort gelangt der Brennstoff über ein System von Förderschnecken in das Bett der stationären Wirbelschicht des Vergasungsreaktors. Dort erfolgen bei 800-900 °C in Wasserdampfatmosfera Trocknung, Entgasung und teilweise Koksvergasung. Als Bettmaterial wird Olivin eingesetzt, das über die erforderliche mechanische Festigkeit verfügt und eine katalytische Aktivität zur Unterstützung der Crack- und Reformierungsreaktionen aufweist (Teerabbau). Das entstehende Produktgas wird in einem Rohrbündelwärmetauscher (Heißwasser im Mantelraum, Gas in den Rohren) auf die zulässige Eintrittstemperatur des Gewebefilters (150-200 °C) abgekühlt. Im Filter werden die Partikel (Staub und Flugkoks) zu mehr als 99,8 % abgeschieden und über Förderschnecken in die Wirbelschichtbrennkammer eingebracht. Der Teerabscheidegrad im Filter beträgt 10-30 %. Die Teerabscheidung erfolgt demnach hauptsächlich im Lösungsmittelwäscher, einer mit Rapsöl-Methylester (RME) betriebenen Packungskolonne. In diesem Wäscher kommt es außerdem zu einer weiteren Abkühlung des Produktgases auf 40-50 °C. Dabei kondensiert der Großteil des im Rohproduktgas enthaltenen Wasserdampfes, was die Abscheidung von sauren und basischen Spurenkomponenten (HCl, NH<sub>3</sub>) ermöglicht. Das Kondensat wird in einem Beruhigungstank von der organischen Phase getrennt und einer zweistufigen Verdampfung zugeführt. Um die Akkumulation von Schadstoffen im Prozess zu vermeiden, wird die erste Dampffraktion mit den flüchtigen gelösten Stoffen der Nachbrennkammer zugeführt, während die zweite Fraktion zur Vergaserfluidisierung wieder verwendet wird. Die flüssige Abschlämung aus der Kondensatverdampfung wird gemeinsam mit dem Überschuss aus dem Lösungsmittelkreislauf in die Wirbelschichtbrennkammer eingebracht. Das gereinigte Produktgas wird über das Produktgasgebläse verdichtet und dem Gasmotor zugeführt. Alternativ kann das Gas auch in einem konventionellen Gaskessel verbrannt und die Wärme als Fernwärme genutzt werden.

Das Bettmaterial verlässt den Vergaser durch eine ebenfalls mit Dampf fluidisierte Verbindungsrinne zur Wirbelschichtbrennkammer. Dieser Feststoffstrom enthält auch den auf Grund der begrenzten Verweilzeit im Vergaser nicht umgesetzten Teil der Biomasse (Restkoks).

Die Brennkammer wird in mehreren Stufen so mit Luft fluidisiert, dass im oberen Teil ein annähernd konstanter Feststofftransport erfolgt (Riser). Gleichzeitig verbrennt der Koks und das Bettmaterial wird aufgeheizt. Nach dem Austritt aus dem Riser wird der Feststoff in einem Zyklon vom Rauchgas getrennt und über einen mit Dampf fluidisierten Siphon in den Vergaser zurückgeführt. Im Rauchgasweg befindet sich im Anschluss an den Zyklon eine Nachbrennkammer, in der CO quantitativ oxidiert wird. Das heiße Rauchgas wird zur Vorwärmung der Brennkammerluft und zur Überhitzung des Fluidisierungsdampfes verwendet. Der Luftvorwärmer ist als Rohrbündelwärmetauscher mit dem Rauchgas in den Rohren ausgeführt und wird im Gleichstrom betrieben. Der viel kleinere Dampfüberhitzer folgt als zusätzlicher Mantelraumabschnitt im Gegenstrom am gleichen Rohrbündel. In einer dritten Wärmetauscherstufe wird das Rauchgas mit Heißwasser auf die zulässige Eintrittstemperatur des Rauchgasfilters (PTFE, nicht precoatisiert, 150-200 °C) gekühlt. Im Rauchgasfilter wird die Flugasche effizient abgetrennt. Der gereinigte Rauchgasstrom wird vom Rauchgasgebläse in den Kamin gefördert, wo er sich mit dem Abgas von Gasmotor bzw. Gaskessel mischt.

Ein bei rund 10 bar betriebener Heißwasser-Zwischenkreis nimmt die Wärme im Produktgas- und im Rauchgaskühler auf und dient als Wärmequelle zur Kondensatverdampfung und Fluidisierungsdampferzeugung. Der Wärmeüberschuss aus dem Zwischenkreislauf wird an das Fernwärmenetz übertragen (Fernwärme-Umformer). Der Abgaskühler des Gasmotors und der Produktgaskessel werden direkt mit dem Wasser des Wärmenetzes betrieben. Die Motorkühlwärme kann ebenfalls zum Großteil an das Wärmenetz übertragen werden. [Pröll, 2004]

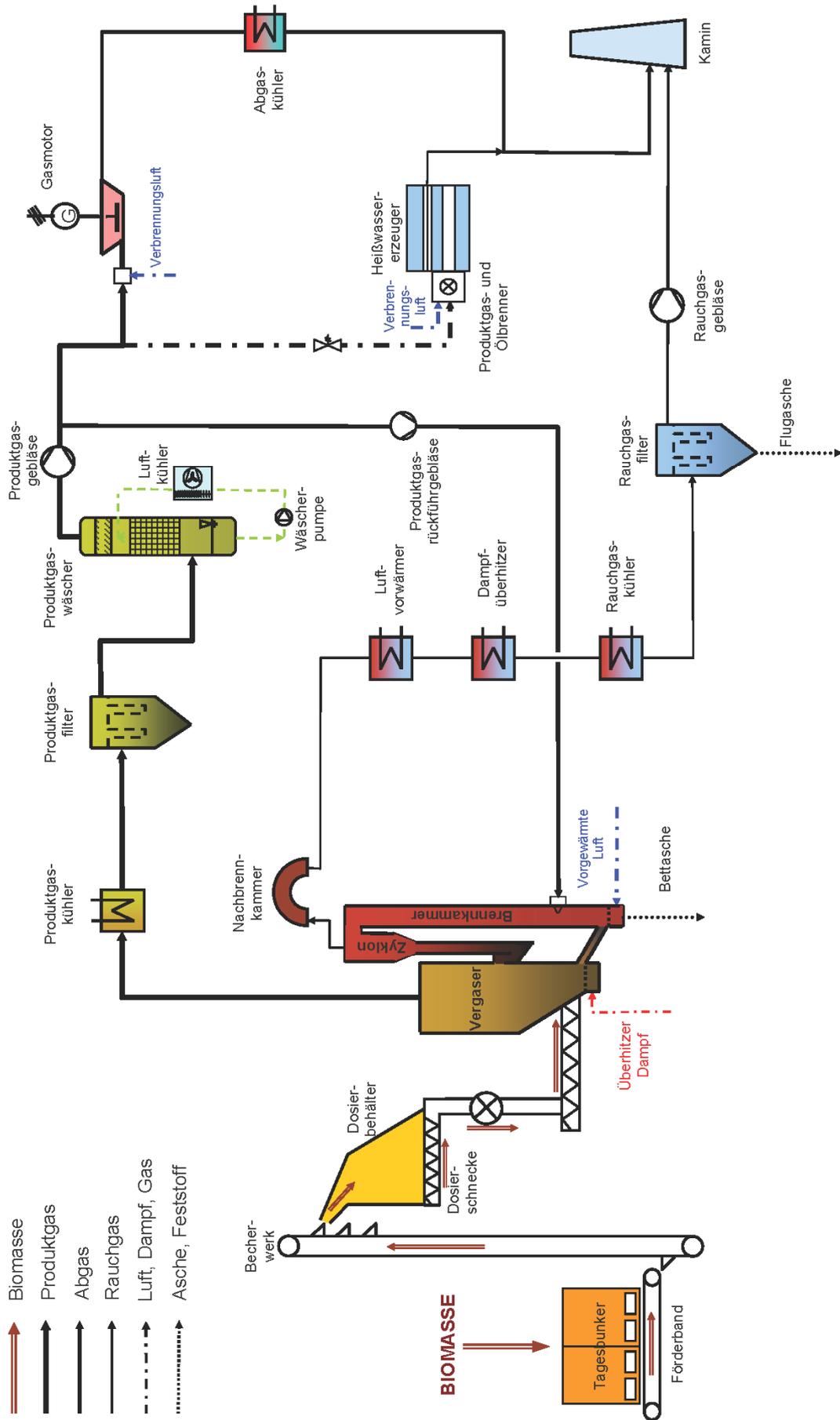


Abb. 7: Anlagenschema des BKW Güssing

An Nebenanlagen sind die Versorgungen der Anlage mit Bettmaterial, Wasser, Druckluft und Stickstoff anzuführen. Neben dem Abgas im Schornstein ist die Flugasche aus dem Rauchgasfilter der einzige die Anlage verlassende Stoffstrom. Die Flugasche weist einen sehr geringen organischen Anteil ( $< 1\%$ ) auf und wird mit einer Schnecke in Sammelcontainer gefördert. Die Auslegungsdaten (für ca. 10 % Wassergehalt) des Biomassekraftwerks Güssing sind in Tab. 2 zusammengefasst. [Pröll, 2004]

Brennstoffwärmeleistung	8000	kW
Chemische Gasleistung	5600	kW
Generatorleistung	2000	kW
El. Eigenverbrauch	200	kW
El. Nettoleistung	1800	kW
Nutzbare Wärmeleistung	4500	kW
Stromkennzahl	0,44	---
Chemischer Wirkungsgrad	70	%
Wirkungsgrad Gasmotor und Generator	35,7	%
El. Anlagenwirkungsgrad (brutto)	25	%
El. Anlagenwirkungsgrad (netto)	22,5	%
Wärmewirkungsgrad	56,3	%
Gesamte Brennstoffausnutzung (netto)	78,8	%

Tab. 2: Auslegungsdaten des Biomassekraftwerks Güssing [Pröll, 2004]

In Abb. 8 ist der Zusammenhang zwischen elektrischem Bruttowirkungsgrad und dem Wassergehalt des eingesetzten Brennstoffes für das Biomassekraftwerk Güssing dargestellt. Bezogen wurde hier auf eine Fluidisierungsdampfmenge von 500 kg/h.

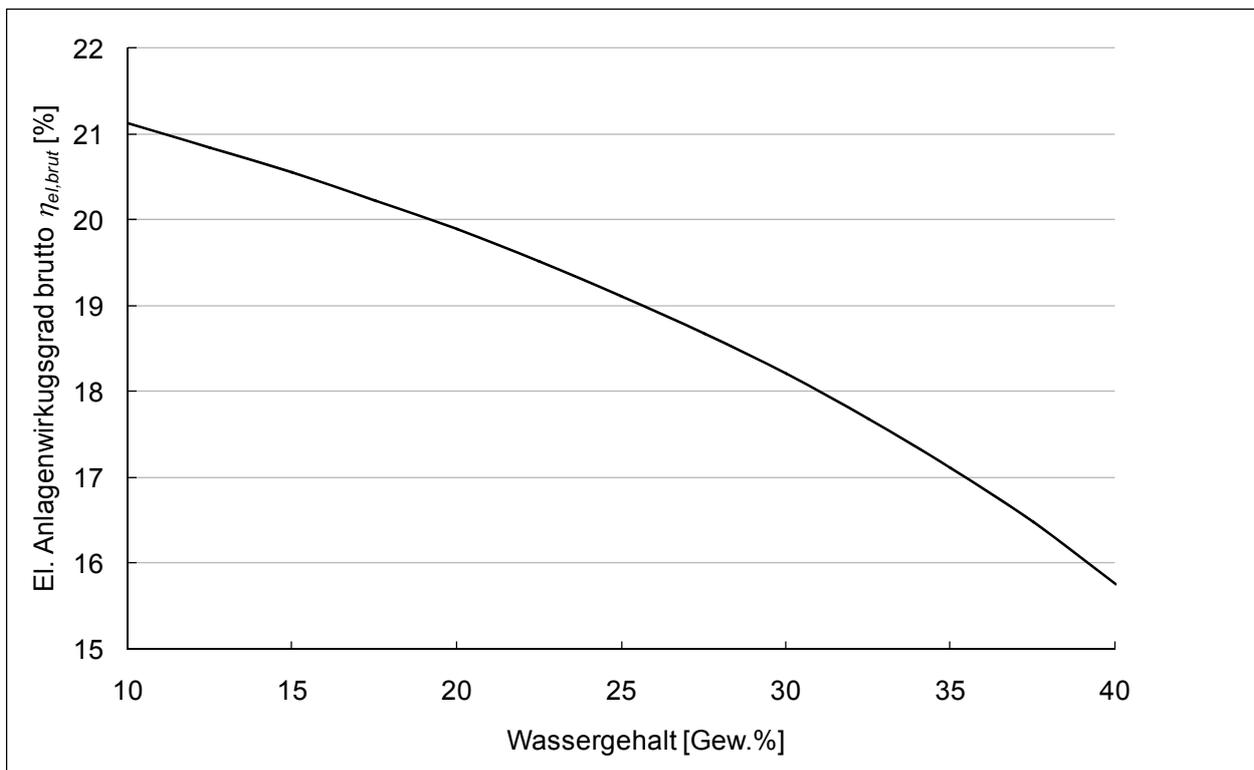


Abb. 8: Elektrischer Anlagenwirkungsgrad brutto in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Brennstoffes  
[Hofbauer et al., 2004]

## 5 Beschreibung der Trocknungs-Versuchsanlage

Der Zweck der unten beschriebenen Versuchsanlage zur Biomassetrocknung, ist es, das Trocknungsverhalten von verschiedenen Fraktionen von Hackschnitzeln zu untersuchen.

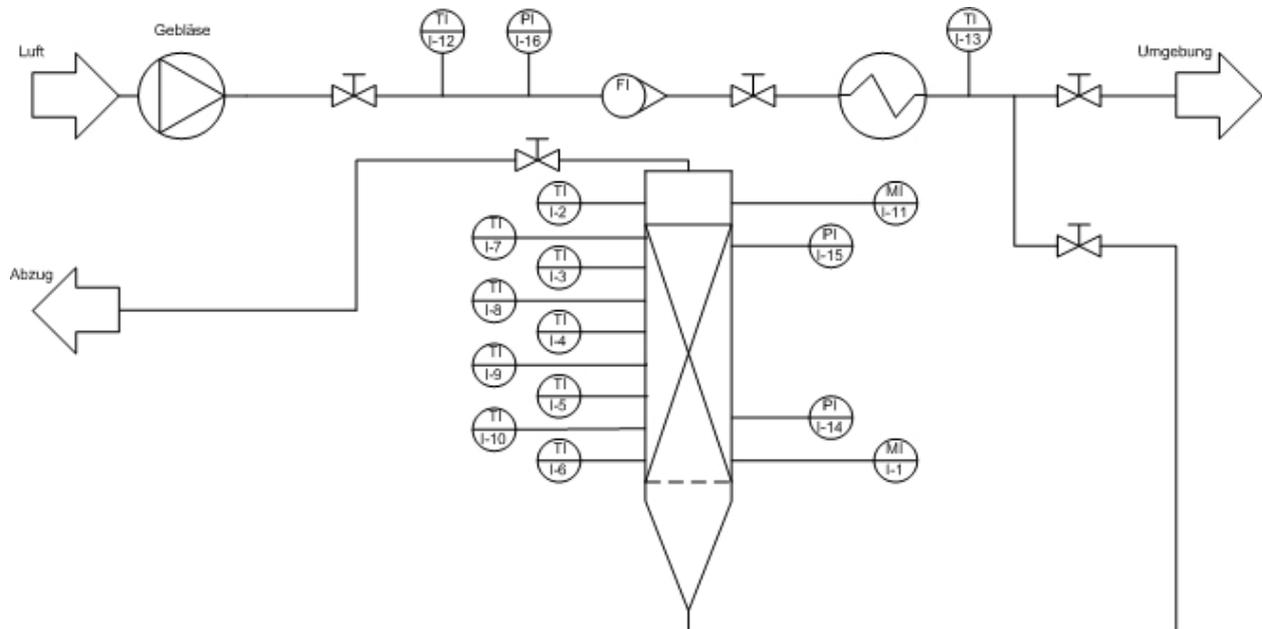


Abb. 9: Schema der Versuchsanlage

Abb. 9 zeigt ein Schema der Versuchsanlage zur Biomassetrocknung. Umgebungsluft wird von einem Gebläse angesaugt. Temperatur und Druck in der Leitung werden unmittelbar nach dem Gebläse gemessen. Der erste Hahn wird gegebenenfalls – bei nicht ausreichender Leistung der Heizschale – gedrosselt, um einen Temperaturanstieg zu bewirken. Der Volumenstrom wird in einem Rotameter online gemessen. Nach der Heizschale, die die Luft auf Solltemperatur bringt, kommt es zu einer Verzweigung, die für das Anfahren der Anlage notwendig ist. Der Druckverlust in der Anfahrleitung ist von Bedeutung, da die Temperatur des Luftstroms direkt nach dem Gebläse stark vom Gegendruck abhängig ist. Mit Hilfe eines Kugelhahns in der Anfahrleitung kann der Druckverlust eingestellt werden. Danach wird die warme Luft von unten in den Trockenreaktor eingeleitet. Hier wird die Feuchte und Temperatur der zugeführten Luft gemessen. Entlang des Trocknungsreaktors sind eine Reihe von Temperaturmessstellen angeordnet. Weiters sind zwei Druckmessstellen im Reaktor angebracht. Nach Durchströmen der Biomasseschüttung wird – bevor die Luft in einen Abzug geführt wird – nochmals Feuchte und Temperatur der abgeführten Luft gemessen. Die Messstelle befindet sich am Anfang der Absaugleitung, da der hier vorliegende kleinere Leitungsquerschnitt zu einer besseren Durchmischung des Gases führt. Würde man unmittelbar oberhalb der Schüttung messen, könnten durch ungleichmäßige Durchströmung der Schüttung je nach Position des Messfühlers

verschiedene Luftzustände gemessen werden. Dies wird durch die genannte Anordnung verhindert.

Die Luft führenden Teile der Anlage sind isoliert ausgeführt, um Wärmeverluste zu vermeiden. Radiale Temperaturunterschiede im Trocknungsreaktor werden so minimiert.

Die Masse der Hackschnitzel vor bzw. nach dem Versuch wird mit einer externen Waage ermittelt. Die Anlage stellt ein diskontinuierliches Trocknungsverfahren dar.

## 5.1 Gebläse

Die Umgebungsluft wird über ein Drehkolbengebläse angesaugt. Der Volumenstrom wird über einen Frequenzumrichter der Fa. Siemens eingestellt und direkt mit einem Rotameter gemessen. Der maximal mögliche Volumenstrom beträgt mehr als 600 Nm<sup>3</sup>/h, was bei einem Leerrohrversuch gegen Umgebungsdruck mittels Gasuhr ermittelt wurde. (Abb. 10)

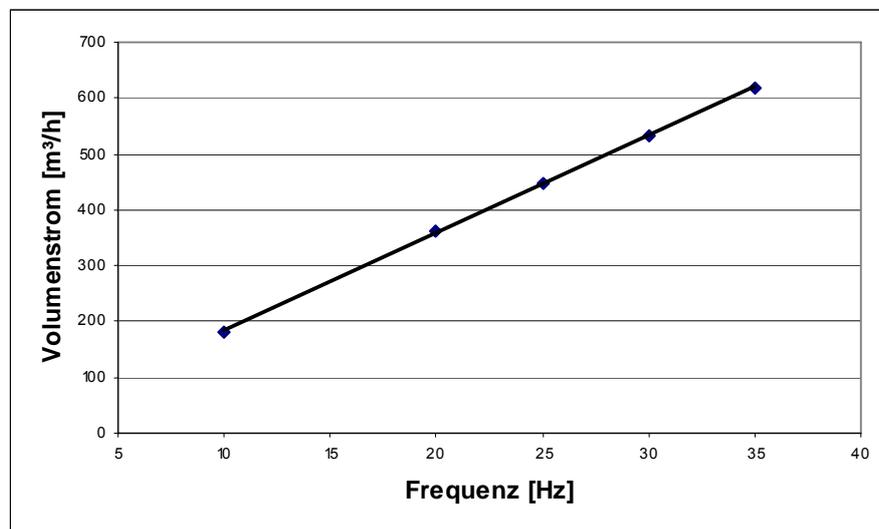


Abb. 10: Gebläsekalibrierung gegen Umgebungsdruck

## 5.2 Heizschale

Die Heizschale mit einer Leistung von 2500 W sitzt auf einem Stahlrohr, das direkt vor dem Trocknungsreaktor angebracht ist. Sie bringt die Luft auf die gewünschte Solltemperatur. Die kurze Strecke bis zum Eintritt in den Reaktor soll Wärmeverluste verringern. Die Regelung der Heizschale wird mit Labview der Firma National Instruments ausgeführt.

## 5.3 Trocknungsreaktor

Dieser ist das Herzstück der Anlage. Es handelt sich dabei um einen oben offenen Zylinder aus Polymethylmethacrylat (PMMA) mit einem Innendurchmesser von 290 mm und einer Höhe von 1850 mm. An der Oberseite ist ein Deckel mit angeschlossenen Absaugschlauch vorgesehen. Innen ist in einer Höhe von 40 mm ein Metallgitter eingebaut, auf welchem die Hackschnitzel zu

liegen kommen. An der Vorderseite befinden sich im Abstand von 80 mm (beginnend in einer Höhe von 40 mm über dem Auflagegitter) 10 Bohrungen für den Einbau von Widerstandsthermometern. Weiters sind zwei Bohrungen zur Messung des Druckabfalles über die Schüttung vorgesehen. Eine knapp über dem Gitter und eine am oberen Ende des Behälters.

## 5.4 Messtechnik

### 5.4.1 Temperaturmessung

Die Temperaturmessung im Reaktor erfolgt mittels Pt-100 – Widerstands-Temperaturfühlern. Der Messeffekt dieser Sensoren ist die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Metallen, Halbleitern und Keramiken. Dadurch können gemessene Temperaturen auf elektrische Widerstände zurückgeführt werden. Verschiedene Werkstoffe weisen auch unterschiedliche Temperaturkennlinien auf (siehe Abb. 11).

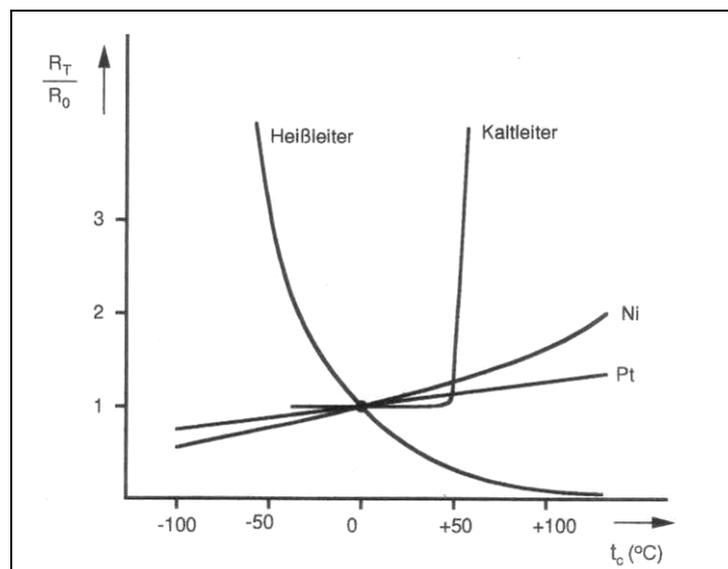


Abb. 11: Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes verschiedener Werkstoffe [Bonfig, 1995]

Es wird zwischen NTC (Negativer Temperaturkoeffizient) und PTC (Positiver Temperaturkoeffizient) unterschieden. Für die technische Temperaturmessung haben unter den PTC-Temperatursensoren Bauarten aus metallischen Werkstoffen – insbesondere Platin und Nickel – größere Bedeutung erlangt. In der ausgeführten Versuchsanlage kommen Platin-Sensoren zum Einsatz. Der elektrische Widerstand steigt mit der Temperatur nahezu linear an. Im Bereich von 0 °C bis 850 °C gilt für Platin:

$$R_{\vartheta} = R_0 \cdot (1 + A_W \cdot \vartheta + B_W \cdot \vartheta^2) \quad (5.1)$$

Der Pt-100 – Temperatur-Messfühler hat einen Widerstandswert von 100  $\Omega$  bei 0 °C. Vorteil dieser Bauart ist eine hohe Empfindlichkeit. [Bonfig, 1995]

### 5.4.2 Durchflussmessung

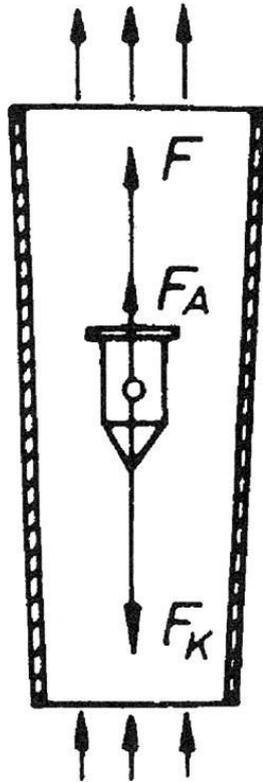


Abb. 12: Kräfte am Schwebekörper  
[Bonfig, 2002]

Die Durchflussmessung mittels Schwebekörper-Durchflussmessgerätes basiert auf dem Prinzip des Widerstandskörpers, der vom Medium senkrecht von unten nach oben umspült wird. Da ein Widerstandskörper in einem konischen Messrohr eingesetzt wird, ändert sich der Widerstandsbeiwert  $c_w$  des Schwebekörpers in Abhängigkeit von der Höhenstellung und somit die Kraft  $F$ , die vom Medium auf ihn ausgeübt wird. In Summe greifen drei Kräfte auf den Schwebekörper an: Die Gewichtskraft  $F_K$ , die Auftriebskraft  $F_A$  und die Widerstandskraft  $F$  (siehe Abb. 12). Diese werden wie folgt bestimmt:

$$F_K = V_K \cdot g \cdot \rho_K \quad (5.2)$$

$$F_A = V_K \cdot g \cdot \rho_M \quad (5.3)$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A_{proj} \cdot \rho_M \cdot U^2 \quad (5.4)$$

Bei Gleichgewicht am Körper muss gelten

$$F_K = F_A + F \quad (5.5)$$

und damit

$$V_K \cdot g \cdot (\rho_K - \rho_M) = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A_K \cdot \rho_M \cdot U^2. \quad (5.6)$$

Bei einer vorgegebenen Messanordnung sind  $V_K$ ,  $g$ ,  $\rho_K$ ,  $\rho_M$ , und  $A_K$  konstant.  $c_w$  ist also eine Funktion der Hubhöhe  $H$  und – da außer den Trägheitskräften auch Reibungskräfte am Aufbau

der Kraft  $F$  beteiligt sind und das Verhältnis der beiden durch die Reynoldszahl  $Re$  dargestellt wird – auch der Reynoldszahl  $Re$ .

$$c_w = f(H, Re) \quad (5.7)$$

Da diese Abhängigkeit einer rein rechnerischen Behandlung nicht zugänglich ist, muss sie empirisch ermittelt werden.

Das Rotameter ist direkt hinter das Gebläse geschaltet und besitzt einen Messbereich von 31 Nm<sup>3</sup>/h bis 310 Nm<sup>3</sup>/h mit Genauigkeitsklasse 1, d.h. der Messfehler bewegt sich im genutzten Messbereich zwischen 1,063 % und 2 % des gemessenen Wertes.

### 5.4.3 Feuchtemessung

Die Feuchtemessung wird von zwei Feuchtefühlern EE29 der Firma Epluse übernommen. Diese kapazitiven Feuchtefühler messen neben der relativen Feuchte im Bereich 0 bis 100 % rF auch die Temperatur mittels eines im selben Gehäuse verbauten Pt-1000 Temperatursensors. Der erste Feuchtefühler ist im Bereich des Lufteintritts in den Trockenreaktor angeordnet, der zweite in der Abzugshaube. Beide sind im Zentrum des Ein- bzw. Austrittsquerschnittes des Reaktors angeordnet. Die Feuchtefühler liefern ein zur Feuchte proportionales und ein zur Temperatur proportionales Stromsignal.

### 5.4.4 Druckmessung

Im Reaktor sind zwei Druckmessstellen vorgesehen. Eine direkt über dem Gitter, auf dem die Hackschnitzel liegen und eine über der Schüttung. So kann der Druckverlust über die Schüttung gemessen werden, ohne dass der vom Gitter erzeugte Druckverlust die Messung beeinträchtigt. Gemessen wird der Druckverlust mittels eines U-Rohrmanometers.

Eine weitere Druckmessung mittels U-Rohrmanometer befindet sich vor dem Rotameter.

### 5.4.5 Messwerterfassung

Als Messwerterfassungsrechner steht ein Windows XP System zur Verfügung. Die Messwerterfassung erfolgt mit Hilfe des FieldPoint Systems der Firma National Instruments. Als Software kommt Labview von National Instruments zum Einsatz. Die Messwerte für die Temperaturen und Feuchten werden alle zwei Sekunden automatisch aufgezeichnet. Der Druckverlust über die Schüttung wird manuell jede Stunde mitgeschrieben.

In Abb. 13 ist die gesamte Anlage zur Biomassetrocknung mit Beschreibung der wichtigsten Anlagenteile dargestellt.

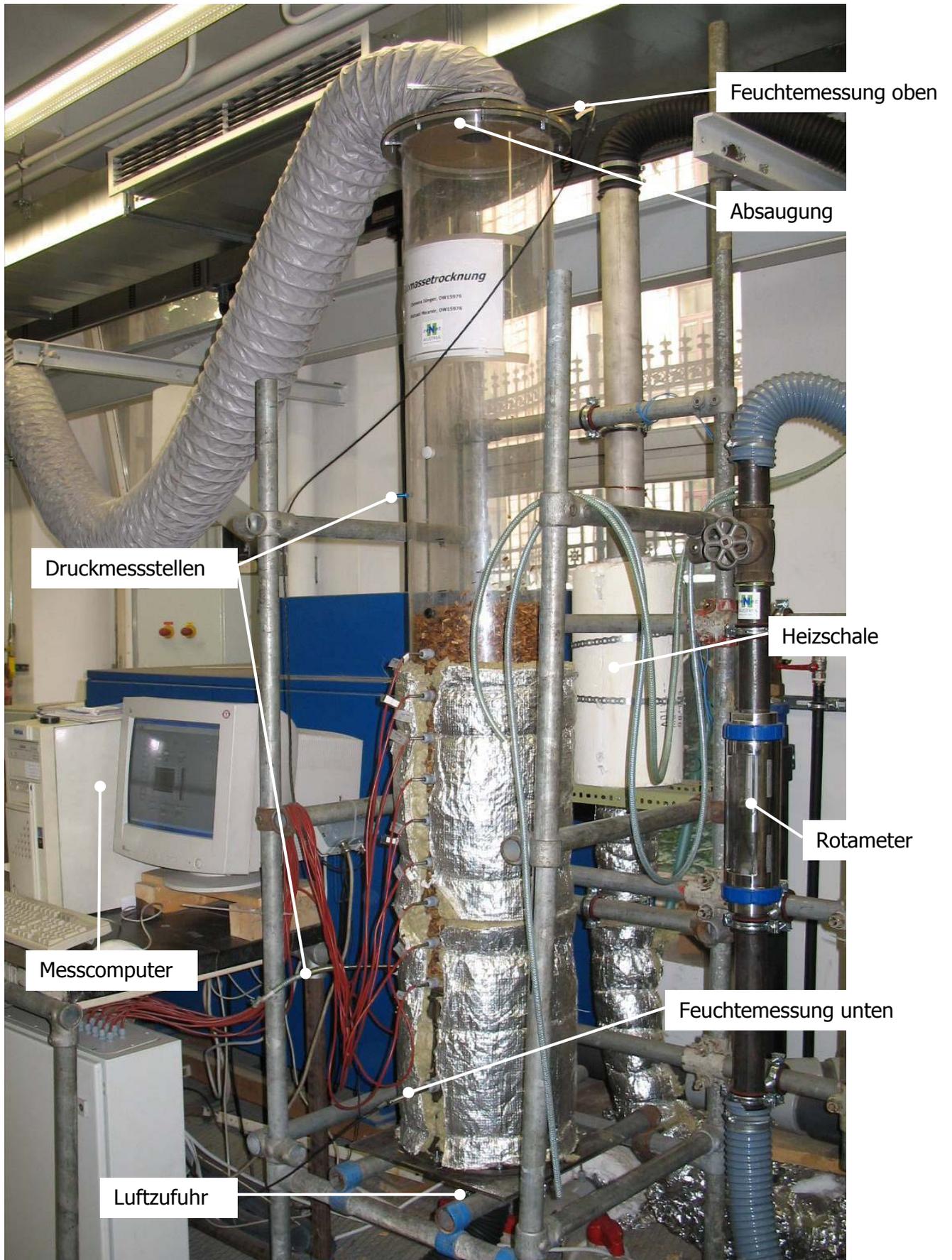


Abb. 13: Versuchsanlage zur Biomassetrocknung

## 6 Trocknungsverhalten von Einzelpartikeln

In diesen Versuchen soll die Massenabnahme bei der Trocknung von Einzelpartikeln untersucht werden. Es werden verschiedene Parameter variiert: Die Art der Probengewinnung (gehackt oder gesägt), die Art der Befeuchtung (rohfeuchtes bzw. wiederbefeuchtetes Holz), die Art des Holzes (Buche, Esche, Fichte), die Temperatur der Trocknungsluft (48 °C, 56 °C, 64 °C, 72 °C), die Leerrohrgeschwindigkeit (0,2 m/s, 0,5 m/s, 0,75 m/s, 1 m/s), die Partikeldicke (2 mm, 6 mm, 10 mm, 14 mm) und die Richtung der Fasern im Partikel (längs bzw. quer).

### 6.1 Versuchsvorbereitung - Einzelpartikel

Die für die Versuche nötigen verschiedenen Holzproben werden aus Bäumen gewonnen, die auf ca. 1000 m Seehöhe gefällt wurden. Nach dem Fällen werden die Bäume in 1 m lange Teile zerlegt und diese in Plastiksäcke verpackt, um die Feuchte zu halten. Gelagert werden die Baumstücke im Freien bei einer mittleren Temperatur von ca. 10 °C.

Kurz vor dem Versuch wird aus dem betreffenden Baumstück eine Probe entnommen – je nach Versuch gehackt oder gesägt.

### 6.2 Versuchsanlage

Die in Punkt 5 beschriebene Anlage wird in der Art modifiziert, dass statt der Abzugshaube eine T-förmige Vorrichtung mit zwei Federwaagen zum Einsatz kommen (siehe Abb. 14). Die Federwaagen haben einen Messbereich von 10 g bzw. 60 g. Die Federwaagen werden vor dem Einsatz kalibriert, um den Einfluss von Temperatur der Trocknungsluft und Leerrohrgeschwindigkeit festzustellen. Beispielhaft ist in Tab. 3 die Kalibrierung der Federwaage mit Messbereich 10 g dargestellt.

Lufttemperatur [°C]	Leerrohrgeschwindigkeit [m/s]	Reale Masse [g]	Angezeigte Masse [g]
20	0	7,65	7,65
56	0	7,65	7,8
20	0,5	7,65	7,65
56	0,5	7,65	7,8

Tab. 3: Kalibrierung der Federwaage 10 g

Aus den Ergebnissen der Kalibrierung ergibt sich kein Einfluss der Leerrohrgeschwindigkeit auf die Anzeige der Federwaage. Daraus folgt, dass ein Abschalten der Luft während der Messwertaufnahme nicht nötig ist.

Der Fehler des angezeigten Wertes gegenüber dem tatsächlichen Wert auf Grund der Temperatur und damit der veränderten Federkennlinie beträgt ca. 2 % bei 56 °C. Die Federwaage muss deshalb vor Versuchsbeginn auf Temperatur gebracht und nachkalibriert werden.

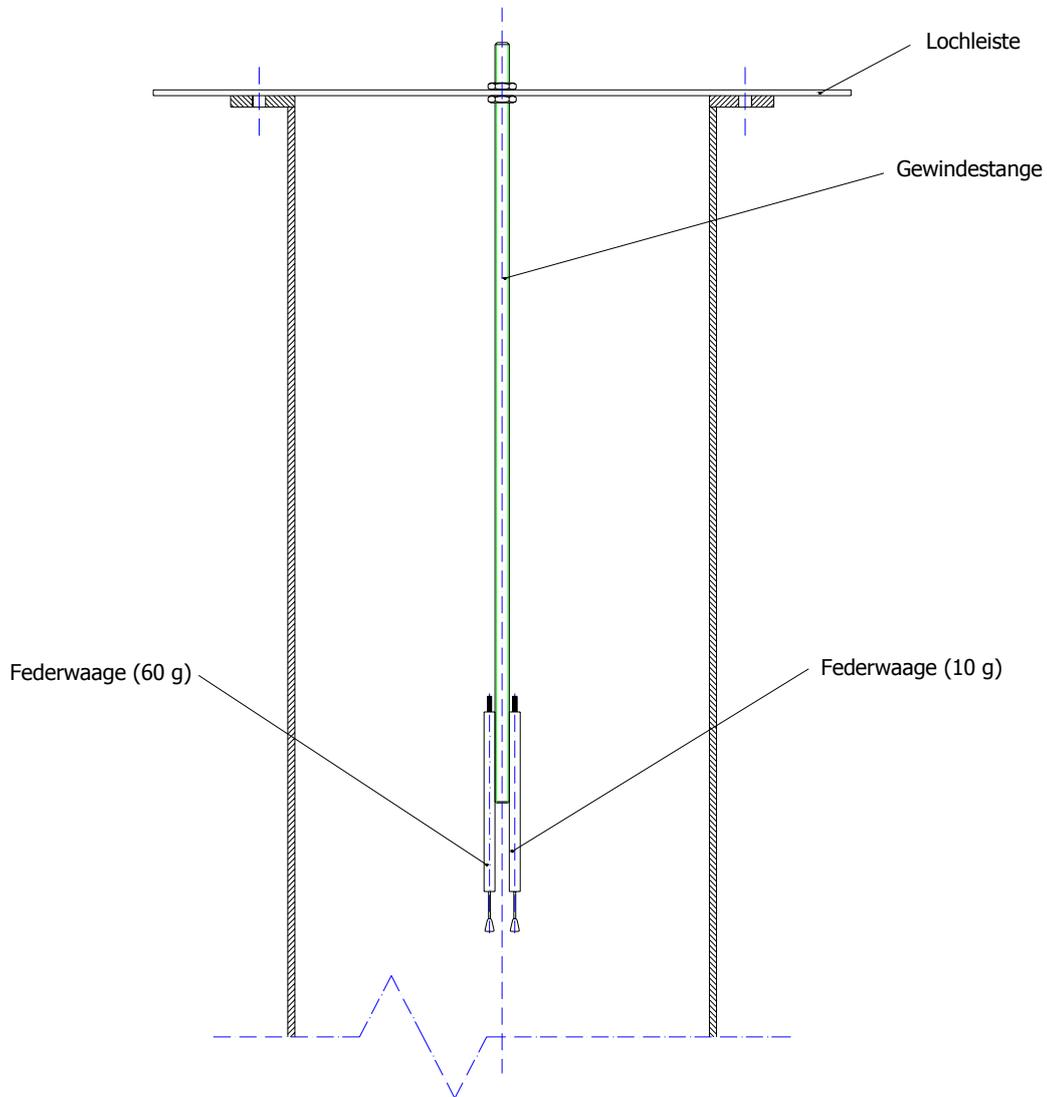


Abb. 14: Versuchsaufbau für das Trocknungsverhalten des Einzelpartikels

### 6.3 Durchführung der Versuche

Vor dem Versuch wird die Anlage in Betrieb genommen, d.h. die gewünschte Lufttemperatur und der Volumenstrom werden eingestellt und so die Luft vorgewärmt. Das Einzelpartikel wird vor dem Versuch auf der Analysenwaage ausgewogen.

Die Federwaage befindet sich während des Anfahrens bereits im Reaktor, um anschließend durch Nachkalibrieren den Fehler zufolge der Erwärmung ausgleichen zu können.

Anschließend wird das Partikel mit einer Klemme an der Federwaage befestigt und hängend in den Reaktor eingebracht. Nun wird die Gewichtsabnahme durch Ablesen ermittelt und in den PC übertragen.

Nach Erreichen eines statischen Zustandes der Masse wird das Partikel entnommen, gewogen und schließlich im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Darauf wird es noch einmal gewogen, um die Trockenmasse zu bestimmen.

Die Versuchsreihenfolge ist in Tab. 4 ersichtlich. Die Versuche mit den Nummern 1 bis 4 dienen zur Untersuchung der Unterschiede im Trocknungsverhalten zwischen gesägten und gehackten, rohfeuchten und wiederbefeuchteten Partikeln. In Versuch Nr. 5 wird das Verhalten eines doppelt wiederbefeuchteten Partikels untersucht. Die Versuche Nr. 6 bis 8 stellen den Einfluss der Holzart (Esche, Fichte bzw. Buche) dar. Der Einfluss der Lufttemperatur wird in den Versuchen Nr. 9 bis 12 untersucht, während die Versuche Nr. 13 bis 20 Variationen von Leerrohrgeschwindigkeit und Partikeldicke zum Inhalt haben. Die Versuche Nr. 21 und 22 schließlich stellen den Einfluss der Faserrichtung dar.

In Abb. 17 sind beispielhaft die verschiedenen, in den Versuchen verwendeten Einzelpartikel dargestellt.

Versuchsnummer	Bearbeitung gehackt / gesägt	Befeuchtung rohfeucht / wiederbef.	Holzart	Lufttemperatur [°C]	Leerrohrgeschwindigkeit [m/s]	Partikelabmaße [mm]	Faserrichtung längs / quer
1	gehackt	original	Buche	56	0,5	100 x 30 x 6	längs
2	gesägt	original	Buche	56	0,5	100 x 30 x 6	längs
3	gehackt	wiederbefeuchtet	Buche	56	0,5	100 x 30 x 6	längs
4	gesägt	wiederbefeuchtet	Buche	56	0,5	100 x 30 x 6	längs
5	gehackt	2 x wiederbefeuchtet	Buche	56	0,5	100 x 30 x 6	längs
6	gesägt	rohfeucht	Esche	56	0,5	100 x 30 x 6	längs
7	gesägt	rohfeucht	Fichte	56	0,5	100 x 30 x 6	längs
8	gesägt	rohfeucht	Buche	56	0,5	100 x 30 x 6	längs
9	gesägt	wiederbefeuchtet	Buche	48	0,5	100 x 30 x 6	längs
10	gesägt	wiederbefeuchtet	Buche	56	0,5	100 x 30 x 6	längs
11	gesägt	wiederbefeuchtet	Buche	64	0,5	100 x 30 x 6	längs
12	gesägt	wiederbefeuchtet	Buche	72	0,5	100 x 30 x 6	längs
13	gesägt	wiederbefeuchtet	Buche	56	0,2	100 x 30 x 6	längs
14	gesägt	wiederbefeuchtet	Buche	56	0,5	100 x 30 x 6	längs
15	gesägt	wiederbefeuchtet	Buche	56	0,75	100 x 30 x 6	längs
16	gesägt	wiederbefeuchtet	Buche	56	1	100 x 30 x 6	längs
17	gesägt	wiederbefeuchtet	Buche	56	0,5	100 x 30 x 2	längs
18	gesägt	wiederbefeuchtet	Buche	56	0,5	100 x 30 x 6	längs
19	gesägt	wiederbefeuchtet	Buche	56	0,5	100 x 30 x 10	längs
20	gesägt	wiederbefeuchtet	Buche	56	0,5	100 x 30 x 14	längs
21	gesägt	wiederbefeuchtet	Esche	56	0,5	100 x 30 x 6	längs
22	gesägt	wiederbefeuchtet	Esche	56	0,5	100 x 30 x 6	quer

Tab. 4: Versuchsreihenfolge für das Trocknungsverhalten von Einzelpartikeln

Der Einfluss der Feuchte der eintretenden Luft kann mit dem beschriebenen Versuchsaufbau nicht untersucht werden. In Abb. 15 sind die absoluten Feuchten der Trocknungsluft am Eintritt für alle Versuche angegeben. Sie bewegen sich in einem der Jahreszeit entsprechenden Rahmen. Die geringen Luftfeuchteschwankungen von weniger als 2 g Wasser/kg Luft werden vernachlässigt, da sich auf Grund dessen die Kühlgrenztemperatur bei gleicher Luftfeuchte nur in sehr geringem Maß ändert. Diese Änderung ist vernachlässigbar klein im Vergleich zum Intervall Luftfeuchte - Kühlgrenztemperatur.

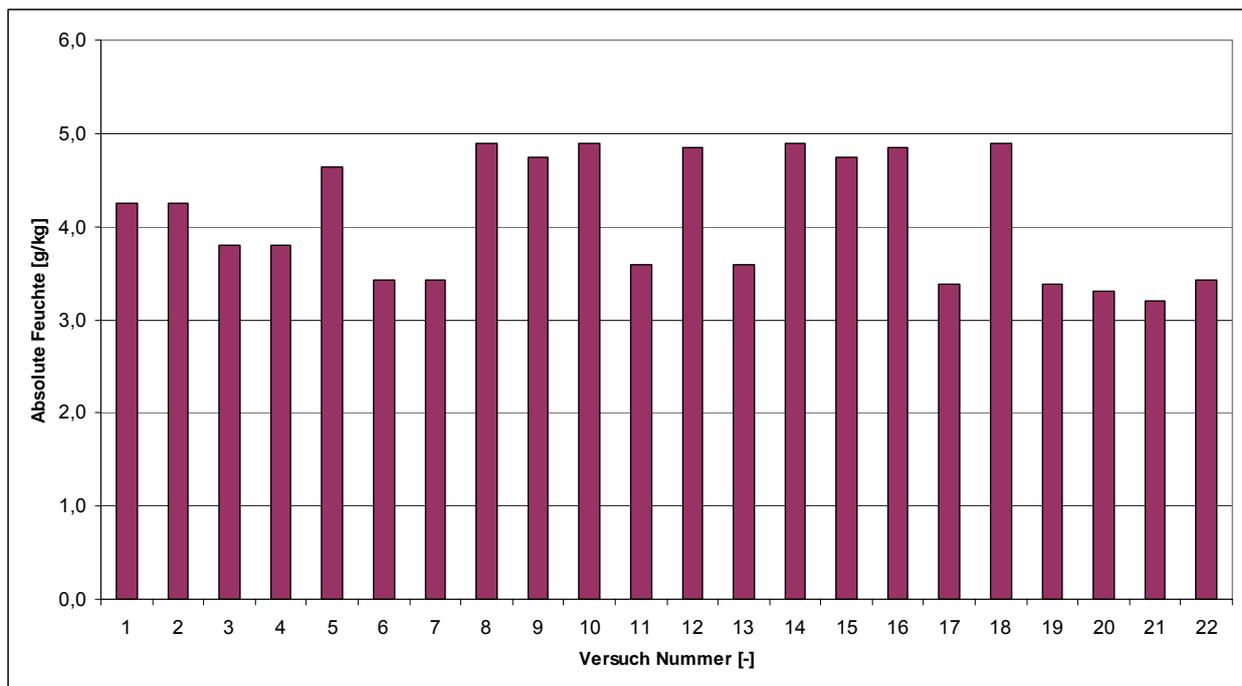


Abb. 15: Absolute Feuchten der Trocknungsluft am Eintritt

### 6.3.1 Vergleich von gesägten und gehackten Partikeln

In den ersten Versuchen mit dem Einzelpartikel wird auf den Unterschied in der Vorbereitung des Einzelpartikels eingegangen. Die Vermutung ist, dass ein Unterschied zwischen gehacktem und gesägtem Partikel besteht, da davon ausgegangen wird, dass beim Sägen die Flächen des Partikels „versiegelt“ werden und so der Feuchtetransport über die Oberfläche erschwert wird.

Es werden zwei Partikel gleicher Größe vorbereitet. Beide haben die Maße 100 x 30 x 6 mm und sind aus rohfeuchtem Buchenholz.

Gemessen wird mit der in Punkt 6.2 beschriebenen Anordnung. Aus der ermittelten Masse des Partikels  $m_p$  und der trockenen Masse des Partikels  $m_{p,tr}$  nach dem Trockenschrank wird jeweils die Feuchte  $X$  über

$$X = \frac{m_p - m_{p,tr}}{m_{p,tr}} \cdot 100 \quad (6.1)$$

bestimmt und über der Zeit aufgetragen. Den Vergleich zwischen gehacktem und gesägtem Partikel zeigt Abb. 16. Hier ist erkennbar, dass die Kurven sehr nahe beieinander liegen. Zu Gunsten der Reproduzierbarkeit wird im weiteren Verlauf der Versuche daher auf das Hacken verzichtet und es werden nur mehr gesägte Proben verwendet.

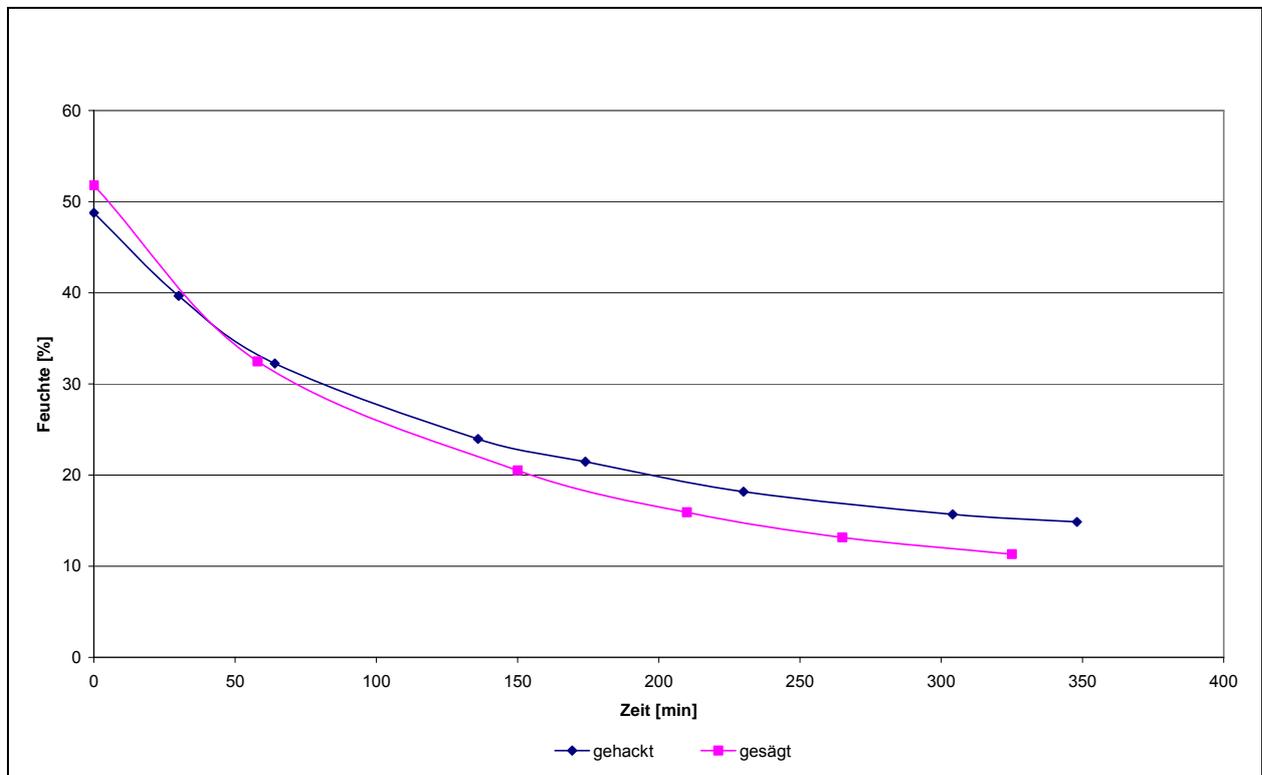


Abb. 16: Gegenüberstellung der Feuchteabnahme eines gehackten und eines gesägten Buchenpartikels mit 6 mm Dicke bei 0,5 m/s und 56 °C

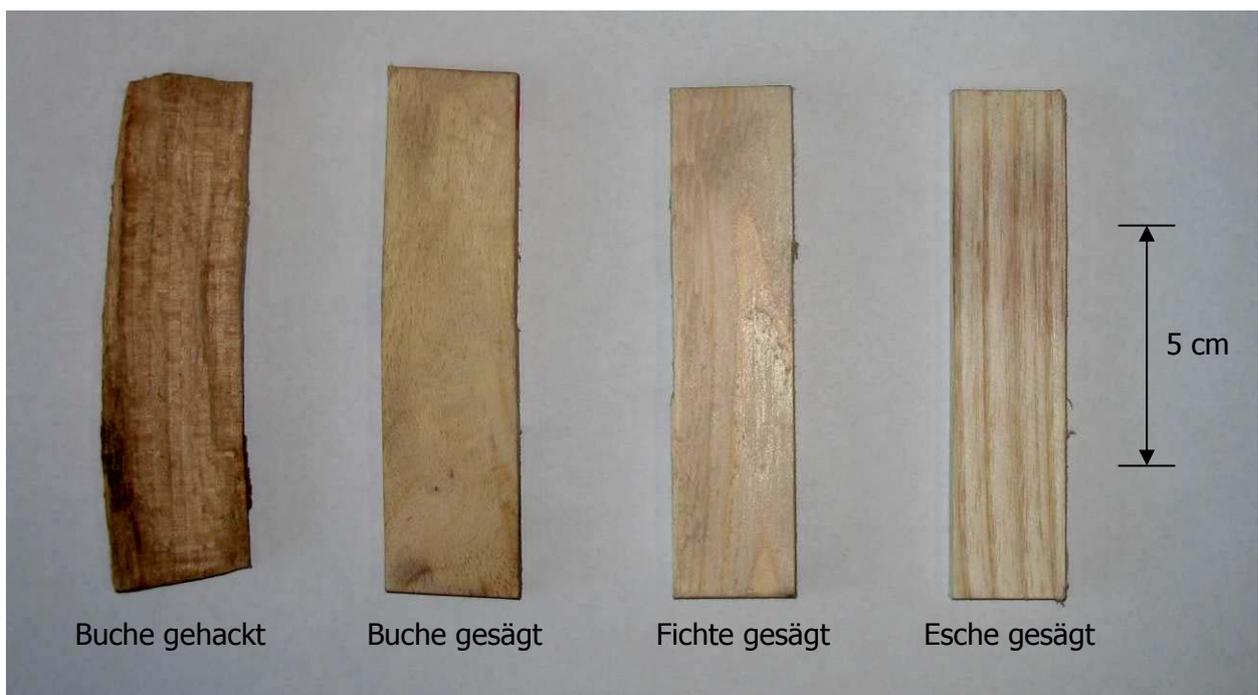


Abb. 17: Verschiedene Einzelpartikel

### 6.3.2 Vergleich von rohfeuchten und wiederbefeuchteten Partikeln

Hier wird der Unterschied im Trocknungsverhalten zwischen rohfeuchten und wiederbefeuchteten Partikeln untersucht.

Zwischen ein- und zweimal wiederbefeuchteten, gehackten Partikeln ist kein signifikanter Unterschied im Trocknungsverhalten festzustellen (siehe Abb. 18). Es wird dreimal dasselbe Partikel verwendet. Die Kurven der wiederbefeuchteten Partikel liegen gut beieinander. Sie weichen jedoch deutlich von der Kurve des rohfeuchten Partikels ab. Dasselbe gilt für gesägte Partikel (siehe Abb. 19).

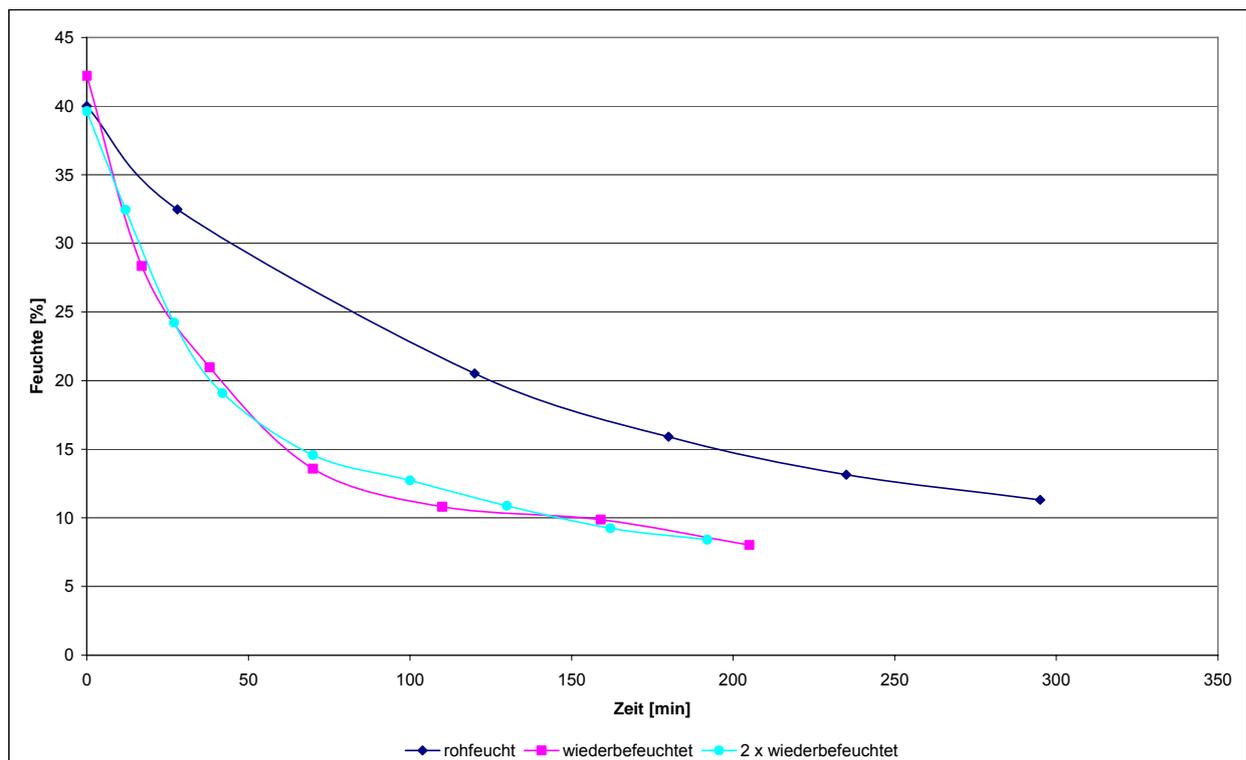


Abb. 18: Gegenüberstellung der Feuchteabnahme eines verschieden oft wiederbefeuchteten, gehackten Buchenpartikels mit 6 mm Dicke bei 0,5 m/s und 56 °C

Es ist anzumerken, dass die weiteren Versuche zu Gunsten der Reproduzierbarkeit mit wiederbefeuchteten Partikeln durchgeführt werden. Nur durch dieses Vorgehen wird es möglich, Temperatur- und Geschwindigkeitsvariation bei immer gleichen Bedingungen (Anfangsfeuchte, Partikeldicke, Faserrichtung) durchzuführen. Diese gleichen Bedingungen verlangen auch die Verwendung von ein und demselben Partikel.

Bei Verwendung der nachfolgend dargestellten Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass es sich um wiederbefeuchtete Partikel handelt, welche in ihrem Trocknungsverhalten von rohfeuchten Partikeln abweichen (siehe Abb. 18 und Abb. 19). Ursache für diese Abweichung könnte sein, dass bei Wiederbefeuchtung der Partikel die Kapillaren des Holzes nicht im selben Ausmaß mit Wasser gefüllt werden, als wenn sie im rohfeuchten Zustand vorliegen.

Dieser Zusammenhang wird im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht und sollte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

Beispielsweise verdreifacht sich die Trocknungsdauer bei rohfeuchten Buchenpartikeln bei einer Temperatur der Trocknungsluft von 56 °C, einer Leerrohrgeschwindigkeit von 0,5 m/s und einer Partikeldicke von 6 mm.

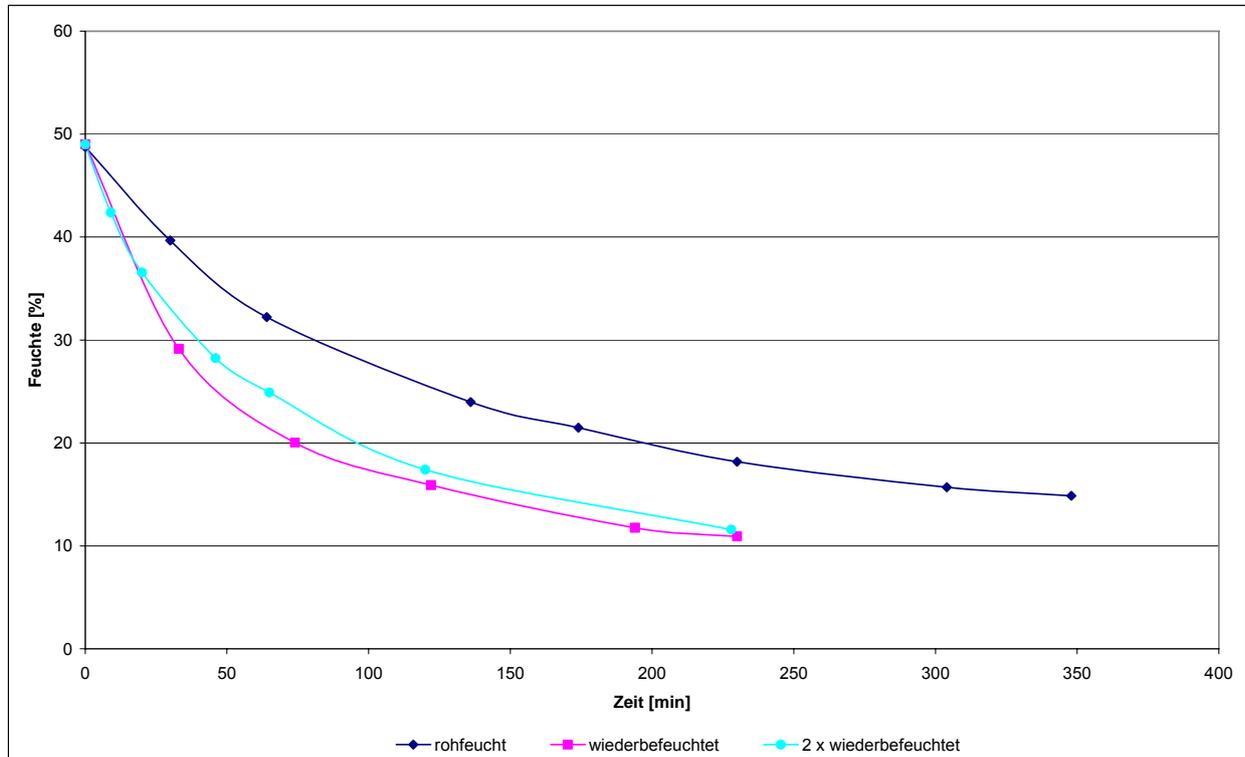


Abb. 19: Gegenüberstellung der Feuchteabnahme eines verschieden oft wiederbefeuchteten, gesägten Buchenpartikels mit 6 mm Dicke bei 0,5 m/s und 56 °C

### 6.3.3 Holzartvariation

Hier wird das Trocknungsverhalten von Partikeln verschiedener Holzarten (Buche, Esche und Fichte) mit identen Abmessungen untersucht. Die Anfangsfeuchte wird mit rund 41 % Feuchte konstant gehalten. Die Temperatur der Trocknungsluft beträgt 56 °C; die Leerrohrgeschwindigkeit 0,5 m/s. Der Vergleich der aufgenommenen Feuchtekurven ergibt keinen großen Unterschied. Die Hölzer zeigen nahezu identes Trocknungsverhalten. Einzig das Fichtenpartikel liegt fast durchwegs unter den Kurven der beiden anderen Hölzer (siehe Abb. 20). Die Buche liegt im Bereich geringer Feuchten über den beiden anderen Hölzern.

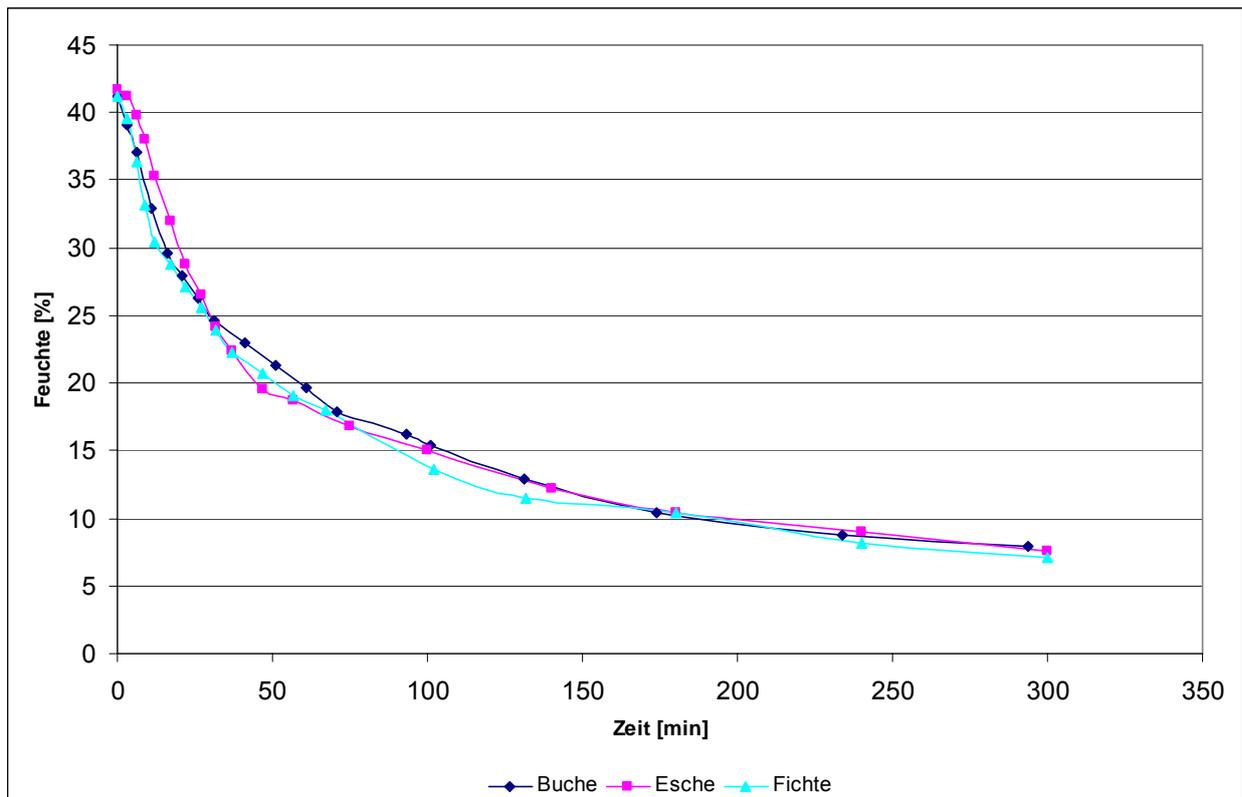


Abb. 20: Verlauf der Feuchteabnahme bei der Holzartvariation (6 mm, 0,5 m/s, 56 °C)

Dies wird auch durch Abb. 21 bestätigt. Esche und Fichte liegen im Bereich 25 % Feuchte und 20 % Feuchte knapp beieinander, während die Buche mehr Trockenzeit benötigt. Bei 15 % Feuchte ist der Unterschied deutlicher. Die Buche braucht am meisten Trockenzeit zum Erreichen der gewünschten Feuchte, aber auch Esche und Fichte zeigen jetzt eine Differenz.

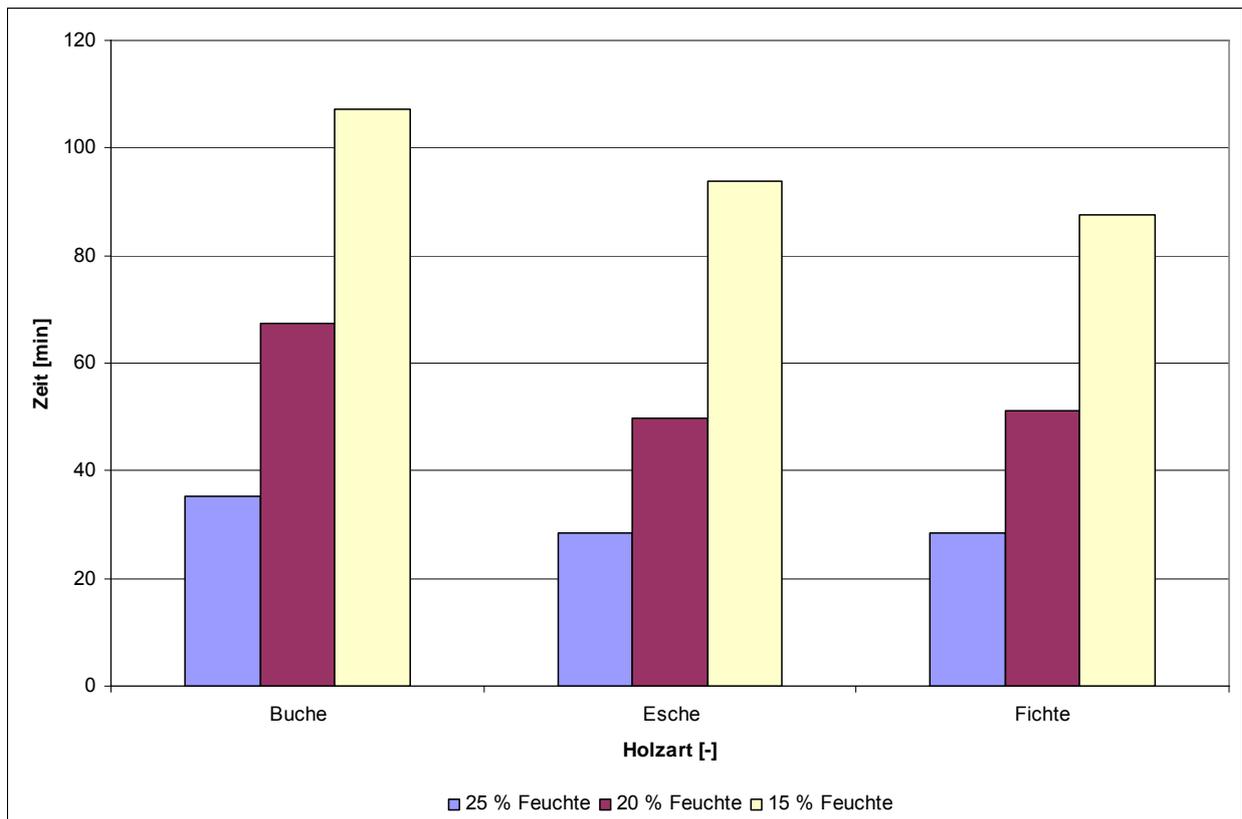


Abb. 21: Zeit bis zum Erreichen unterschiedlicher Feuchten für verschiedene Holzarten  
(6 mm, 0,5 m/s, 56 °C)

### 6.3.4 Temperaturvariation

Bei der Temperaturvariation wird der Einfluss der Temperatur der Trocknungsluft auf das Trocknungsverhalten von Einzelpartikeln untersucht. Die Versuche werden mit wiederbefeuchteten Buchenpartikeln mit einer Leerrohrgeschwindigkeit von 0,5 m/s durchgeführt. Alle Hackschnitzel werden bis zu einer Feuchte von ca. 41 % befeuchtet und anschließend getrocknet. In Abb. 22 sind die Ergebnisse dieser Versuche abgebildet.

Es ist erkennbar, dass mit steigender Temperatur der Trocknungsluft die Feuchte des Hackschnitzels schneller abnimmt. (Abb. 23) Dies ist durch den schnelleren Wärmeeintrag durch die erhöhte Temperatur zu erklären, die bei konstanter relativer Luftfeuchtigkeit auch die Konzentrationsdifferenz des Wasserdampfes zwischen Partikel und umgebender Luft erhöht.

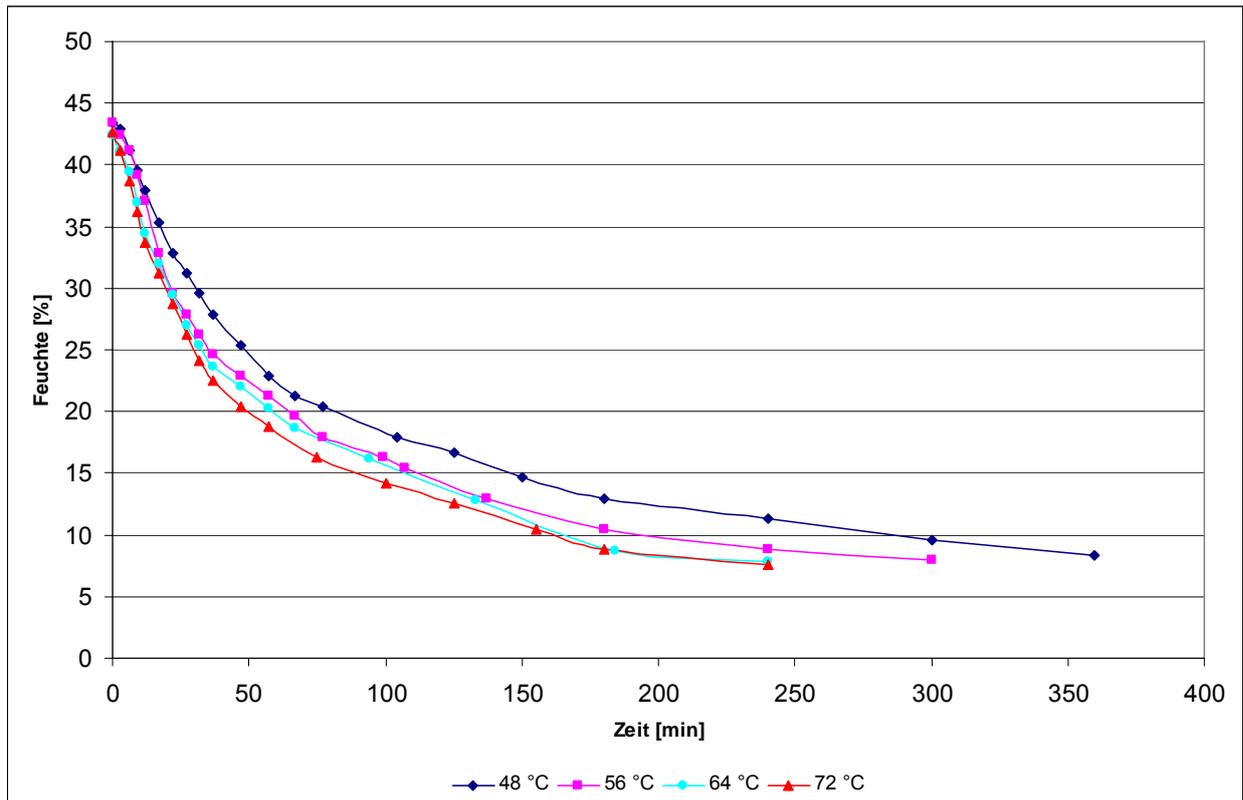


Abb. 22: Verlauf der Feuchteabnahme bei der Temperaturvariation (6 mm, 0,5 m/s)

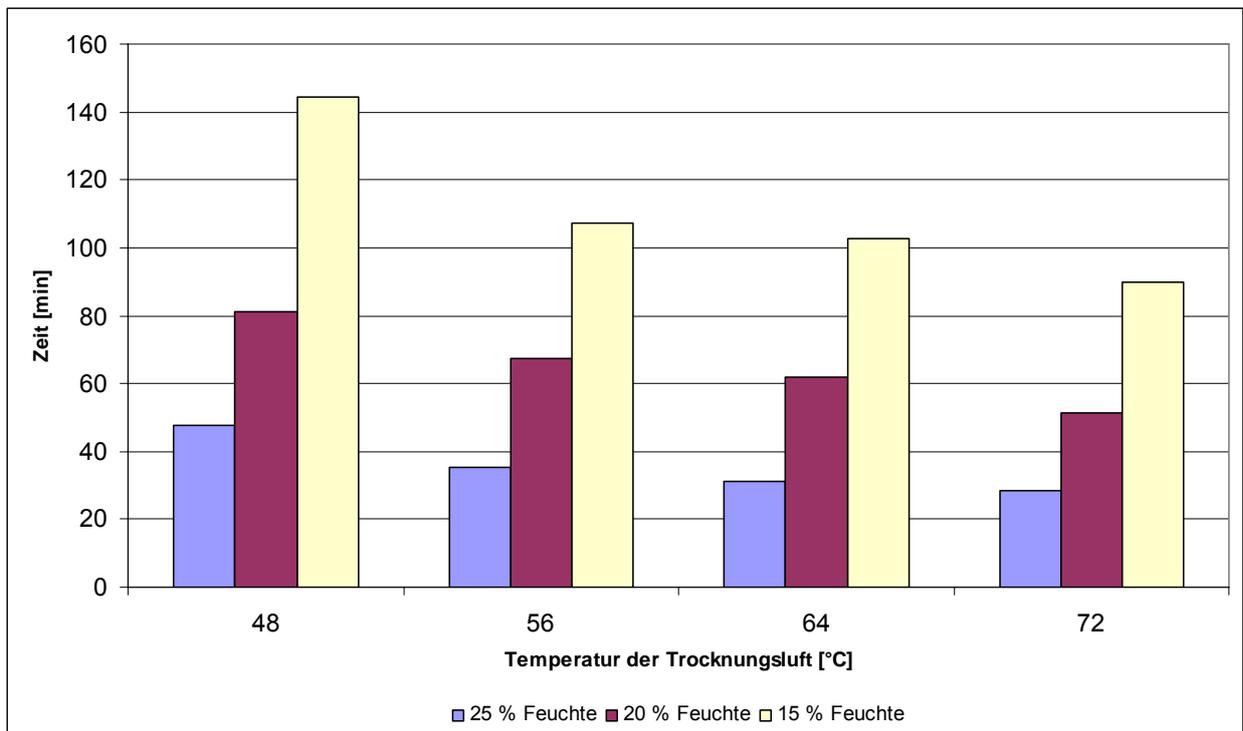


Abb. 23: Zeit bis zum Erreichen unterschiedlicher Feuchten für verschiedene Trocknungslufttemperaturen (6 mm, 0,5 m/s)

### 6.3.5 Geschwindigkeitsvariation

Der Einfluss der Leerrohrgeschwindigkeit auf das Trocknungsverhalten wird in diesen Versuchen dokumentiert. Auch hier werden wiederbefeuchtete Buchenpartikel herangezogen. Die Temperatur der Trocknungsluft beträgt bei allen Versuchen 56 °C; die Anfangsfeuchte wiederum 41 %. Das Ergebnis dieser Versuche führt zu der Aussage, dass mit steigender Geschwindigkeit der Trocknungsluft die Feuchtigkeit der Partikel schneller abtransportiert wird. Erklärbar wird diese Aussage dadurch, dass durch die Erhöhung der Leerrohrgeschwindigkeit auch die Geschwindigkeit des Stoff- und Energietransportes zwischen Partikel und Trocknungsluft erhöht wird. Dies ist in Abb. 24 erkennbar.

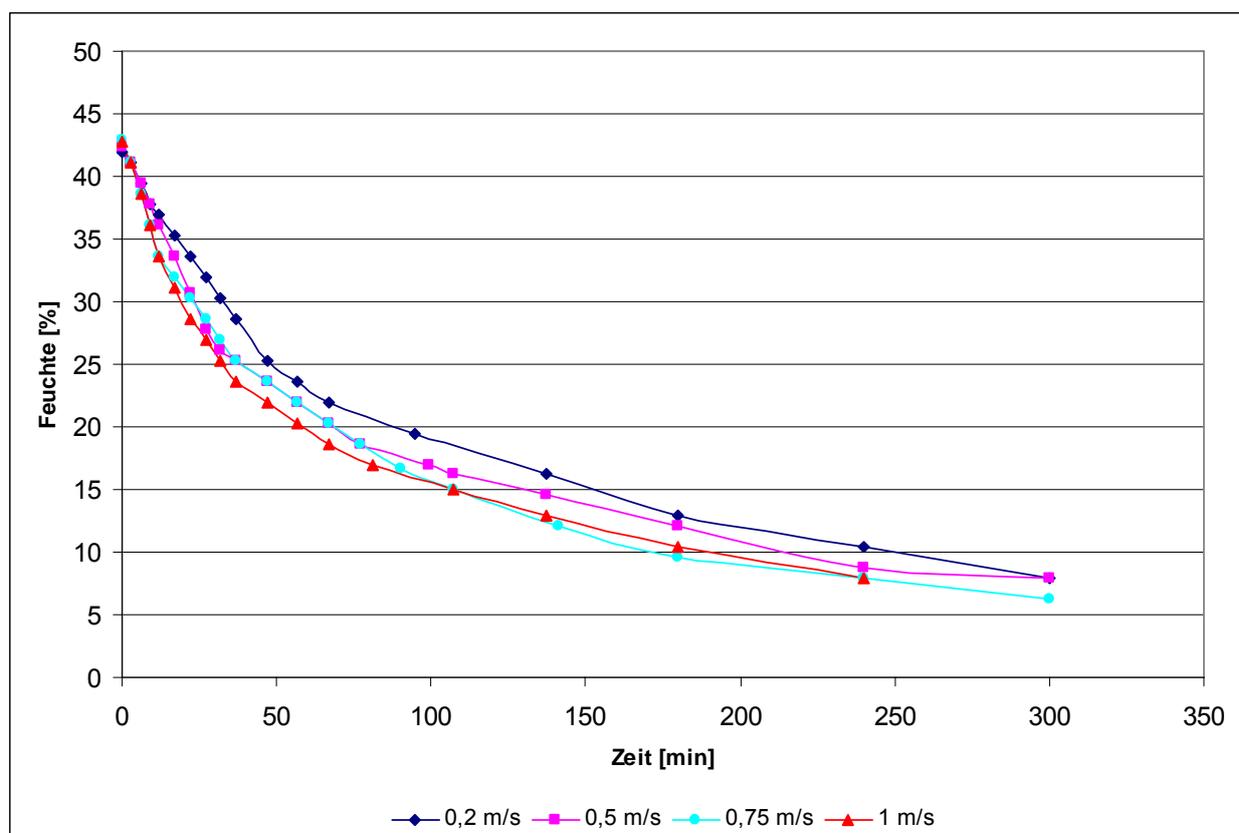


Abb. 24: Verlauf der Feuchteabnahme bei der Geschwindigkeitsvariation (6 mm, 56 °C)

Der Einfluss der Leerrohrgeschwindigkeit wird in Abb. 25 deutlich. Dieser Einfluss ist zwar nicht so signifikant wie beispielsweise der Einfluss der Dicke (siehe Punkt 6.3.6), aber doch bemerkbar. Wie zu erwarten, nehmen die Zeiten bis zum Erreichen von bestimmten Holzfeuchten mit zunehmender Leerrohrgeschwindigkeit ab.

Eine Verfünfachung der Geschwindigkeit reduziert die Trocknungsdauer etwa um ein Drittel.

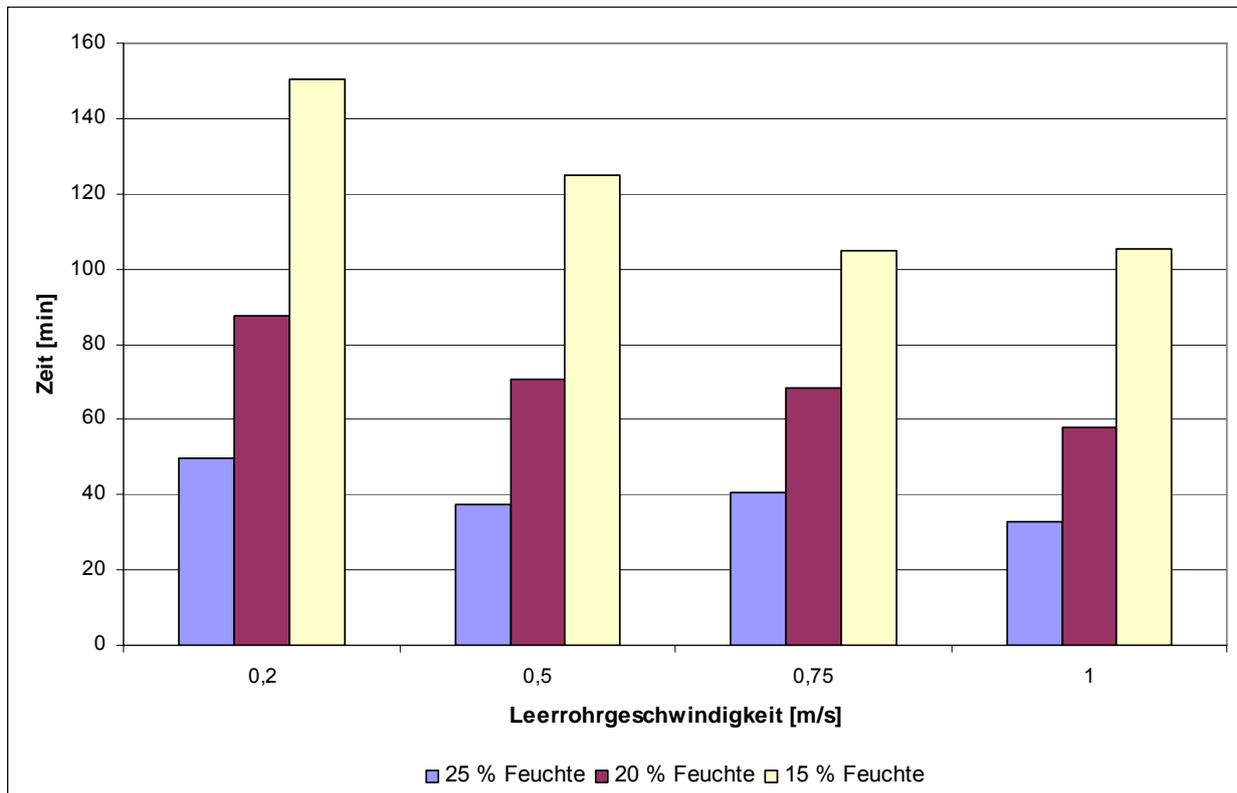


Abb. 25: Zeit bis zum Erreichen unterschiedlicher Feuchten für verschiedene Leerrohrgeschwindigkeiten (6 mm, 56 °C)

### 6.3.6 Partikeldickenvariation

Hier wird die Leerrohrgeschwindigkeit mit 0,5 m/s und die Temperatur der Trocknungsluft mit 56 °C konstant gehalten, um den Einfluss der Dicke eines Hackschnittzels auf das Trocknungsverhalten zu untersuchen. Verwendet werden Buchenpartikel mit 2, 6, 10 und 14 mm Dicke. Länge und Breite der Partikel sind nach wie vor 100 mm bzw. 30 mm. Die Partikeldicke hat – wie in Abb. 26 ersichtlich – einen bedeutenden Einfluss auf das Trocknungsverhalten. Je dicker ein Hackschnittzel ist, desto mehr Zeit wird für die Trocknung notwendig, da mit steigender Partikelgröße die aus dem Partikel zu verdampfende Menge Flüssigkeit zunimmt, die zur Verfügung stehende Oberfläche jedoch konstant bleibt. Eine weitere hemmende Rolle spielen innere Transportwiderstände.

Dies ist auch gut in Abb. 27 erkennbar. Beispielsweise werden für ein Partikel mit 2 mm Dicke bis zum Erreichen einer Feuchte von 15 % 30 Minuten benötigt, während man für ein Partikel mit 14 mm Dicke bereits 222 Minuten benötigt. Die Trocknung von Partikeln mit der siebenfachen Dicke benötigt also in etwa die siebenfache Zeit.

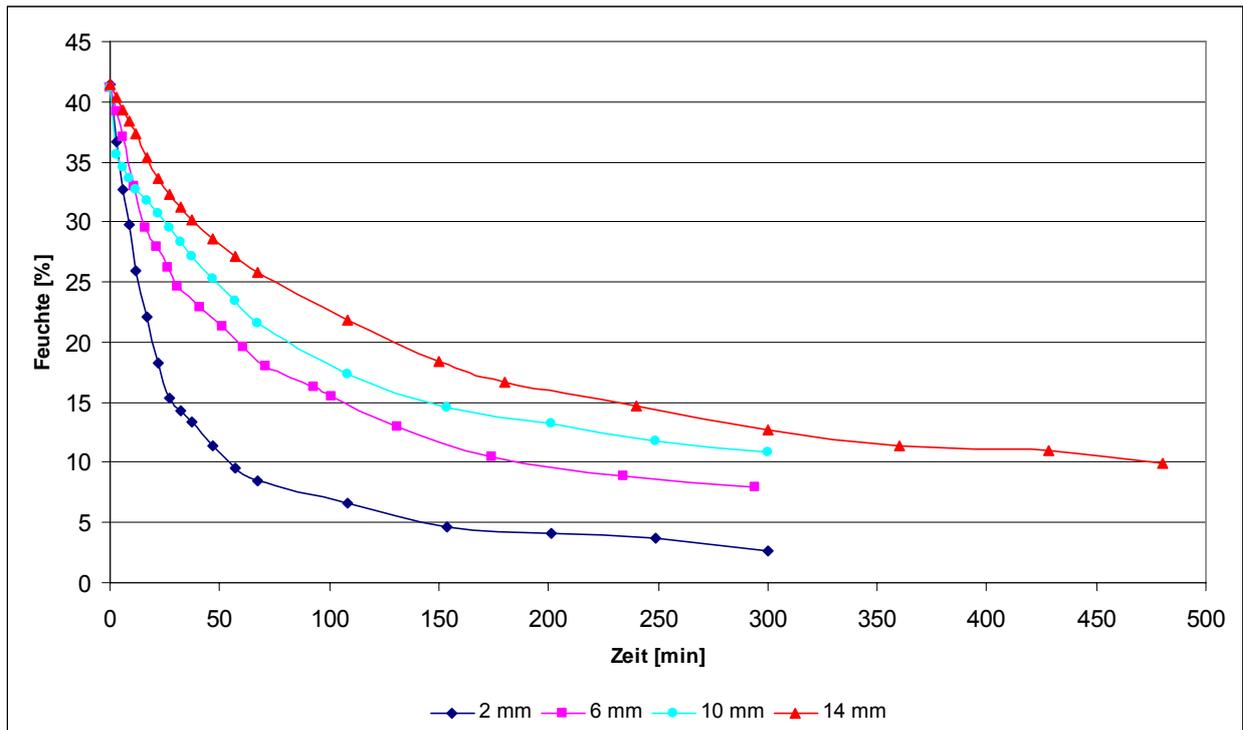


Abb. 26: Verlauf der Feuchteabnahme bei der Partikeldickenvariation (0,5 m/s, 56 °C)

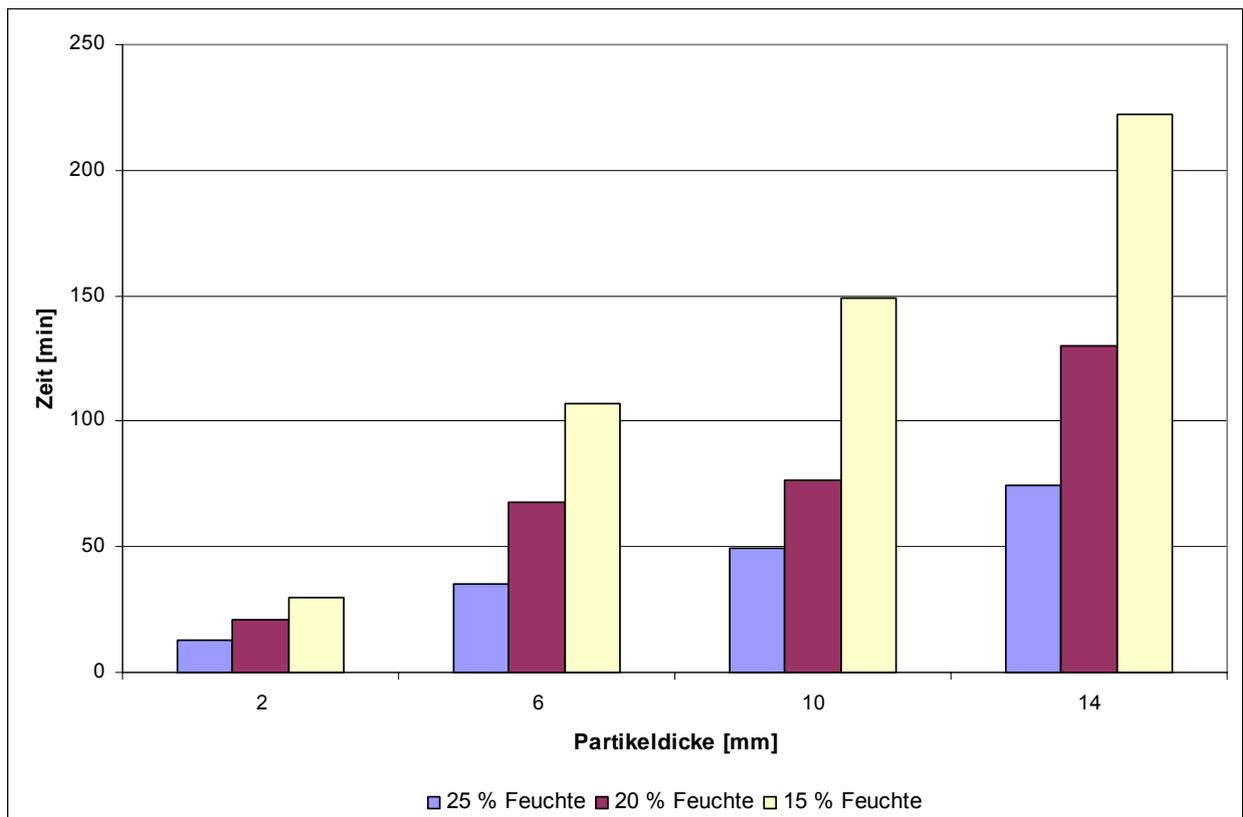


Abb. 27: Zeit bis zum Erreichen unterschiedlicher Feuchten für verschiedene Partikeldicken (0,5 m/s, 56 °C)

### 6.3.7 Variation der Faserrichtung

Um auch den Einfluss der Faserrichtung im Partikel dokumentieren zu können, werden Versuche mit Hackschnitzeln durchgeführt, bei denen die Faserrichtung einmal längs im Partikel läuft und einmal 90 Grad versetzt quer dazu. Verwendet werden dazu Eschenpartikel. Die Temperatur der Trocknungsluft beträgt in beiden Fällen 56 °C; die Leerrohrgeschwindigkeit 0,5 m/s.

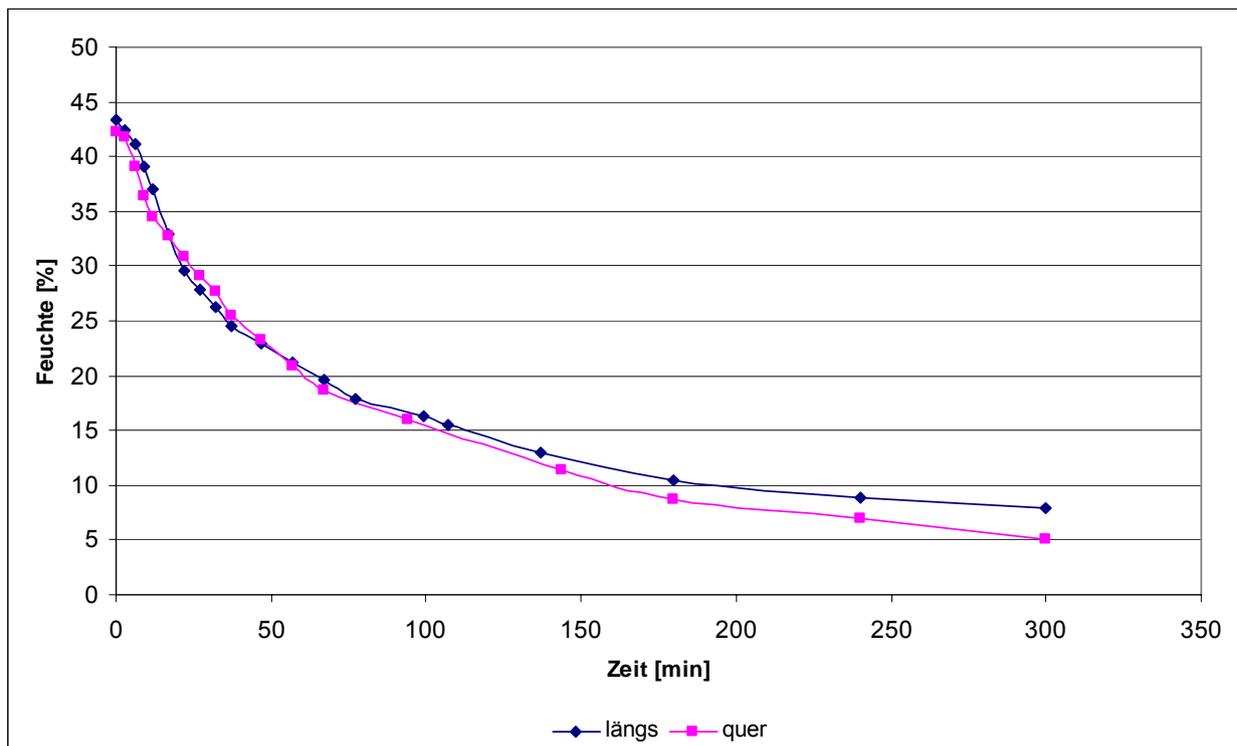


Abb. 28: Verlauf der Feuchteabnahme bei der Variation der Faserrichtung bei Eschenpartikeln  
(6 mm, 0,5 m/s, 56 °C)

Zu beobachten ist bei der Trocknung des Partikels mit den Fasern quer zur Strömungsrichtung, dass sich hier das Partikel stark verformt. Es kommt zu einem „Einrollen“ des Partikels. Der Einfluss der Faserrichtung auf das Trocknungsverhalten ist jedoch vernachlässigbar klein. Dies bestätigt auch Abb. 29.

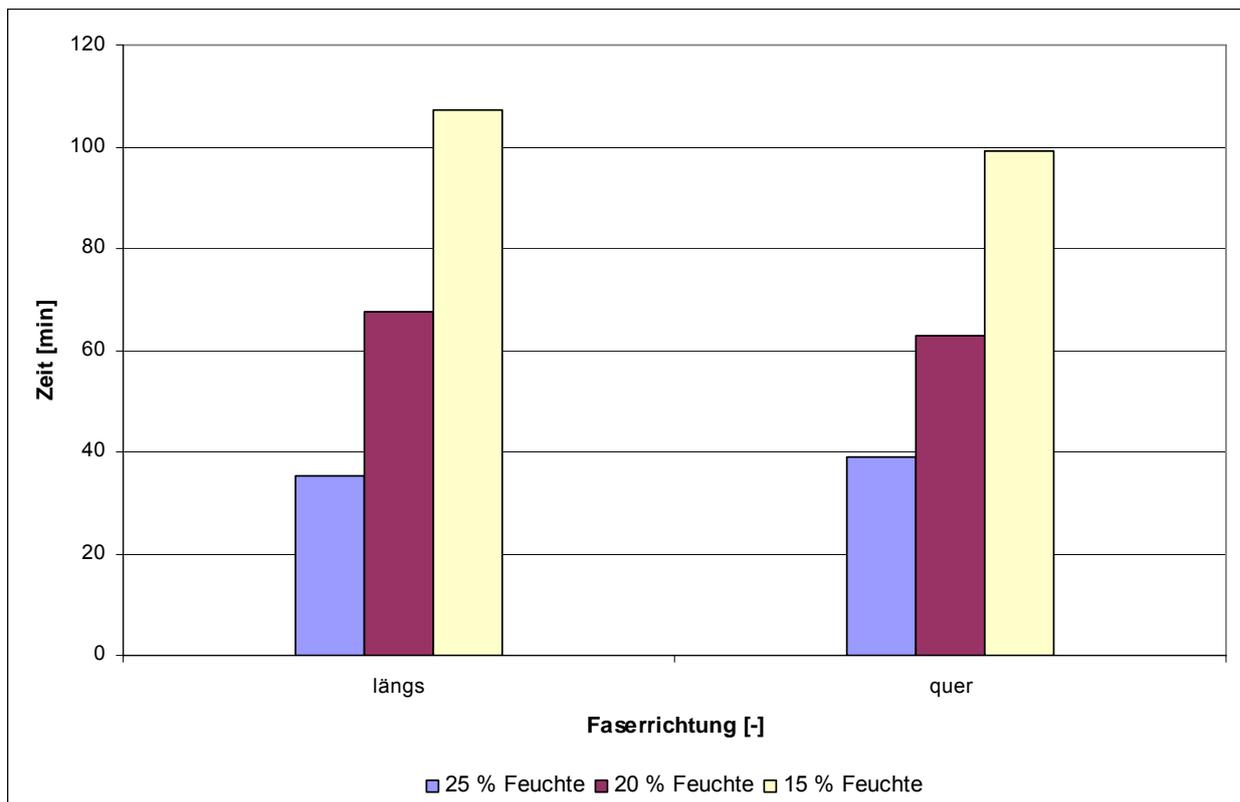


Abb. 29: Zeit bis zum Erreichen unterschiedlicher Feuchten für verschiedene Faserrichtungen bei Eschenpartikeln (6 mm, 0,5 m/s, 56 °C)

## 7 Trocknungsverhalten von Schüttungen

### 7.1 Vorbereitung der Partikel (Hackschnitzel)

#### 7.1.1 Siebung

Als Rohmaterial für die Proben dient eine Hackschnitzelmischung aus 90 % Eiche und 10 % anderen Hölzern (Esche, Fichte, Birke). Um eine Aussage über das Trocknungsverhalten der Biomasse treffen zu können, ist es notwendig, die Hackschnitzel zu klassifizieren. Dies geschieht mittels Siebung. Die Biomasse wird am betreffenden Tag frisch gehackt und danach gesiebt.

Unter Verwendung einer Siebmaschine mit Sieben der entsprechenden Maschenweiten werden die folgenden fünf Fraktionen ausgesiebt: < 3 mm, 3 - 11 mm, 11 - 16 mm und 16 - 32 mm. Die Vorgehensweise bei der Abtrennung der einzelnen Fraktionen ist wie folgt:

Es werden immer zwei Siebe gleichzeitig eingesetzt, wobei das jeweils feine in der Vorrichtung oben und das jeweils grobe Sieb unten eingesetzt wird (siehe Abb. 30).



Abb. 30: Siebmaschine

Die Schritte der Siebung sind nachfolgend beschrieben.

- 1.) Fraktion < 3 mm: Hier wird mit Maschenweiten 3 mm und 11 mm gesiebt. Diese Fraktion fällt sowohl bei Maschenweite 11 mm als auch bei Maschenweite 3 mm durch das Sieb.
- 2.) Fraktion 3 mm - 11mm: Im ersten Schritt wird mit Maschenweiten 11 mm und 16 mm gesiebt. Der Durchgang von Maschenweite 11 mm wird im zweiten Schritt wiederum mit den Maschenweiten 3 mm und 11 mm gesiebt. Diese Fraktion fällt wohl bei Maschenweite 11 mm durch, jedoch nicht bei Maschenweite 3 mm.
- 3.) Fraktion 11 mm - 16 mm: Im ersten Schritt wird mit Maschenweiten 11 mm und 16 mm gesiebt. Diese Fraktion fällt wohl bei Maschenweite 16 mm durch, jedoch nicht bei Maschenweite 11 mm. Dieser Vorgang wird wiederholt, um nochmals den Feinanteil abzutrennen.
- 4.) Fraktion 16 mm - 32 mm: Gesiebt wird der Rückstand aus der Siebung mit Maschenweite 11 mm und 16 mm, d.h. die Hackschnitzel, die auch bei Maschenweite 16 mm nicht durchgefallen sind. Diese Fraktion besteht aus den Hackschnitzeln, die wohl bei Maschenweite 32 mm durchfallen, jedoch nicht bei Maschenweite 16 mm.
- 5.) Die Fraktion mit Maschenweite > 32 mm wird nicht berücksichtigt.

Neben den bereits erwähnten Partikelfraktionen wird noch eine Mischung von Hackschnitzeln der Hackgutklasse G 50 nach ÖNORM M 7133 verwendet (siehe Tab. 5).

Größenklassen						
Hackgut- klasse	Zulässige Massenanteile				Zulässige Extremwerte	
	max. 4 %	max. 20 %	60 - 100 %	max. 20 %		
	Teilchengröße [mm]				Querschnitt [cm <sup>2</sup> ]	Länge [cm]
G 30	< 1,0	1,0 - 2,8	2,8 - 16,0	> 16,0	3,0	8,5
G 50	< 1,0	1,0 - 5,6	5,6 - 31,5	> 31,5	5,0	12,0
G 100	< 1,0	1,0 - 11,2	11,2 - 63,0	> 63,0	10,0	25,0

Tab. 5: Energiehackgut nach ÖNORM M 7133

### 7.1.2 Charakterisierung der Partikel

Die Partikelfractionen werden nach dem Sieben charakterisiert, um eine Aussage über die Partikelgrößenverteilung treffen zu können. Dazu wird aus jeder Fraktion eine Probe von 50 Stück Partikel entnommen und mittels Schiebelehre vermessen. Aus den Abmessungen werden das Volumen  $V_p$  und die Oberfläche  $O_p$  der Partikel und daraus der Durchmesser  $d_v$  bzw. die Oberfläche  $O_v$  der volumengleichen Kugel bestimmt. Ferner kann aus dem Quotient der Oberfläche des Partikels zur Oberfläche der volumengleichen Kugel die Sphärizität  $\varphi$  bestimmt werden.

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_p \cdot \pi}{4}} \quad (7.1)$$

$$O_v = d_v^2 \cdot \pi \quad (7.2)$$

$$\varphi = \frac{O_v}{O_p} \quad (7.3)$$

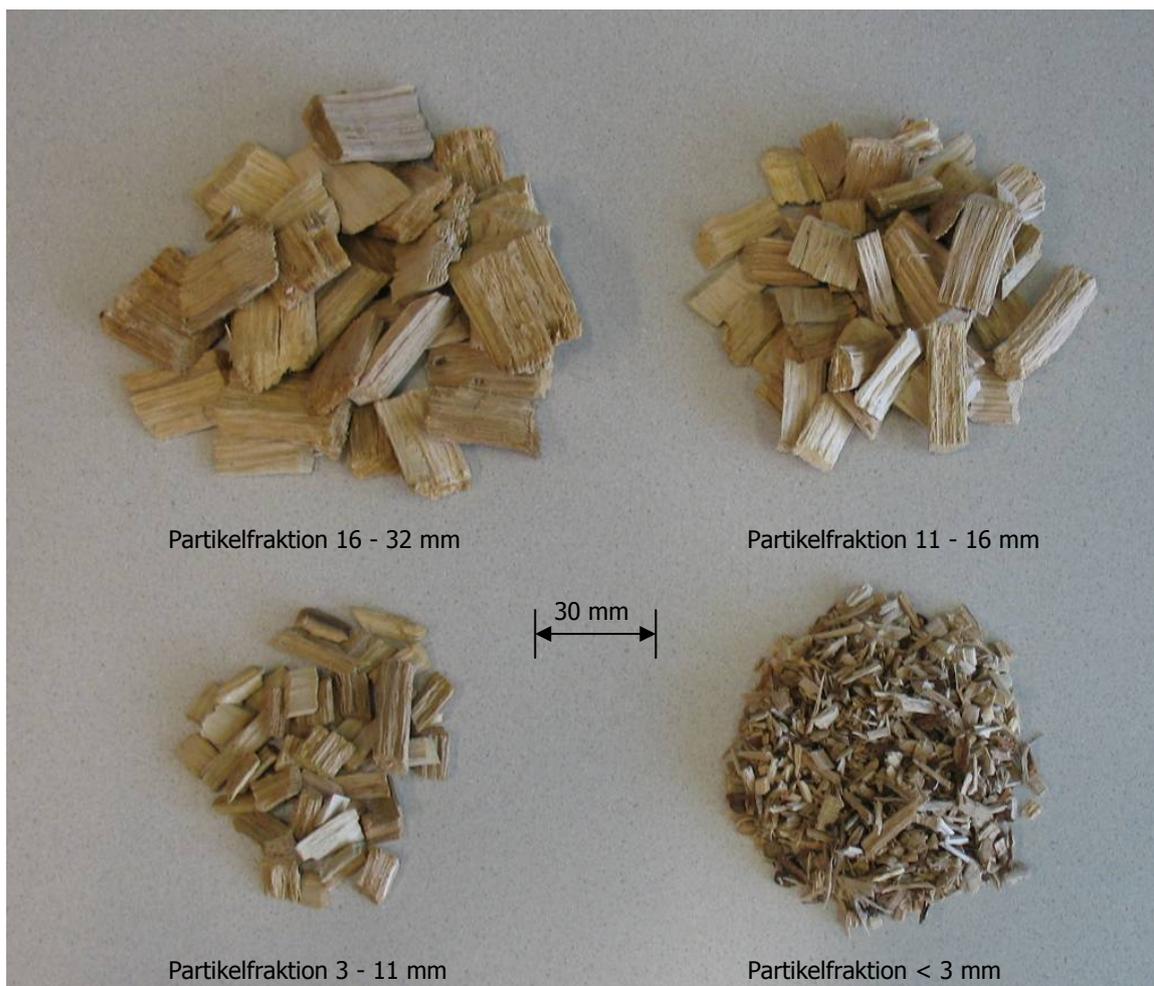


Abb. 31: Verschiedene Fraktionen gesiebter Hackschnitzel

Weiters werden die Partikelgrößenverteilungen der einzelnen Partikelfractionen ermittelt. Dies geschieht über die Formeln der RRSB-Verteilung. Als charakteristische Größe wird der Durchmesser der volumengleichen Kugel heran gezogen.

$$Q_3(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x^*}\right)^n} \quad (7.4)$$

Analog wird mit der Mischung G 50 vorgegangen. Die Partikeldickenverteilungen sind in Abb. 32 dargestellt.

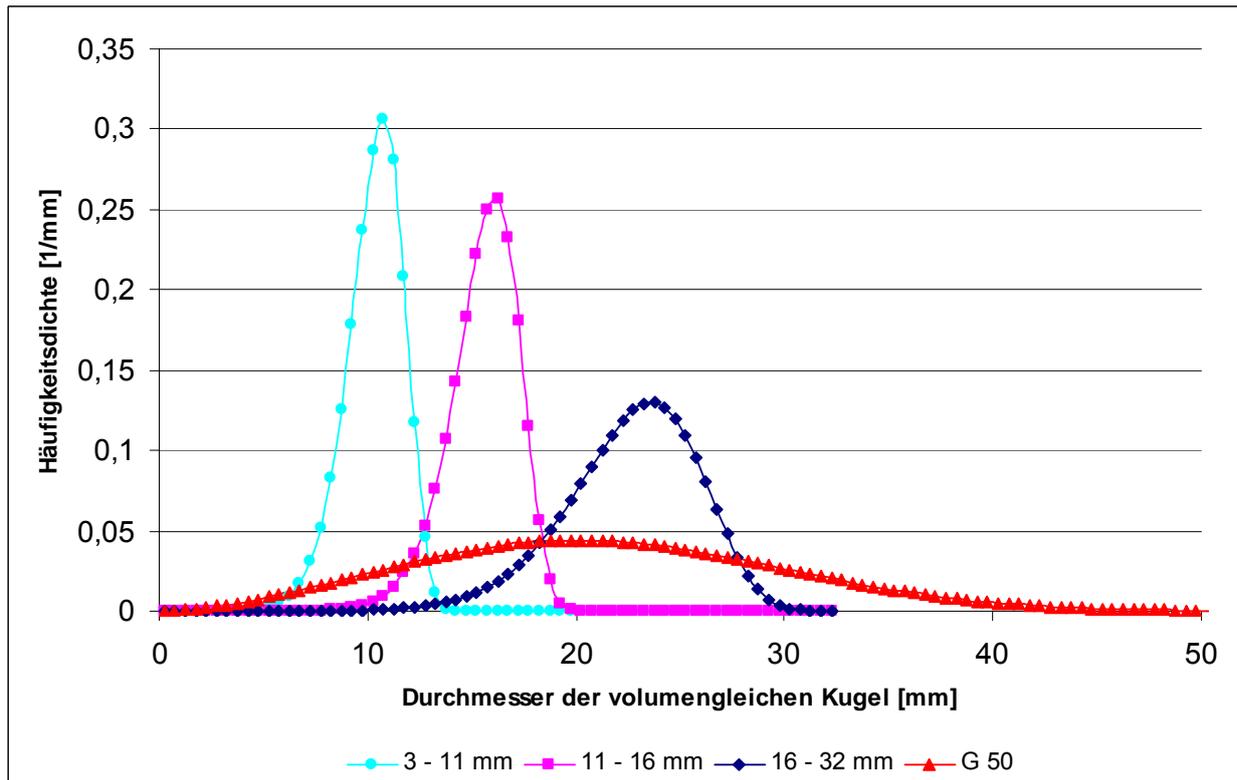


Abb. 32: Partikelgrößenverteilung

## 7.2 Porosität der Schüttung

Der Druckverlust über eine Schüttung von Hackschnitzeln hängt umgekehrt proportional mit der Porosität der Schüttung zusammen. Um die Porosität zu bestimmen, werden vorher befeuchtete Hackschnitzel einer bestimmten Fraktion in ein Gefäß mit definiertem Volumen gefüllt. Die Zwischenräume werden anschließend mit Wasser aufgefüllt, wobei die Hackschnitzel mit Hilfe einer Lochplatte am Aufschwimmen gehindert werden. Das Befeuchten der Hackschnitzel vor dem Versuch ist deswegen von Bedeutung, weil damit kein zusätzliches Wasser mehr von den Partikeln aufgenommen werden kann und somit nicht die innere Porosität der Hackschnitzel, sondern die hydrodynamisch wirksame Porosität gemessen wird. Trotz vorherigem Befeuchten muss die Befüllung mit Wasser mehrmals erfolgen, weil die Hackschnitzel weiteres Wasser aufsaugen. Erst wenn die eingefüllte Menge Wasser nahezu konstant ist, wird über Wägung das Volumen bestimmt. Die Porosität ist das Verhältnis aus dem Lückenvolumen  $V_L$  zum Gefäßvolumen  $V_G$ .

$$\varepsilon = \frac{V_L}{V_G} \cdot 100 [\%] \quad (7.5)$$

Partikelfraktion [mm]	3 - 11	11 - 16	16 - 32	G 50
Lückenvolumen [m <sup>3</sup> ]				
1. Füllung	6,38E-03	6,28E-03	6,09E-03	6,00E-03
2. Füllung	5,09E-03	5,52E-03	5,69E-03	5,82E-03
3. Füllung	5,05E-03	5,42E-03	5,64E-03	5,81E-03
Gefäßvolumen [m <sup>3</sup> ]	1,05E-02	1,05E-02	1,05E-02	1,14E-02
Porosität [%]	48,4	51,8	53,9	50,9

Tab. 6: Volumina für die Porositätsbestimmung

## 7.3 Druckverlust der trockenen Schüttung

Der Druckverlust wird bei den einzelnen trockenen Partikelfractionen bestimmt. Dazu werden die Schüttungen mit Leerrohrgeschwindigkeiten zwischen 0 und 1,2 m/s durchströmt und der Druckverlust über die Schüttung in regelmäßigen Abständen mitgeschrieben. Die Ergebnisse sind in Abb. 33 ersichtlich.

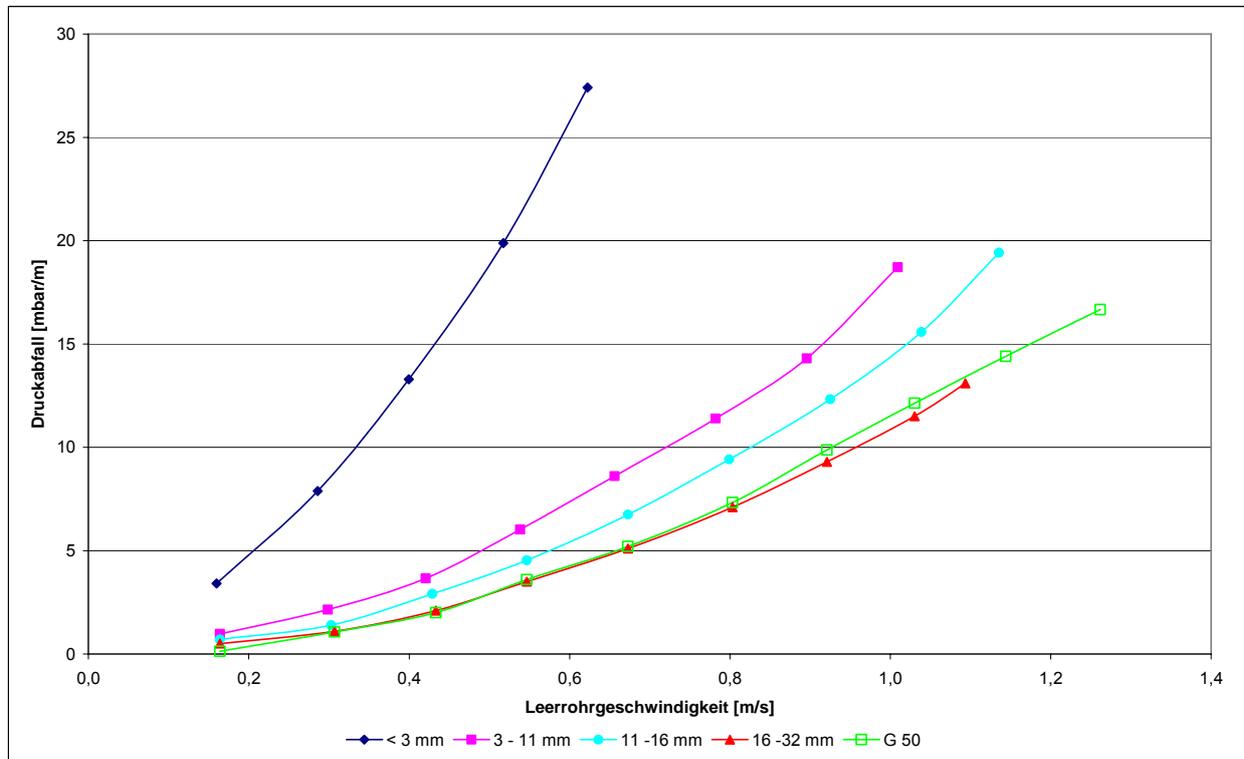


Abb. 33: Druckverlust pro Meter Schüttung für verschiedene Partikelfractionen

Der Druckverlust in Schüttungen kugelförmiger Partikel lässt sich in sehr guter Näherung mit der Formel von Ergun berechnen. [Hofbauer, 1996]

$$\frac{\Delta p}{L} = k_1 \cdot \frac{(1-\varepsilon^2)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot U}{d_{sv}^2} + k_2 \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_M \cdot U^2}{d_{sv}} \quad (7.6)$$

Für kugelförmige Partikel ergeben sich die besten Ergebnisse für  $k_1=150$  und  $k_2=1,75$ . Bei nicht kugelförmigen Partikeln wird für den Partikeldurchmesser der so genannte Sauterdurchmesser verwendet. Dieser lässt sich aus dem Durchmesser einer volumengleichen Kugel und der Sphärizität berechnen.

$$d_{sv} = \varphi \cdot d_v \quad (7.7)$$

Der Durchmesser einer volumengleichen Kugel  $d_v$  wird wie folgt bestimmt. Zunächst wird eine bekannte Anzahl an Hackschnitzeln gewogen, und daraus die durchschnittliche Masse eines Hackschnitzels berechnet. Mit Hilfe der in Punkt 7.2 bestimmten Porosität  $\varepsilon$  und der Schüttdichte kann auf die Dichte der Hackschnitzel geschlossen werden. Daraus ergibt sich

wiederum das Volumen eines durchschnittlichen Hackschnitzels. Zur Bestimmung der Sphärizität  $\phi$  werden die Hackschnitzel als flache Quader betrachtet. Eine Probe von 50 Hackschnitzeln der jeweiligen Partikelgröße wird vermessen und die Sphärizität  $\phi$  errechnet.

Partikelfraktion [mm]	3 - 11	11 - 16	16 - 32	G 50
$d_v$ [mm]	9,4	14,9	21,2	23,5
$d_{sv}$ [mm]	6,9	10,4	14,3	15,9
$\phi$ [-]	0,73	0,69	0,67	0,68

Tab. 7: Durchmesser einer volumengleichen Kugel, Sauterdurchmesser und Sphärizität für verschiedene Partikelfraktionen

Für nicht kugelförmige Partikel liefert die Formel von Ergun meist zu kleine Werte für den Druckverlust [Nemec, 2005], so auch bei Hackschnitzelschüttungen. In Abb. 34 sind der nach Ergun berechnete und der gemessene Druckverlust einander gegenübergestellt.

[Braun, 2003] versucht in seiner Arbeit durch Anpassung des Faktors  $k_2$  in der Ergungleichung eine bessere Näherung für den Druckverlust zu erhalten.  $k_1$  wird dabei konstant gehalten, da der Druckverlust in dem von ihm untersuchten Geschwindigkeitsbereich nur schwach von  $k_1$  abhängig ist. Macht man das für die verschiedenen Partikelklassen zeigt sich, dass sich für  $k_2$  jedes Mal ein anderer optimaler Wert ergibt (Tab. 8). Es ist zwar zu erkennen, dass mit steigender Partikelgröße der optimale Wert für  $k_2$  zunimmt und die Sphärizität abnimmt, es sind jedoch zu wenige Messdaten vorhanden, um hier einen mathematischen Zusammenhang ableiten zu können.

Partikelfraktion [mm]	3 - 11	11 - 16	16 - 32	G 50
$k_1$ [-]	150	150	150	150
$k_{2opt}$ [-]	2,33	3,65	4,42	3,85

Tab. 8: Optimale Werte für die Konstante  $k_2$  in der Ergungleichung für verschiedene Partikelfraktionen

In Abb. 35 ist schließlich das Ergebnis der mathematischen Optimierung zu erkennen. Messung und Versuch liegen deutlich besser beieinander als im nicht optimierten Fall.

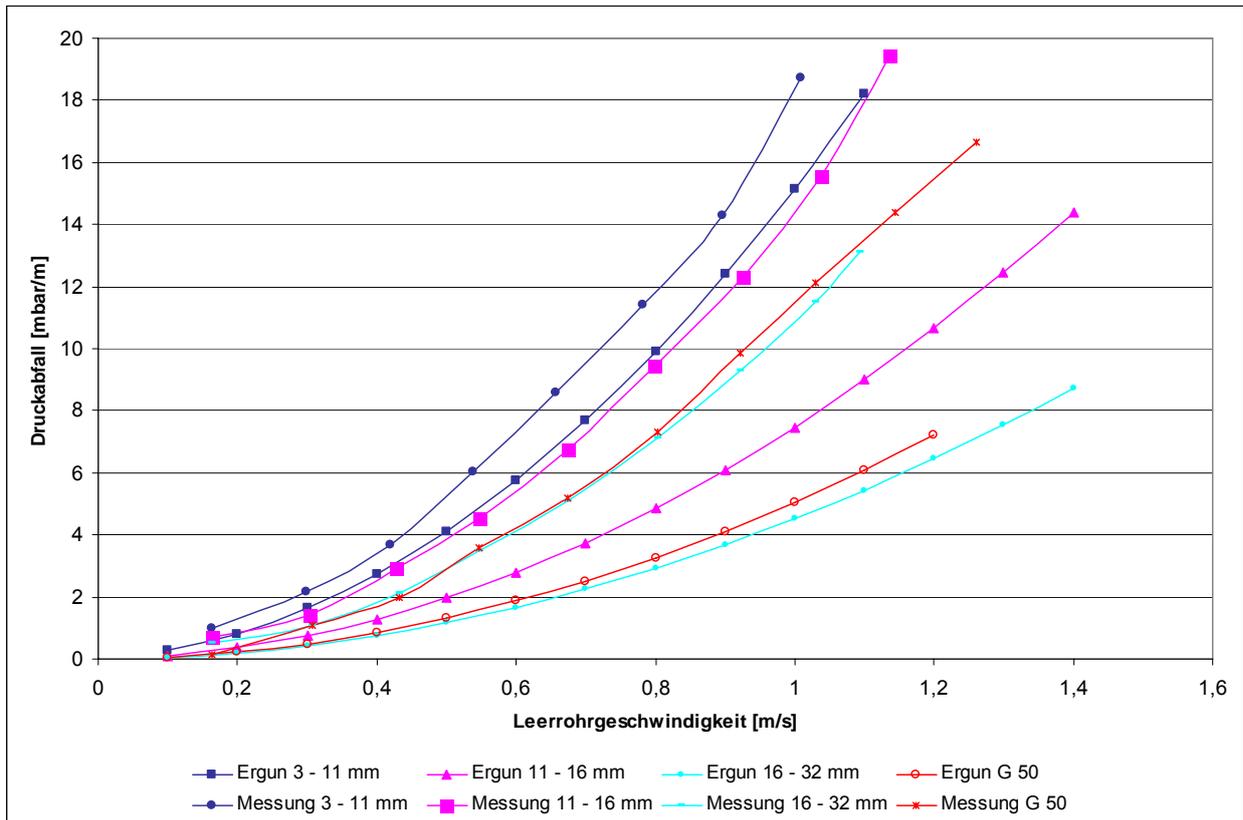


Abb. 34: Gegenüberstellung des nach Ergun berechneten und des gemessenen Druckverlustes für verschiedene Partikelfractionen

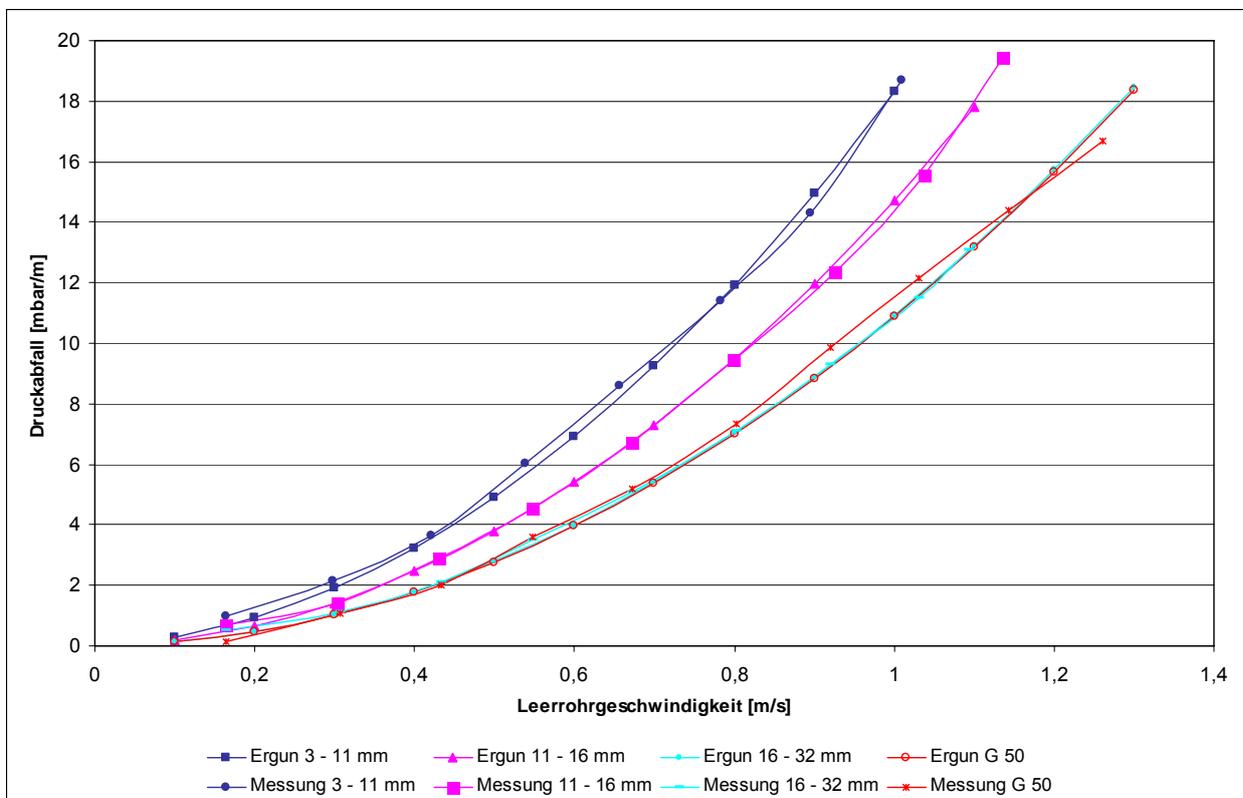


Abb. 35: Gegenüberstellung des nach Ergun mit optimiertem  $k_2$  berechneten und des gemessenen Druckverlustes für verschiedene Partikelfractionen

## 7.4 Versuchsvorbereitung – Trocknung von Schüttungen

Alle Versuche mit Schüttungen von Hackschnitzeln werden mit angefeuchteten Hackschnitzeln durchgeführt. Dazu wird die jeweilige Hackschnitzelfraktion am Vortag des Versuches in einem Behälter mit Wasser befeuchtet. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Hackschnitzel nicht aufschwimmen, was durch ein beschwertes Sieb, welches auf den Hackschnitzeln liegt, verhindert wird. Nach ca. 12 Stunden wird das Wasser abgeschüttet. Die Hackschnitzel verbleiben für mindestens zwei weitere Stunden, mit einem Plastiksack abgedeckt, im Behälter. In der sich nun ausbildenden gesättigten Atmosphäre kann sich die Feuchtigkeit gleichmäßig in den Partikeln verteilen. Die Feuchte, die sich danach in den Partikeln einstellt, beträgt rund 75 %, abhängig von der exakten Einwirkzeit des Wassers.

Eine kleine Menge von ca. 50 – 100 g Hackschnitzel wird auf der Präzisionswaage ausgewogen und dann im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, um die Anfangsfeuchte der Hackschnitzel zu bestimmen. Die restlichen Hackschnitzel werden gewogen und anschließend in den Reaktor gefüllt. Die gewünschte Temperatur der Trocknungsluft wird eingestellt. Dies geschieht, während die Luft noch durch die Anfahrleitung ins Freie strömt. Erst wenn die Versuchsparameter Leerrohrgeschwindigkeit und Temperatur der Trocknungsluft stimmen, wird der Luftstrom von der Anfahrleitung auf den Reaktor umgestellt. Während des Versuches wird in Abständen von zwei Stunden der Druckverlust über die Schüttung gemessen. Der Versuch ist beendet, wenn die gesamte Schüttung durchgetrocknet ist, d.h. wenn an allen Temperaturmessfühlern eine konstante Temperatur anliegt.

## 7.5 Gleichmäßig durchströmte Schüttungen

### 7.5.1 Allgemeines zum Verlauf der Trocknung in Schüttungen

In Abb. 36 ist der Temperaturverlauf in verschiedenen Höhen der Schüttung beispielhaft dargestellt. Beim Trocknen von Schüttungen wird als erstes ein rasches Ansteigen aller Temperaturen auf die Kühlgrenztemperatur beobachtet. Die Kühlgrenztemperatur hängt nur von den Umgebungsbedingungen ab und bleibt während der Versuche nahezu konstant. Darauf folgt ein S-förmiger Verlauf des Temperaturanstieges, der in allen betrachteten Höhen der Schüttung ähnlich und nur zeitlich versetzt statt findet. Im oberen Bereich des S-förmigen Verlaufes flacht die Kurve stark ab. Hier ist das Wasser an der Oberfläche der Partikel vollständig verdunstet und die Feuchte diffundiert aus den Poren, d.h. der innere Transport der Feuchte wird geschwindigkeitsbestimmend.

Am Anfang sind die Partikel durch die aufgenommene Flüssigkeit gequollen. Durch die Feuchteabgabe während der Trocknung schrumpfen die Partikel. Es kommt zu einer Volumenabnahme. Innere Reibungskräfte, die die Schüttung stabilisieren, verhindern ein

vollständiges Zusammensacken der Schüttung auf das Volumen  $V_{min}$ . Dieses Volumen wird nur durch Kompaktieren der vollständig getrockneten Hackschnitzel über Klopfen auf den Trockenreaktor von außen erreicht. Durch das so vergrößerte Lückenvolumen, d.h. die vergrößerte Porosität der Schüttung, nimmt auch der Druckverlust über die Schüttung ab (siehe Abb. 37). Dies ist auch in der Formel von Ergun (7.6) ersichtlich.

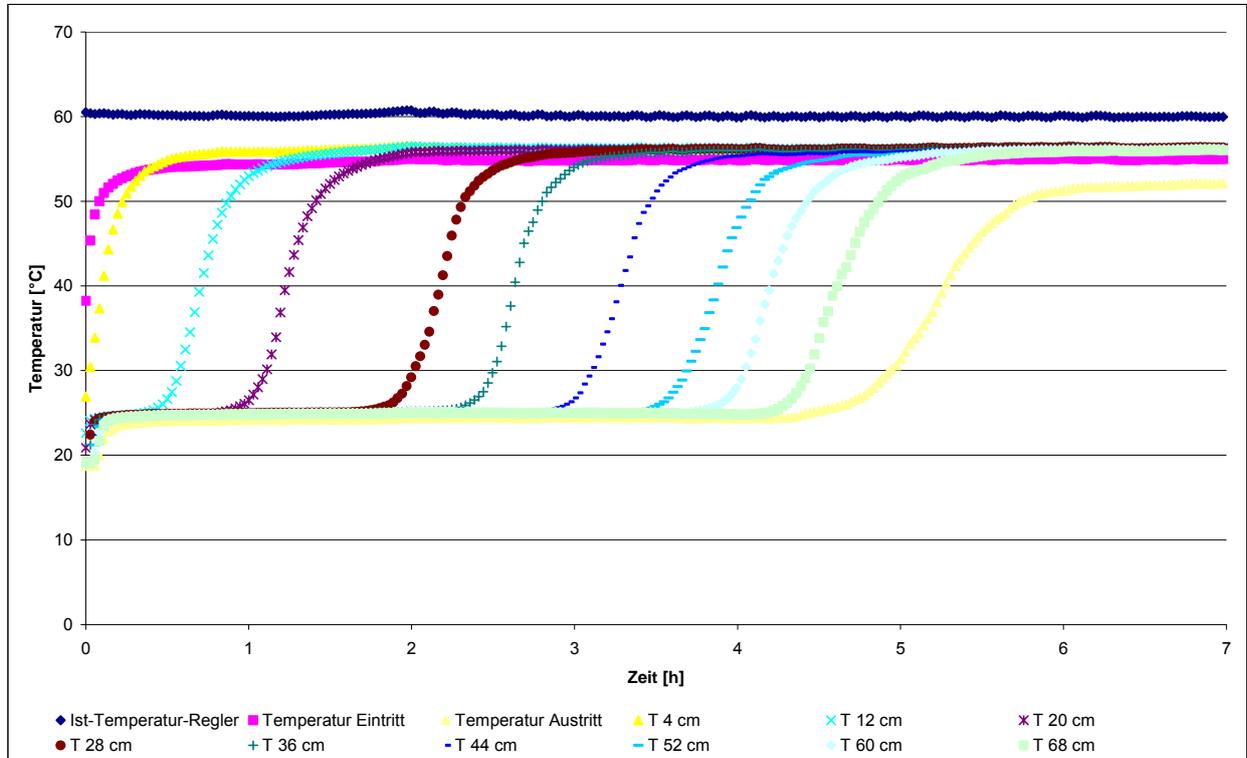


Abb. 36: Beispielhafter Temperaturverlauf in der Schüttung

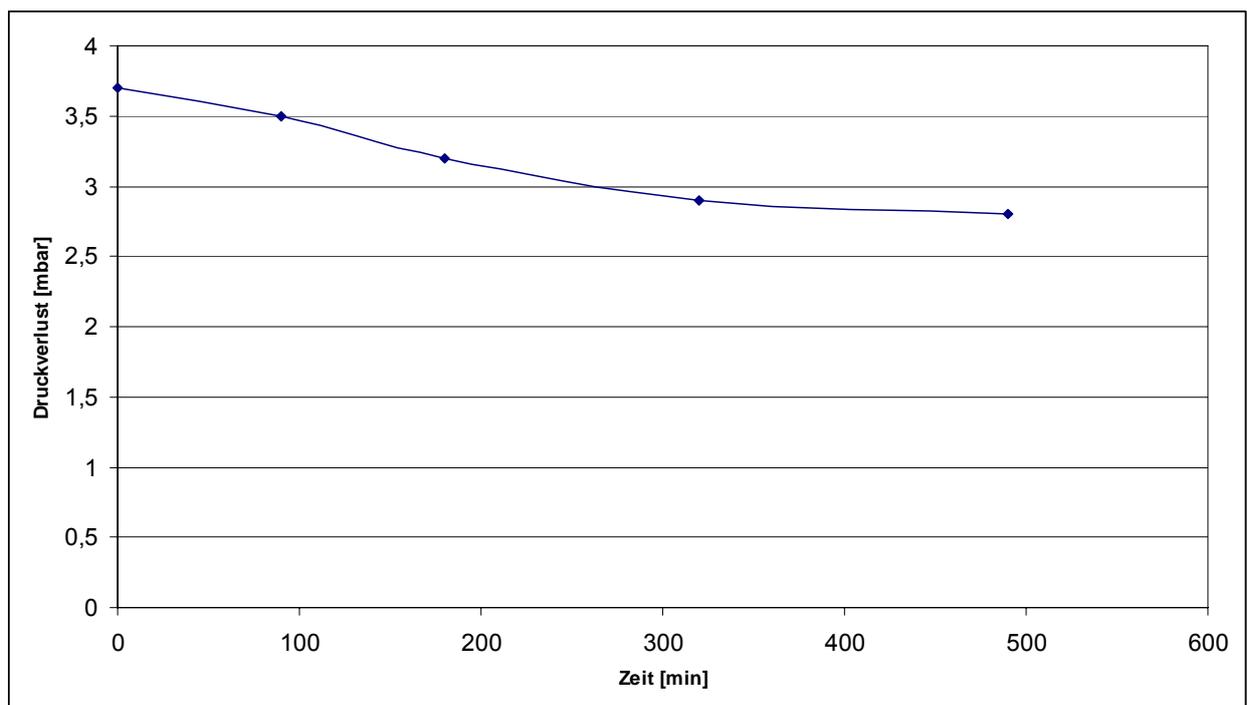


Abb. 37: Beispielhafter Druckverlust in der Schüttung

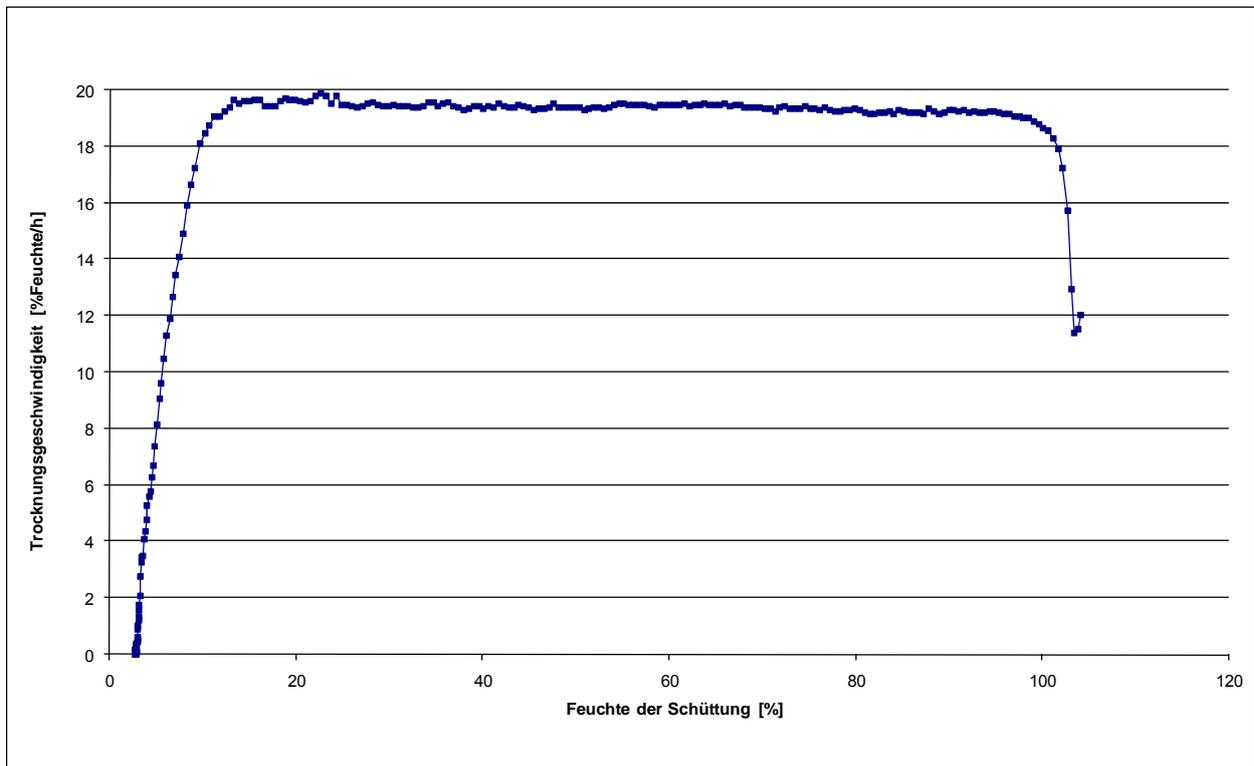


Abb. 38: Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Feuchte der Schüttung beispielhaft

Die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt während der Aufwärmphase zu, bis ein konstanter Wert erreicht wird, der solange aufrecht erhalten werden kann, bis die Trocknungsfront das obere Ende der Schüttung erreicht. Von hier aus kommt es zu einer raschen Abnahme der Trocknungsgeschwindigkeit, d.h. die eingesetzte Trocknungsluft wird nicht mehr optimal ausgenutzt. Die Trocknungsgeschwindigkeit sinkt weiter, bis sie schließlich bei Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte des Holzes Null wird (siehe auch Punkt 2.5). Beispielhaft ist diese Kurve in Abb. 38 dargestellt.

## 7.5.2 Versuchsprogramm

Die Vorgangsweise zur Vorbereitung dieser Versuche erfolgt nach den in Punkt 7.4 beschriebenen Schritten.

Ermittelt wird das Trocknungsverhalten der verschiedenen Partikelfractionen. Als Parameter werden die Partikelgröße, die Temperatur der Trocknungsluft und die Luftgeschwindigkeit variiert. Ziel dieser Versuche ist es, die Höhe der Trocknungsfront in Abhängigkeit der jeweiligen Parameter zu bestimmen.

	Versuchsnummer	Partikelfraktion [mm]	Lufttemperatur [°C]	Luftgeschwindigkeit [m/s]
Partikelgrößenvariation	23	< 3	56	0,5
	24	3 - 11	56	0,5
	25	11 - 16	56	0,5
	26	16 - 32	56	0,5
	27	G 50	56	0,5
Temperaturvariation	28	11 - 16	48	0,5
	29	11 - 16	56	0,5
	30	11 - 16	64	0,5
	31	11 - 16	72	0,5
Geschwindigkeitsvariation	32	11 - 16	56	0,2
	33	11 - 16	56	0,5
	34	11 - 16	56	0,75
	35	11 - 16	56	1

Tab. 9: Versuchsreihenfolge für das Trocknungsverhalten der Schüttung

In Abständen von 20 Sekunden werden die Temperatur bzw. relative Luftfeuchte am Eintritt in den Reaktor ( $T_{\text{Eintritt}}$ ,  $rF_{\text{Eintritt}}$ ), die Zeit  $t$ , die Temperaturen in der Schüttung in Abständen von 8 cm ( $T_4$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{28}$ ,  $T_{36}$ ,  $T_{44}$ ,  $T_{52}$ ,  $T_{60}$ ,  $T_{68}$ ) und die Temperatur bzw. relative Luftfeuchte am Austritt aus dem Reaktor ( $T_{\text{Austritt}}$ ,  $rF_{\text{Austritt}}$ ) gemessen und mit Hilfe von Labview aufgezeichnet.

## 7.5.3 Auswertung

Die Formeln (7.8) bis (7.10) gelten analog für Eintritt in bzw. Austritt aus dem Reaktor. Der Sättigungsdampfdruck  $p_{0,D}$  für Wasser kann mit der Formel von Antoine (7.8) berechnet werden. [Bridgeman / Aldrich, 1964]

$$p_{0,D \text{ Eintritt}} = 10^5 \cdot 10^{\frac{5,20389 - \frac{1733,926}{233,665 + 9_{\text{Eintritt}}}}{}} \quad [\text{Pa}] \quad (7.8)$$

$$aF_{\text{Eintritt}} = 0,622 \cdot \frac{rF_{\text{Eintritt}}}{100} \cdot \frac{p_{0,D \text{ Eintritt}}}{\left(p - \frac{rF_{\text{Eintritt}}}{100} \cdot p_{0,D \text{ Eintritt}}\right)} \quad [\text{kg/kg}] \quad (7.9)$$

Die Trocknungsgeschwindigkeit errechnet sich aus

$$\frac{dX}{dt} \cdot 100 = \frac{1}{m_{H,tr}} \cdot (n_L \cdot aF_{\text{Eintritt}} - n_L \cdot aF_{\text{Austritt}}) \quad [\% \text{ Feuchte/h}]. \quad (7.10)$$

Weiters wird die mittlere Steigung der aufgezeichneten Temperaturkurven in einer bestimmten Betthöhe im Bereich der Trocknungsfront (siehe Abb. 39) ermittelt. Dazu wird aus dem Diagramm die Trocken- bzw. Kühlgrenztemperatur abgelesen und vom entstandenen Intervall 20 % und 80 % genommen (Abb. 39, Punkt ① und ②).

Daraus wird über die Formel

$$k = \frac{\Delta\vartheta}{\Delta t} \quad [^{\circ}\text{C/h}] \quad (7.11)$$

mit

$$\vartheta_{20\%} = \vartheta_{\text{kühlgrenz}} + 0,2 \cdot (\vartheta_{\text{trocken}} - \vartheta_{\text{kühlgrenz}}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (7.12)$$

$$\vartheta_{80\%} = \vartheta_{\text{kühlgrenz}} + 0,8 \cdot (\vartheta_{\text{trocken}} - \vartheta_{\text{kühlgrenz}}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (7.13)$$

$$\Delta\vartheta = \vartheta_{80\%} - \vartheta_{20\%} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (7.14)$$

$$\Delta t = t_{80\%} - t_{20\%} \quad [\text{h}] \quad (7.15)$$

die Steigung der Temperaturkurve im Bereich der Trocknungsfront in einer bestimmten Betthöhe errechnet. Aus der Mittelung der Steigungen in verschiedenen Betthöhen ergibt sich der Wert  $k_{\text{mittel}}$  – der Temperaturanstieg in der Trocknungsfront in verschiedenen Betthöhen.

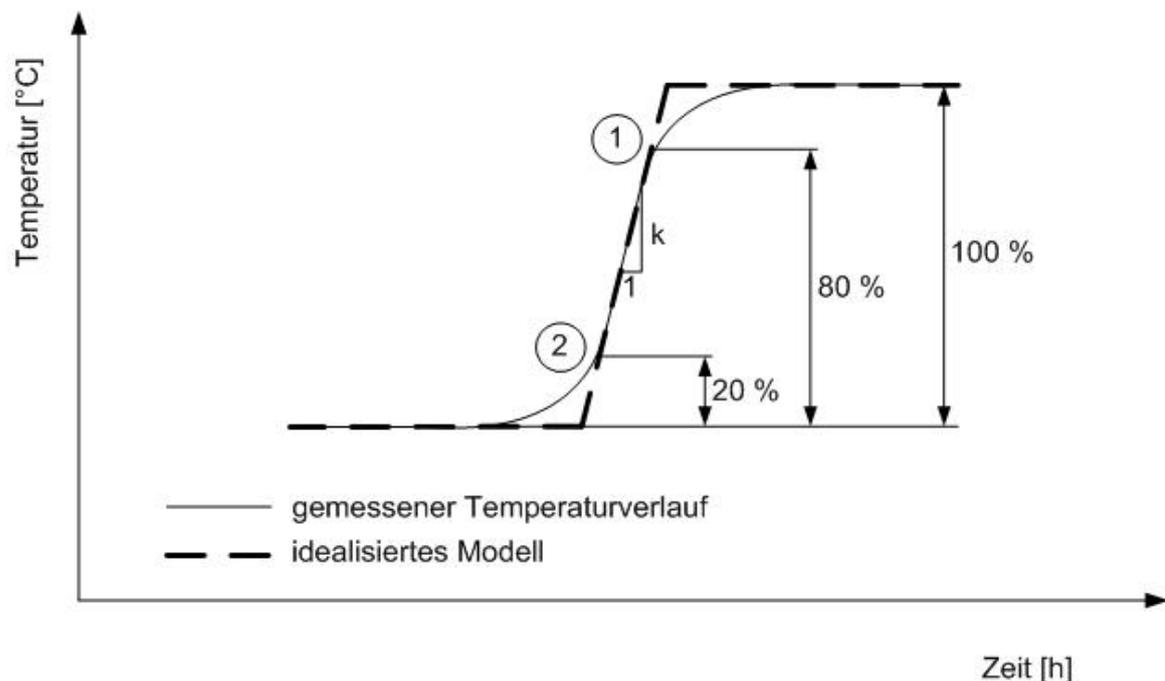


Abb. 39: Idealisiertes Modell

Aus Trocken- und Kühlgrenztemperatur wird eine Mitteltemperatur  $\vartheta_{\text{mittel}}$  errechnet. Diese dient zur Bestimmung des Zeitintervalls  $\Delta t_{\text{mittel}}$ , welches zwischen dem Zeitpunkt, an dem die Temperaturkurve des 28 cm – Messfühlers die Mitteltemperatur erreicht und dem Zeitpunkt, an dem die Temperaturkurve des 68 cm – Messfühlers die Mitteltemperatur erreicht, liegt (siehe Abb. 40).

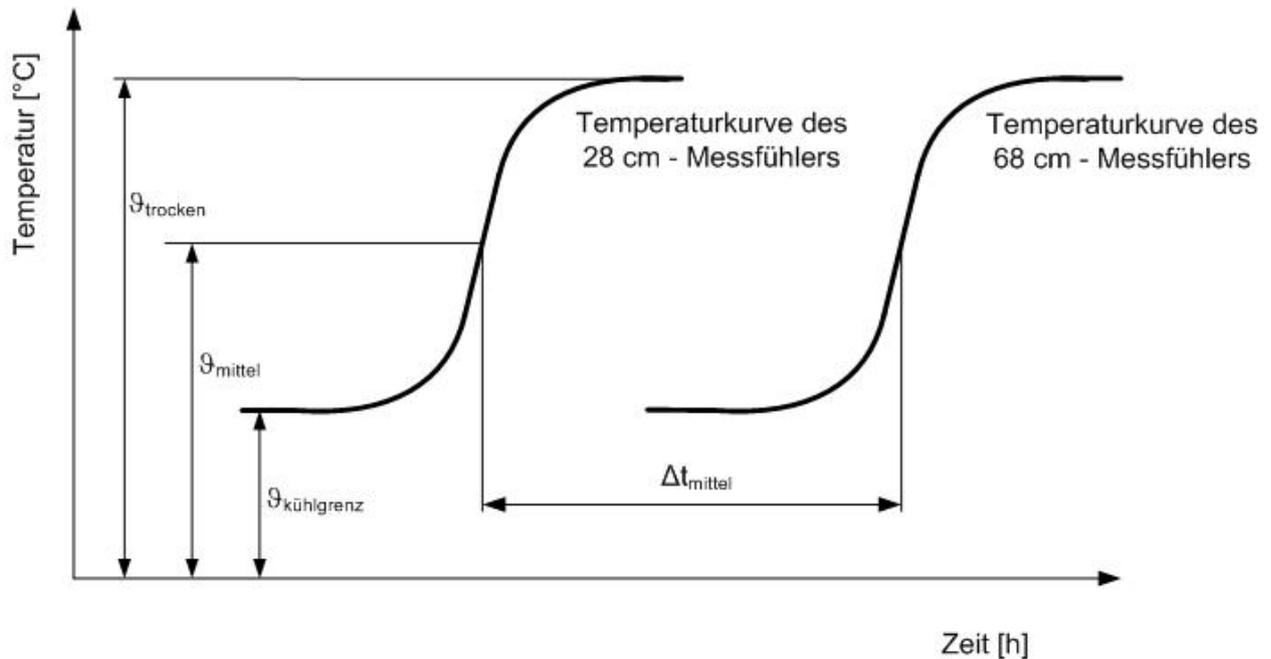


Abb. 40: Ermittlung des Zeitintervalls  $\Delta t_{\text{mittel}}$

Daraus kann über

$$u = \frac{0,68 - 0,28}{\Delta t_{\text{mittel}}} \quad [\text{m/h}] \quad (7.16)$$

die Geschwindigkeit  $u$  der Trocknungsfront beschrieben werden.

Mit

$$h = u \cdot \frac{\vartheta_{\text{trocken}} - \vartheta_{\text{kühlgrenz}}}{k_{\text{mittel}}} \quad [\text{m}] \quad (7.17)$$

ergibt sich schließlich die gesuchte Höhe der Trocknungsfront  $h$  in der Schüttung (siehe Abb. 41).

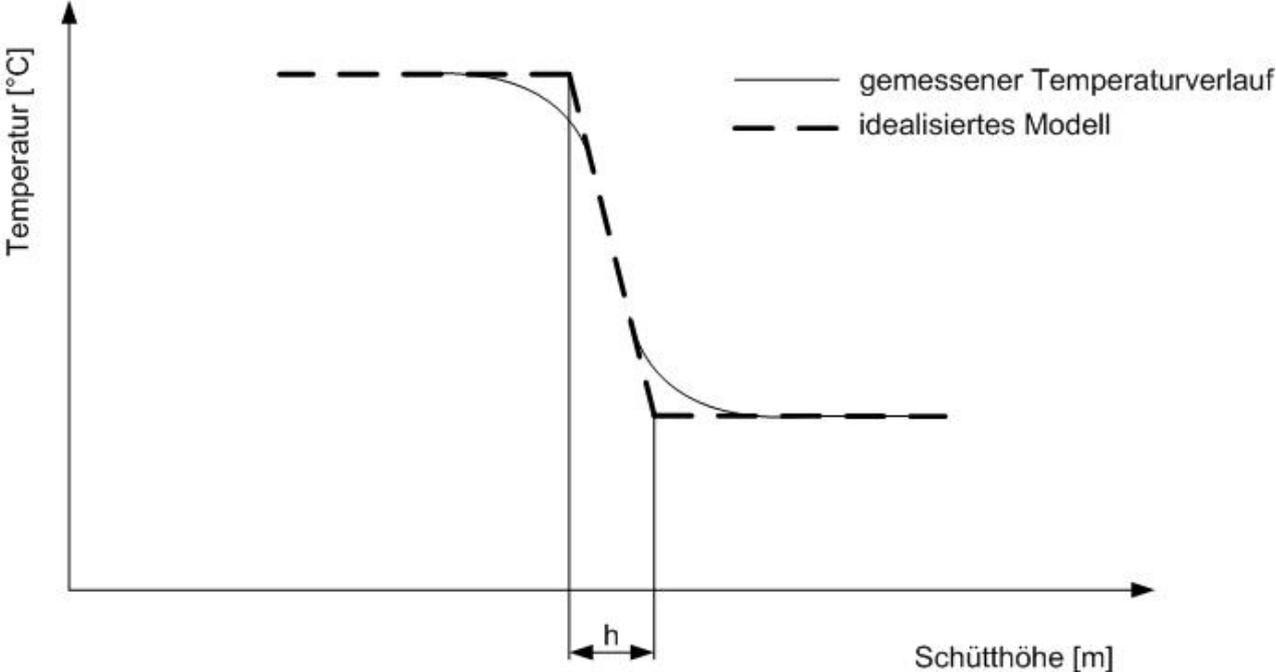


Abb. 41: Bestimmung der Höhe der Trocknungsfront

### 7.5.4 Partikelgrößenvariation

Die Partikelgröße wird variiert, während die Parameter Leerrohrgeschwindigkeit und Temperatur der Trocknungsluft konstant auf 0,5 m/s und 56 °C gehalten werden. So kann der Einfluss verschiedener Partikelgrößen auf den Trocknungsverlauf bestimmt werden.

In Tab. 10 sind die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zusammengefasst.

Versuch Nr.	23	24	25	26	27
Partikelgröße [mm]	< 3	3 - 11	11 - 16	16 - 32	G 50
Durchmesser der volumengleichen Kugel [mm]	0,5	9,5	14,9	21,2	23,5
Eintrittstemperatur [°C]	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0
Volumenstrom [Nm <sup>3</sup> /h]	118,0	118,0	118,0	118,0	118,0
Leerrohrgeschwindigkeit [m/s]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Anfangsfeuchte [%]	112	93	74	65	55
Kühlgrenztemperatur [°C]	24,5	24,7	24,2	23,7	22,9
Mittlere Steigung [°C/h]	148,1	56,9	30,7	17,4	24,0
Geschwindigkeit der Front [m/h]	0,134	0,163	0,158	0,198	0,327
Höhe der Trocknungsfront [m]	0,028	0,090	0,161	0,356	0,462

Tab. 10: Ergebnisse der Partikelgrößenvariation

Die Höhe der Trocknungsfront steigt mit steigender Größe der Partikelfraktion. (Abb. 42, Abb. 44) Umgekehrt dazu fällt die mittlere Steigung  $k_{\text{mittel}}$ . (Abb. 43)

Es ist ein Abfallen der Füllhöhe im Trockenreaktor mit zunehmender Zeit erkennbar. Dies lässt sich – wie bereits oben beschrieben – durch einen Volumenschwund der trockenen Partikel erklären.

Der Einfluss der inneren Transportwiderstände nimmt mit steigender Partikelgröße zu, was in einem kürzeren linearen Bereich der Temperaturkurven ersichtlich ist.

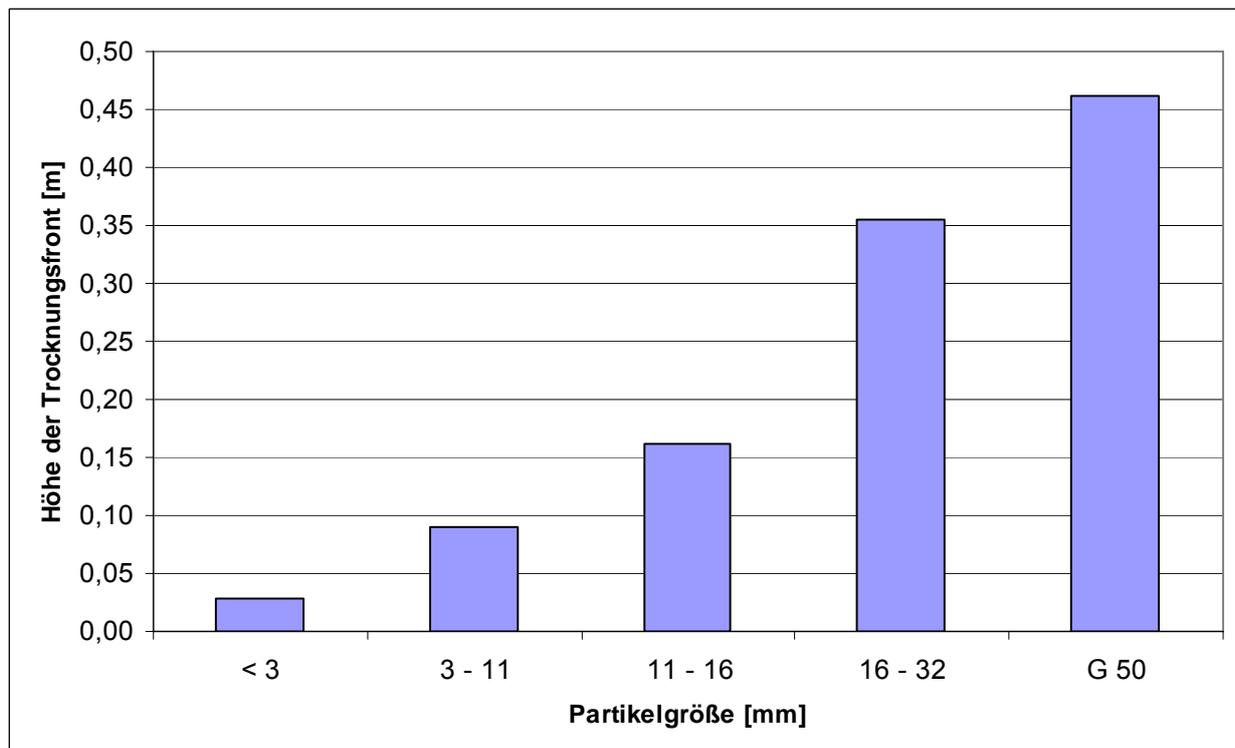


Abb. 42: Höhe der Trocknungsfront bei der Partikelgrößenvariation (0,5 m/s, 56 °C)

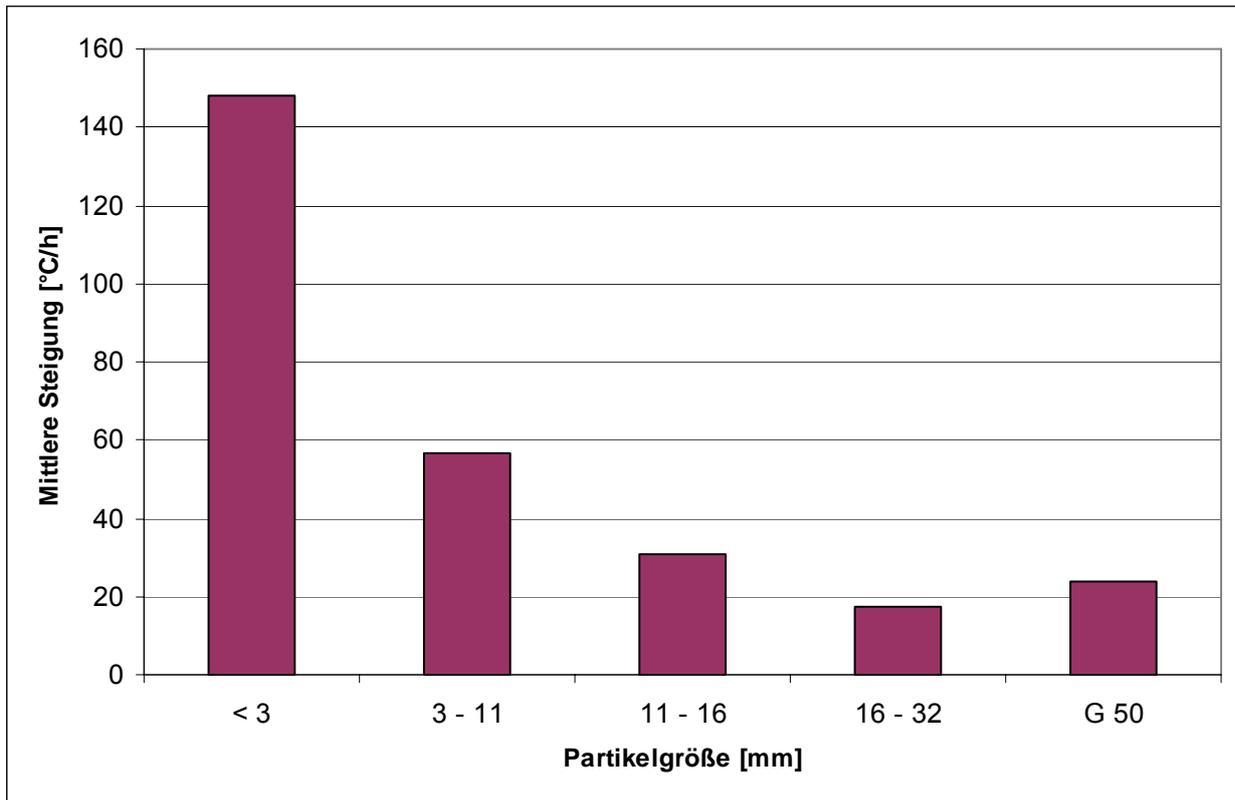


Abb. 43: Mittlere Steigung der Temperaturkurven bei der Partikelgrößenvariation (0,5 m/s, 56 °C)

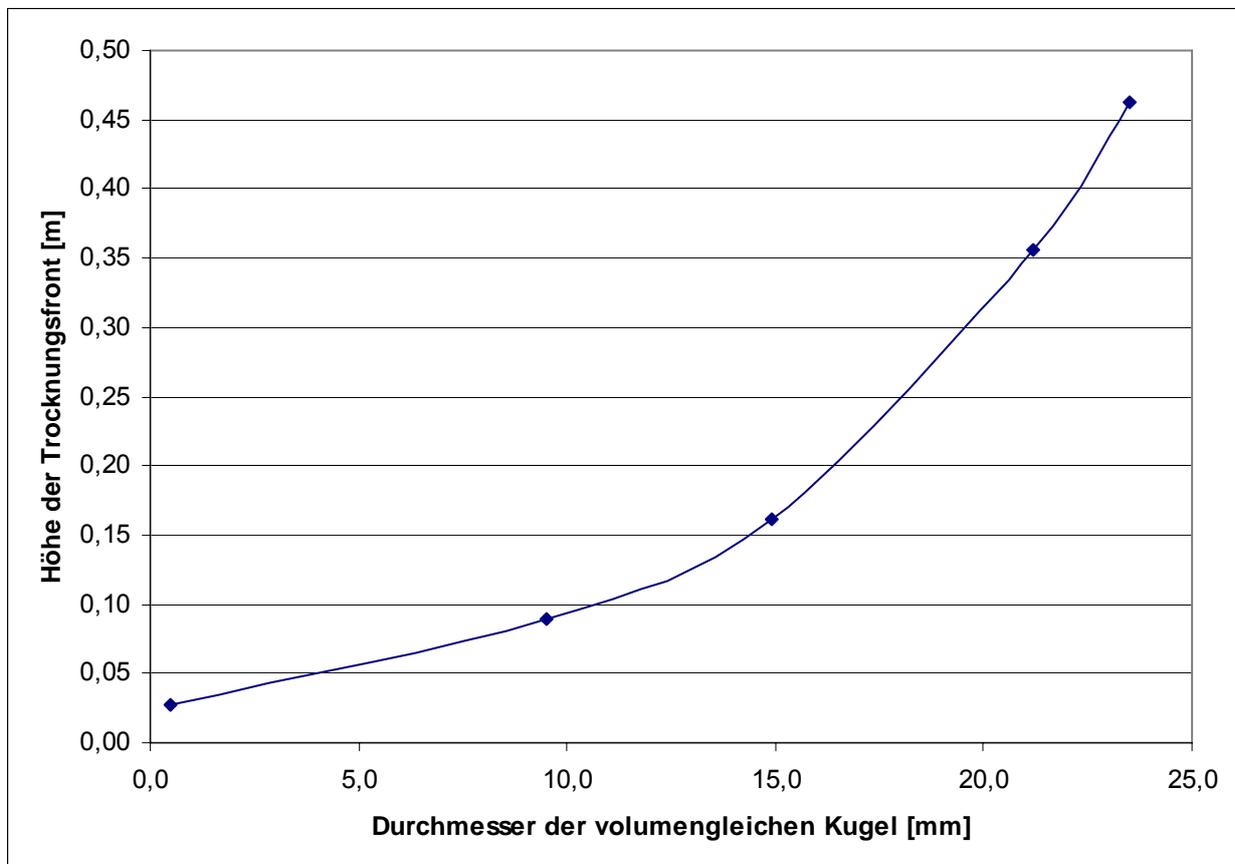


Abb. 44: Höhe der Trocknungsfront in Abhängigkeit vom Durchmesser der volumengleichen Kugel bei der Partikelgrößenvariation (0,5 m/s, 56 °C)

Die Temperaturverläufe in der Schüttung in 36 cm Höhe veranschaulicht Abb. 45. Auch hier ist deutlich die mit steigender Partikelgröße kleiner werdende mittlere Steigung  $k_{\text{mittel}}$  erkennbar.

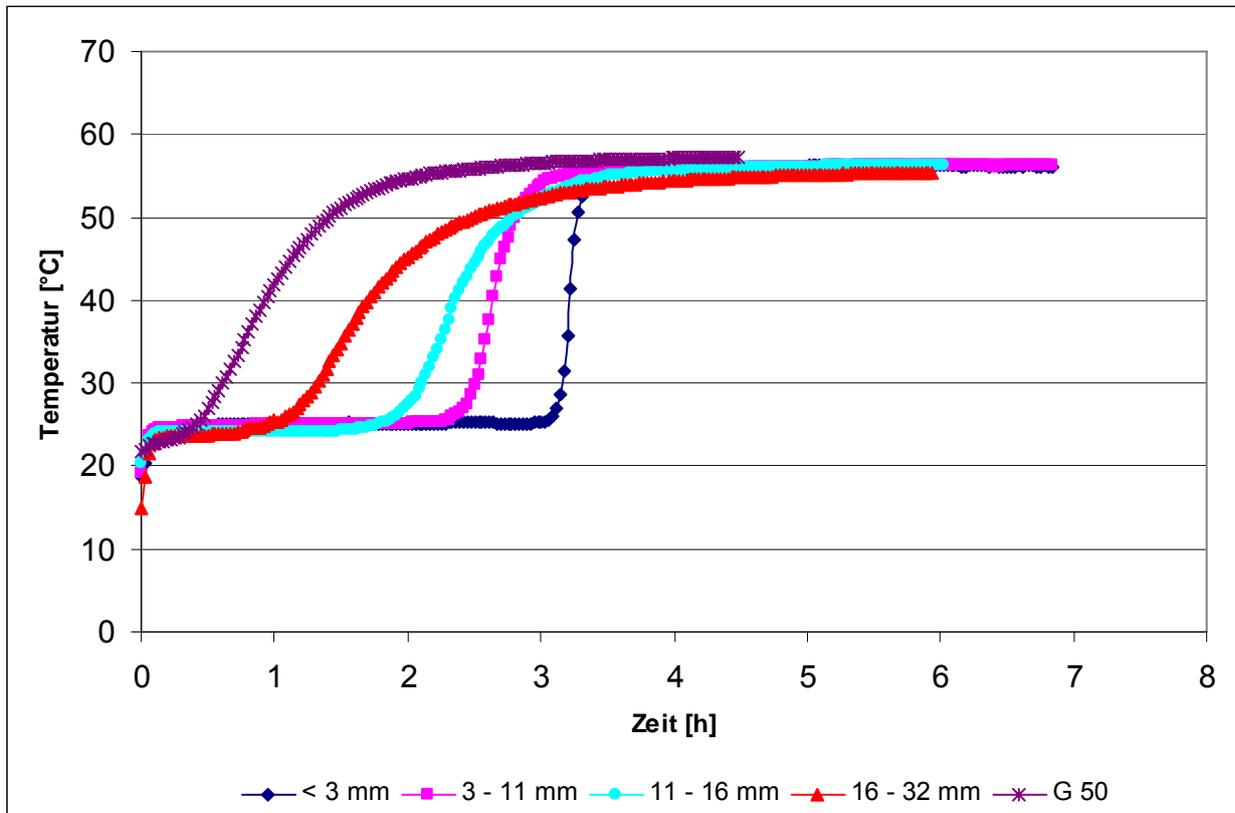


Abb. 45: Vergleich der Temperaturkurven des 36 cm – Messfühlers bei der Partikelgrößenvariation (0,5 m/s, 56 °C)

## 7.5.5 Temperaturvariation

Hier wird die Temperatur zwischen 48 °C und 72 °C variiert, während die Parameter Partikelgröße und Leerrohrgeschwindigkeit unverändert bleiben.

Tab. 11 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Temperaturvariation.

Versuch Nr.	28	29	30	31
Eintrittstemperatur [°C]	48	56	64	72
Partikelgröße [mm]	11 - 16	11 - 16	11 - 16	11 - 16
Volumenstrom [Nm <sup>3</sup> /h]	118,0	118,0	118,0	118,0
Leerrohrgeschwindigkeit [m/s]	0,5	0,5	0,5	0,5
Anfangsfeuchte [%]	77	74	80	77
Kühlgrenztemperatur [°C]	25,5	25,3	27,3	29,3
Geschwindigkeit der Front [m/h]	0,097	0,156	0,191	0,192
Mittlere Steigung [°C/h]	12,7	29,2	42,5	51,1
Höhe der Trocknungsfrost [m]	0,165	0,162	0,166	0,164

Tab. 11: Ergebnisse der Temperaturvariation

Die Höhe der Trocknungsfrost streut bei der Temperaturvariation nur sehr wenig (Abb. 46), während die mittlere Steigung mit höherer Temperatur zunimmt. (Abb. 47)

In Abb. 48 sind die unterschiedlichen Kühlgrenztemperaturen erkennbar, die sich durch die verschiedenen Eintrittstemperaturen ergeben.

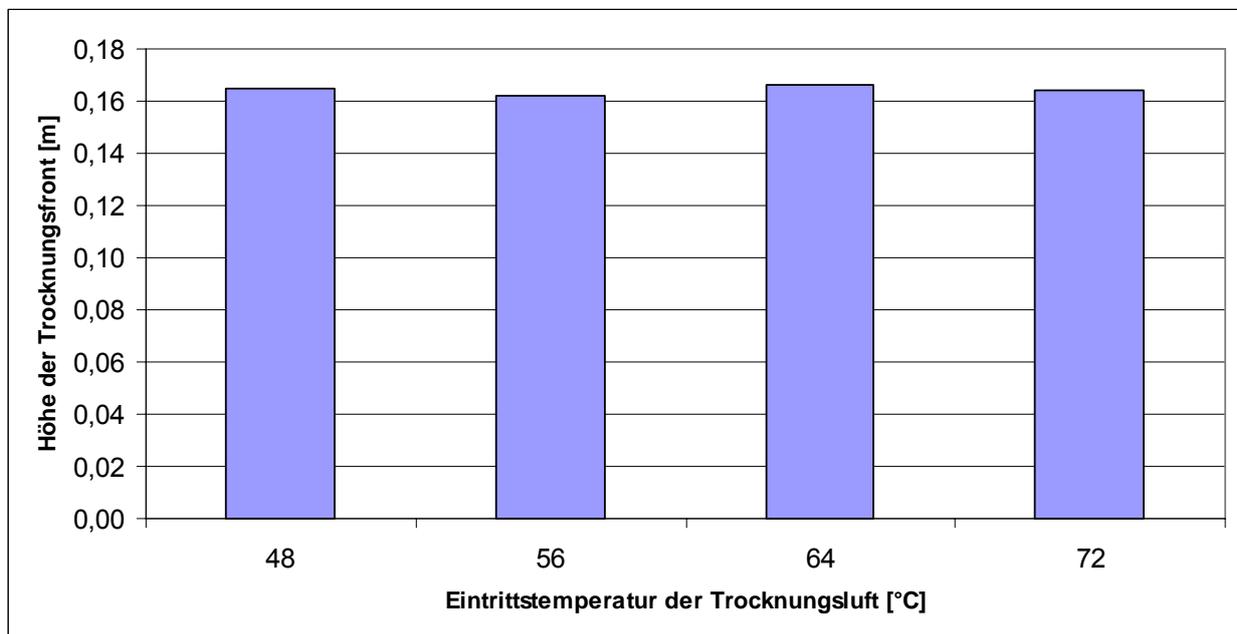


Abb. 46: Höhe der Trocknungsfrost bei der Temperaturvariation (0,5 m/s, 11-16 mm)

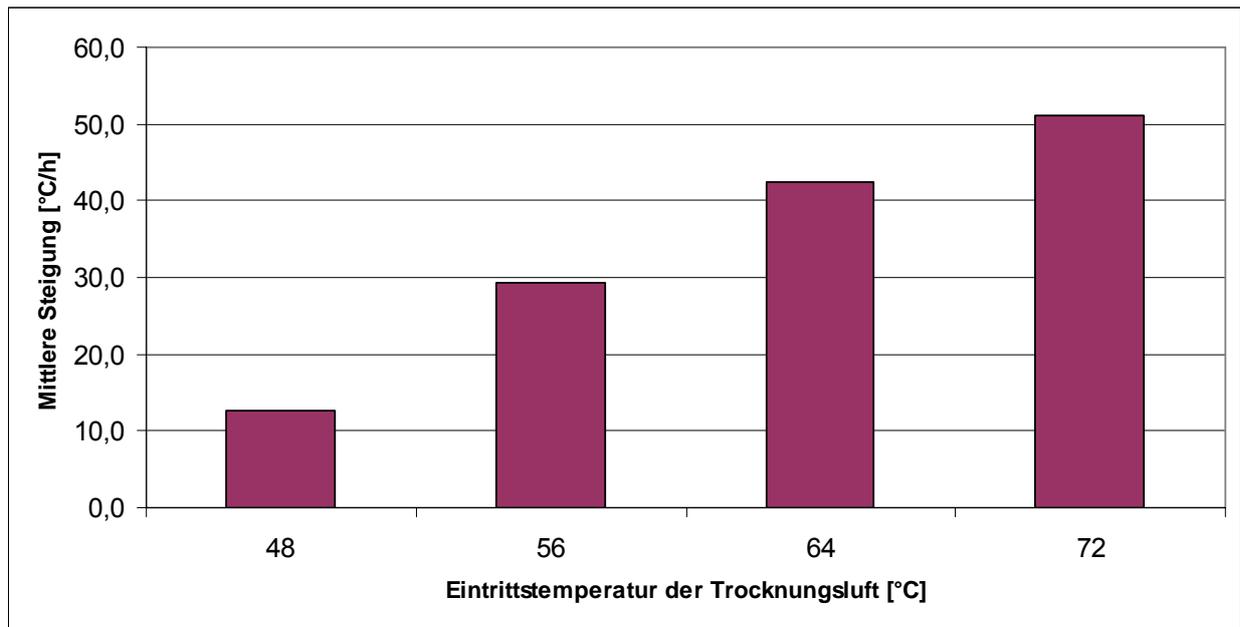


Abb. 47: Mittlere Steigung der Temperaturkurven bei der Temperaturvariation (0,5 m/s, 11-16 mm)

In Abb. 48 wird die Zunahme der mittleren Steigung  $k_{\text{mittel}}$  bei zunehmender Temperatur der Trocknungsluft – am Beispiel des in 36 cm Betthöhe angebrachten Temperaturmessfühlers – dargestellt. Weiters zeigt Abb. 49 die Zunahme der Geschwindigkeit der Trocknungsfront mit steigender Temperatur der Trocknungsluft.

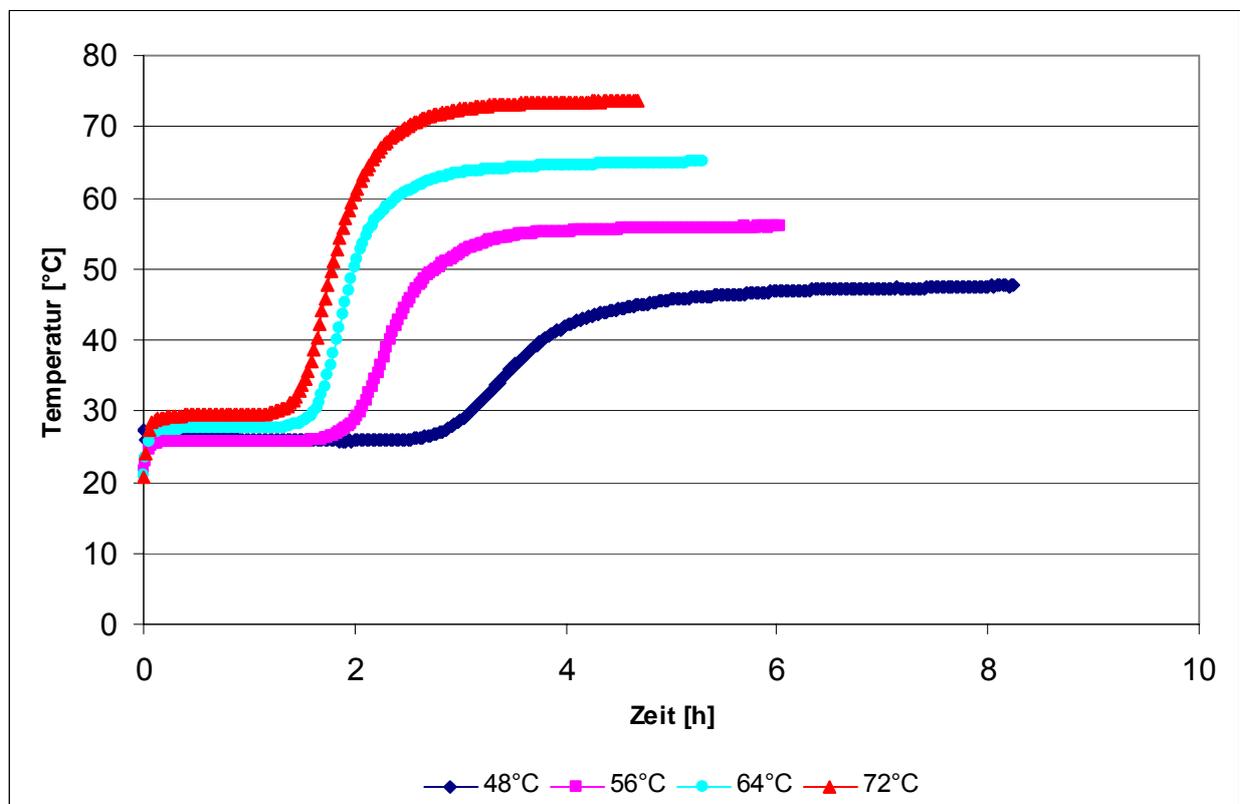


Abb. 48: Vergleich der Temperaturkurven des 36 cm – Messfühlers bei der Temperaturvariation (0,5 m/s, 11-16 mm)

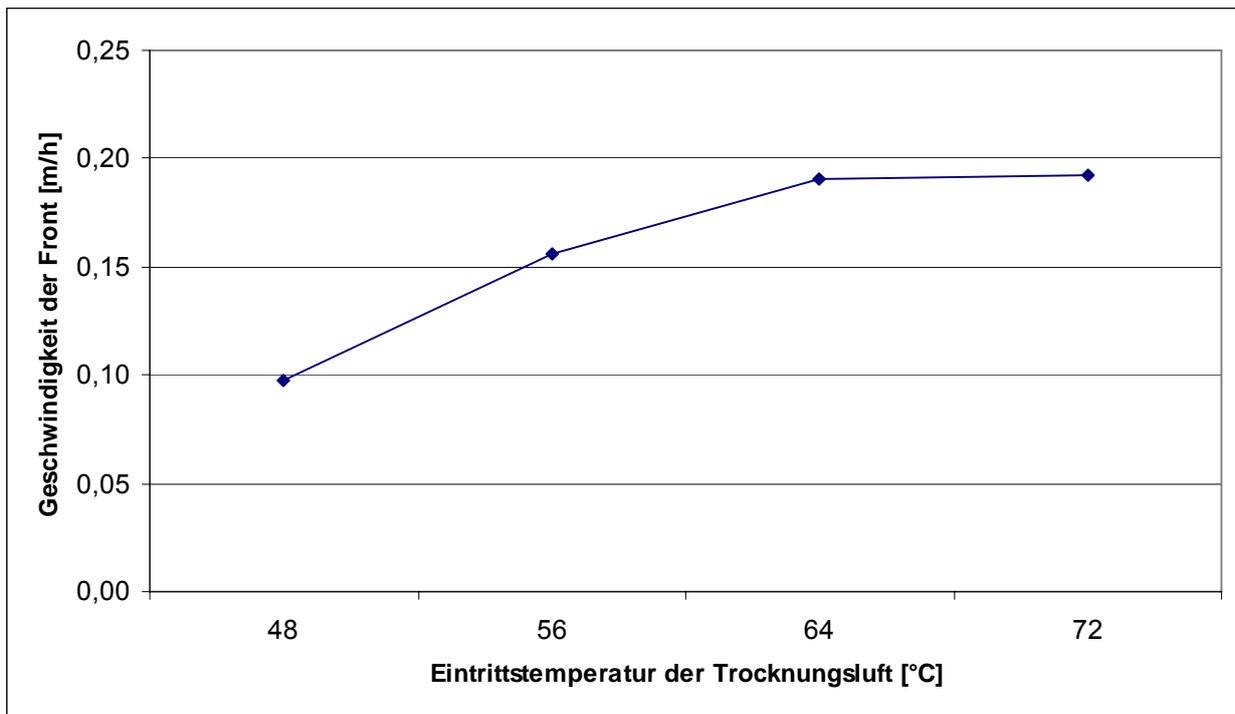


Abb. 49: Geschwindigkeit der Trocknungsfront in Abhängigkeit der Eintrittstemperatur bei der Temperaturvariation (0,5 m/s, 11-16 mm)

### 7.5.6 Geschwindigkeitsvariation

In den Versuchen Nr. 32 bis 35 werden die Partikelgröße und die Temperatur der Trocknungsluft konstant gehalten und die Leerrohrgeschwindigkeit variiert.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe zur Geschwindigkeitsvariation sind in Tab. 12 zusammengefasst.

Versuch Nr.	32	33	34	35
Leerrohrgeschwindigkeit [m/s]	0,2	0,5	0,75	1,0
Partikelgröße [mm]	11 - 16	11 - 16	11 - 16	11 - 16
Volumenstrom [Nm <sup>3</sup> /h]	48,0	118,0	178,0	238,0
Anfangsfeuchte [%]	72	74	79	74
Eintrittstemperatur [°C]	56,0	56,0	56,0	56,0
Kühlgrenztemperatur [°C]	23,9	23,9	24,0	24,2
Mittlere Steigung [°C/h]	21,2	30,9	42,9	45,9
Geschwindigkeit der Front [m/h]	0,075	0,158	0,249	0,329
Höhe der Trocknungsfront [m]	0,113	0,161	0,186	0,228

Tab. 12: Ergebnisse der Geschwindigkeitsvariation

Abb. 50 und Abb. 51 veranschaulichen die Zunahme der Höhe der Trocknungsfront bzw. der mittleren Steigung der Temperaturkurven mit steigender Leerrohrgeschwindigkeit.

In Abb. 52 sind gut die verschiedenen Anstiege der Temperaturkurven erkennbar. Höhere Leerrohrgeschwindigkeit bedeutet höhere Stoff- und Wärmeübergangskoeffizienten, damit eine kürzere Trockenzeit und daraus resultierend den steileren Anstieg der Temperaturkurven. Der Anstieg der Temperaturkurven ist nach oben hin beschränkt, da bei großen Trocknungsgeschwindigkeiten innere Transportwiderstände limitierend wirken. Die Geschwindigkeit  $u$  der Trocknungsfront steigt linear und damit stärker als die mittlere Steigung  $k_{\text{mittel}}$  der Trocknungsfront, woraus sich nach Formel (7.17) ein Anstieg der Höhe der Trocknungsfront ergibt.

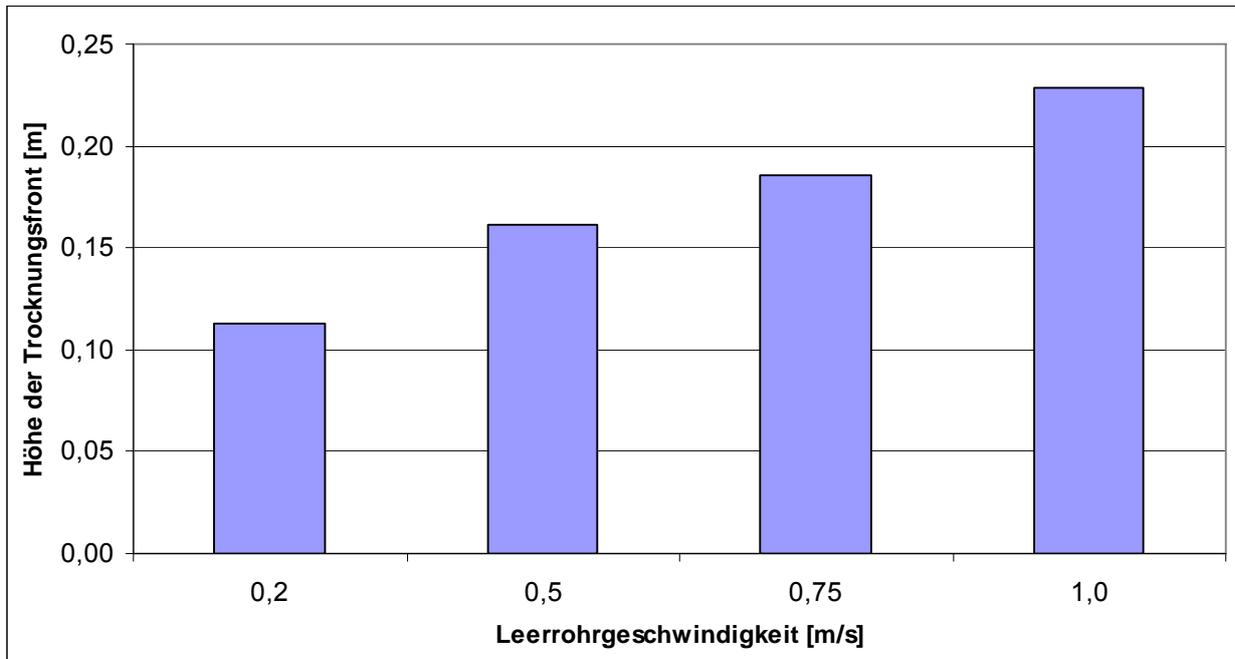


Abb. 50: Höhe der Trocknungsfront bei der Geschwindigkeitsvariation (56 °C, 11-16 mm)

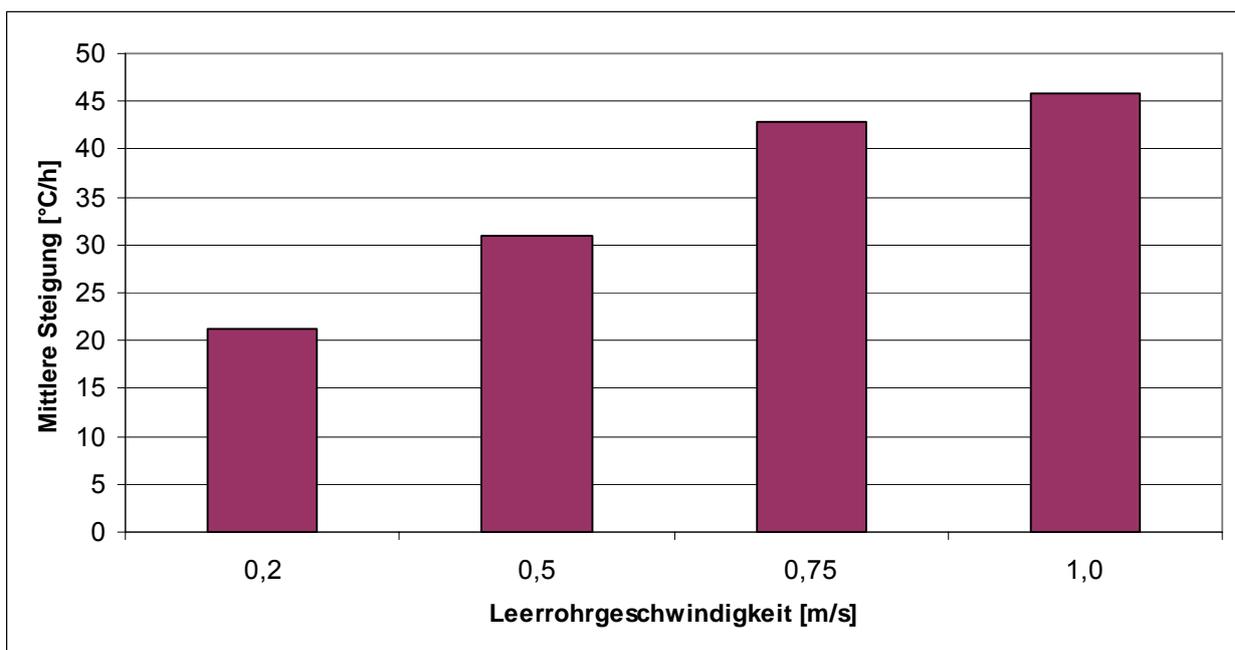


Abb. 51: Mittlere Steigung der Temperaturkurven bei der Geschwindigkeitsvariation (56 °C, 11-16 mm)

Der lineare Zusammenhang zwischen Leerrohrgeschwindigkeit und Geschwindigkeit der Trocknungsfront ist in Abb. 53 ersichtlich.

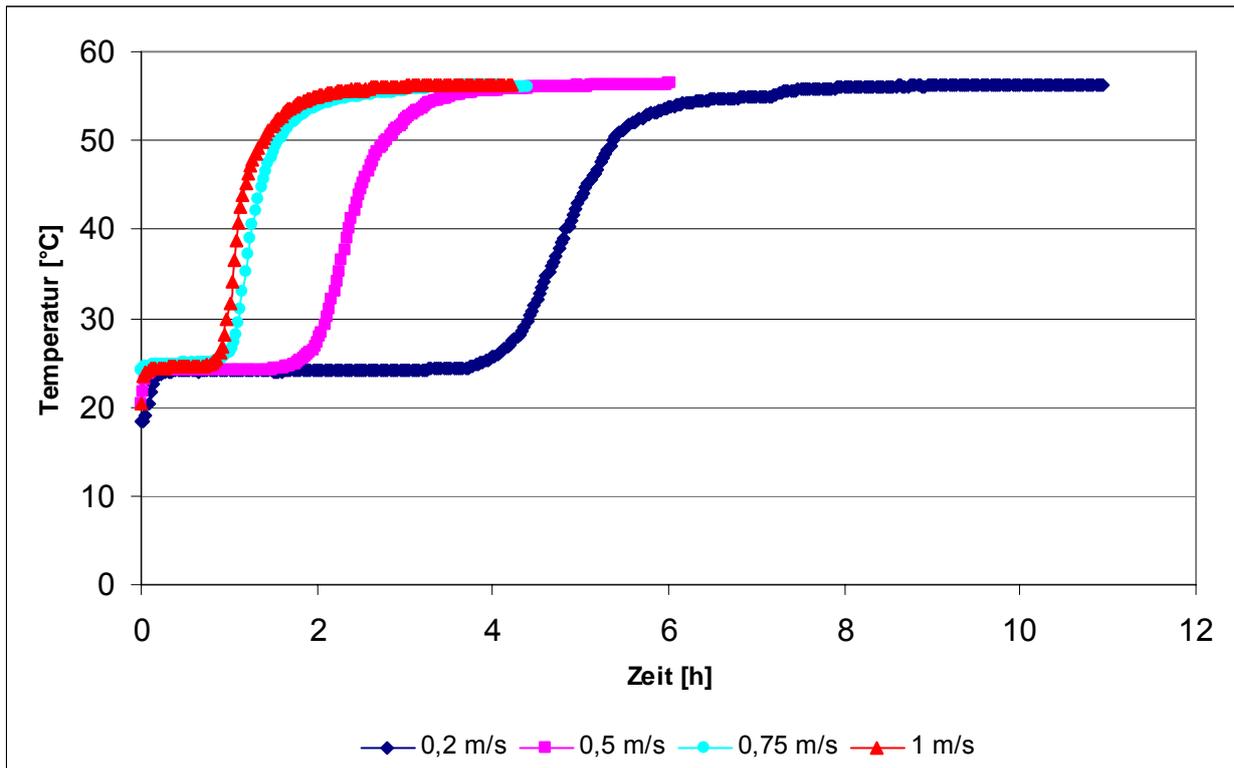


Abb. 52: Vergleich der Temperaturkurven des 36 cm – Messfühlers bei der Geschwindigkeitsvariation (56 °C, 11-16 mm)

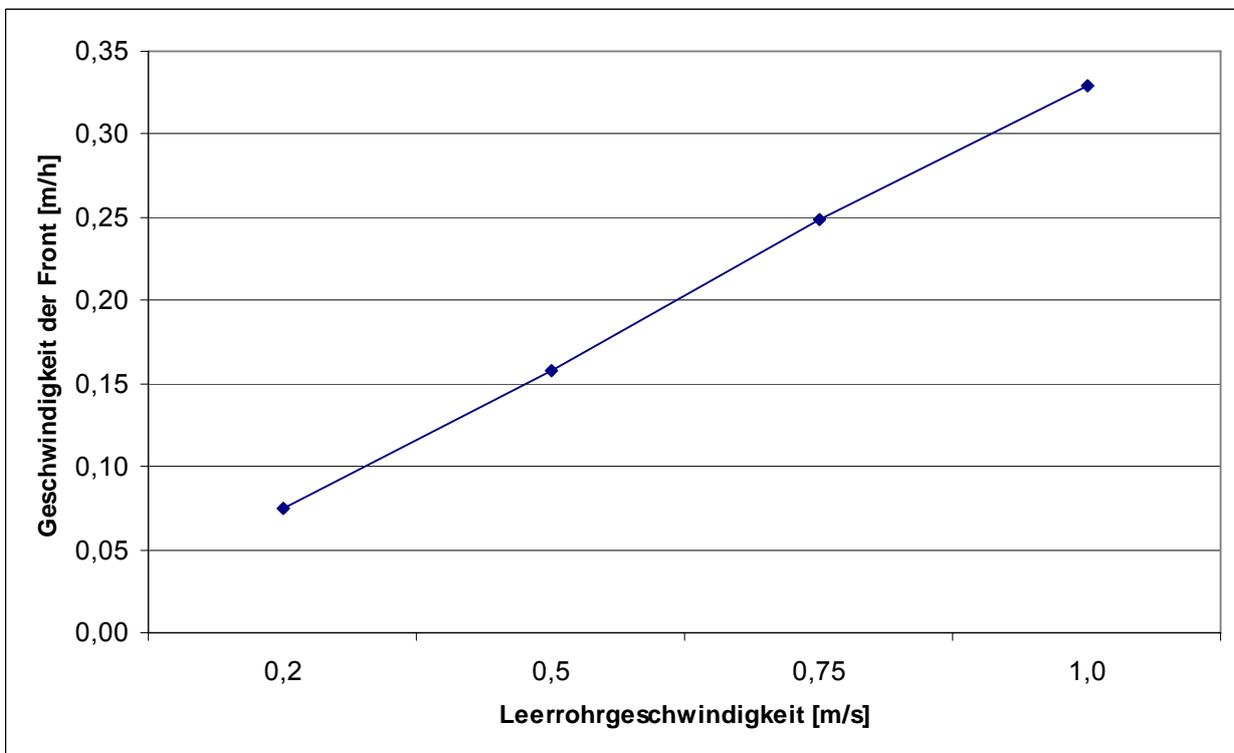


Abb. 53: Geschwindigkeit der Trocknungsfrent in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit bei der Geschwindigkeitsvariation (56 °C, 11-16 mm)

### 7.5.7 Druckverlust

Die relative Druckverluständerung errechnet sich jeweils aus den gemessenen Druckverlusten  $\Delta p_A$  am Anfang und  $\Delta p_E$  am Ende eines Versuches.

Damit ist die relative Druckverluständerung  $\Delta p_{rel}$  bestimmt durch

$$\Delta p_{rel} = \frac{\Delta p_A - \Delta p_E}{\Delta p_A} . \quad (7.18)$$

In Abb. 54 sind die relativen Druckverluständerungen über die Schüttung aller Versuche gegenübergestellt. Es ist keine Tendenz ersichtlich. Zu sagen ist auch, dass die Ablesegenauigkeit bei einem U-Rohr-Manometer nicht optimal ist. Die relativen Druckverluständerungen bewegen sich im Bereich von 20 bis 30 %.

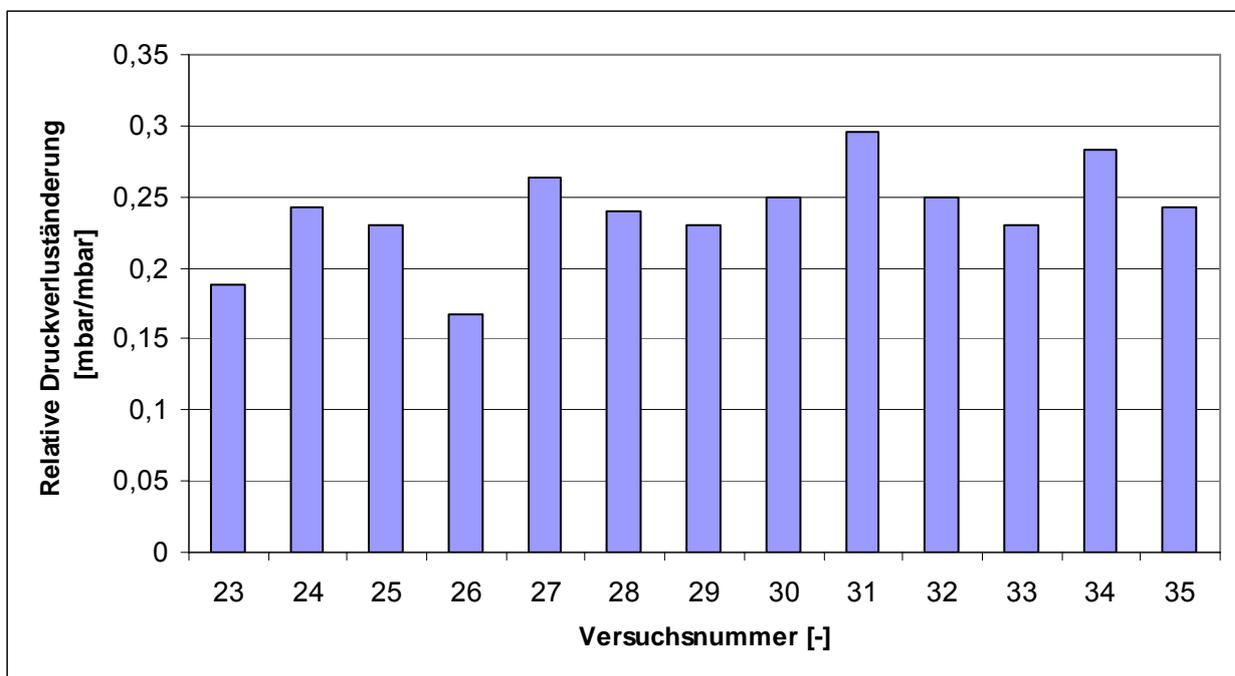


Abb. 54: Relative Druckverluständerung über die Schüttung

## 7.6 Punktförmige Eindüsung

Im Biomassekraftwerk Güssing wird die Biomasse derzeit mittels eines Schubbodens aus einem überdachten Tagesbunker zur Vergasung gefördert. Unter diesem Schubboden soll evtl. die Luftverteilung installiert werden. Es stehen verschiedene Varianten zur Diskussion, die sich in der Form der Luftpindüsung bzw. -verteilung unterscheiden. Weiters stellt sich die Frage, welchen Abstand die Löcher bei einem Lochprofil (Abb. 55a) bzw. welche Spaltbreite zwischen den einzelnen Leisten des Dreiecksprofils (Abb. 55b) nötig ist, damit eine gleichmäßige Durchströmung der Schüttung gewährleistet ist. In den Versuchen ist das geometrische Profil der Trocknungsfront in der Schüttung bei punktförmigem Eintritt der Trocknungsluft von Interesse.

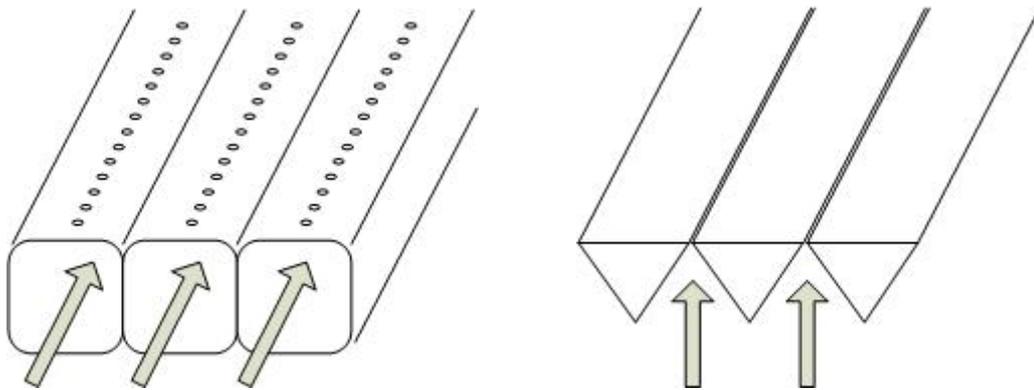


Abb. 55: Mögliche Formen der Luftpindüsung für den Trockenboden  
a Loch-, b Dreiecksprofil

In der Versuchsanordnung wird unter dem bereits vorhandenen Siebboden, auf dem die Hackschnitzel zu liegen kommen, eine kreisförmige Gummimatte eingebaut. Diese bedeckt den gesamten Querschnitt und hat in der Mitte eine runde Ausnehmung mit 20 mm.

Die Temperaturmessung erfolgt im Abstand von rund 90 Minuten. Dabei werden jeweils die Temperaturmessfühler in der Schüttung aus der mittigen Position in Inkrementen von zwei Zentimetern radial zum Rand hin bewegt. Alle zwei Zentimeter werden die Temperaturen aufgenommen, um daraus ein Profil der Trocknungsfront in der Schüttung zu bestimmen. Ziel ist es, die Grenze zwischen Kühlgrenztemperatur außen in der Schüttung und Trockentemperatur im Inneren zu finden. Durch Dispersion kommt es zu einer Aufweitung des eintretenden Luftstrahles. [Müller, 2003] Daher wird von der Ausbildung einer Totzone im Bereich rund um die Eindüsung ausgegangen (siehe Abb. 56).

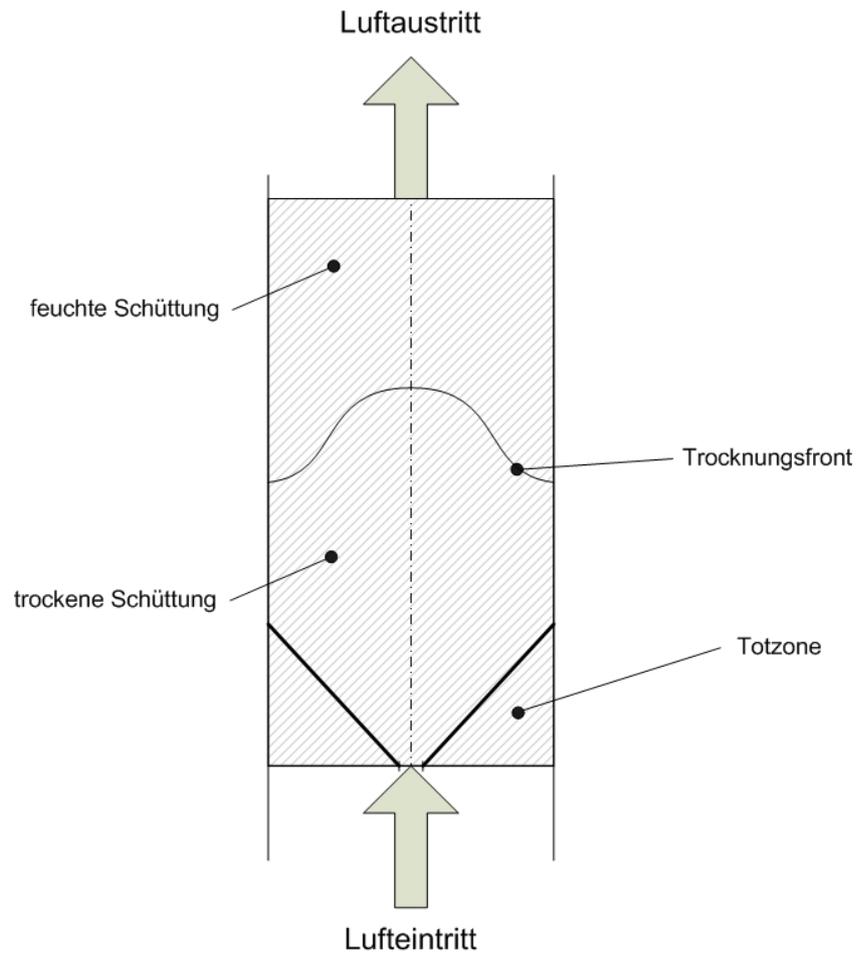


Abb. 56: Skizze der Schüttung - Modellvorstellung

Die Versuchsreihe setzt sich aus drei Versuchen mit identen Temperaturen und Leerrohrgeschwindigkeiten, jedoch unterschiedlichen Partikelgrößen zusammen. Tab. 13 gibt einen Überblick über das Versuchsprogramm.

Versuch Nr.	36	37	38
Partikelfraktion [mm]	3 - 11	11 - 16	16 - 32
Lufttemperatur [°C]	70	70	70
Leerrohrgeschwindigkeit [m/s]	0,2	0,2	0,2

Tab. 13: Versuchsreihenfolge für das Trocknungsprofil in der Schüttung

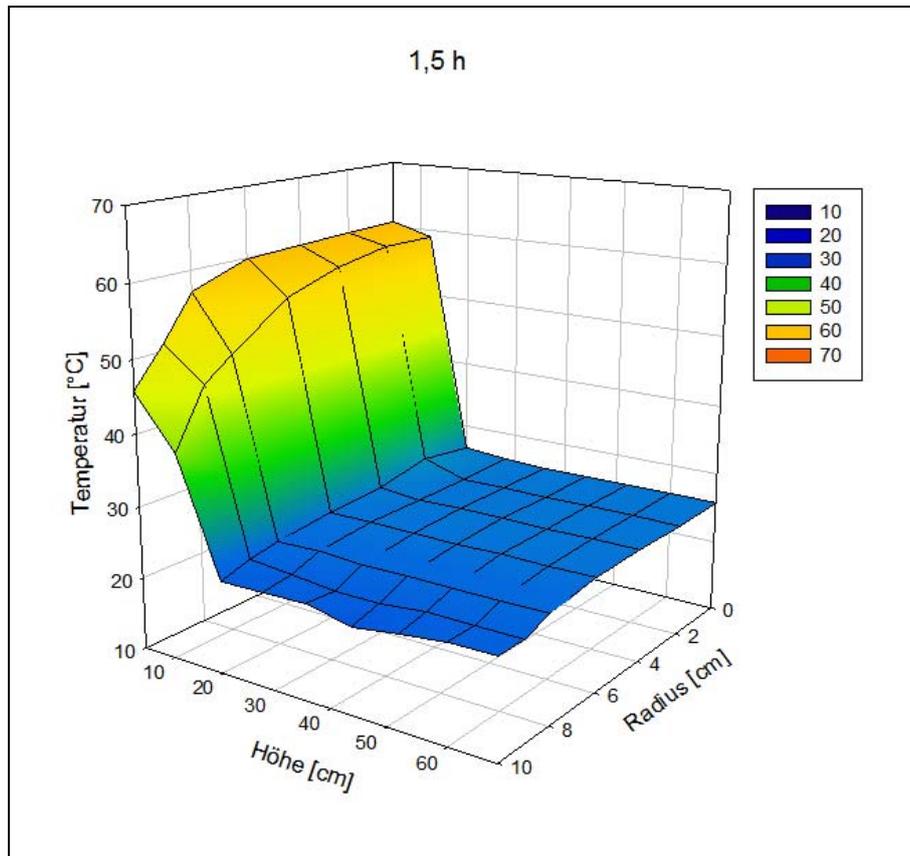


Abb. 57: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 3 – 11 mm nach 1,5 h

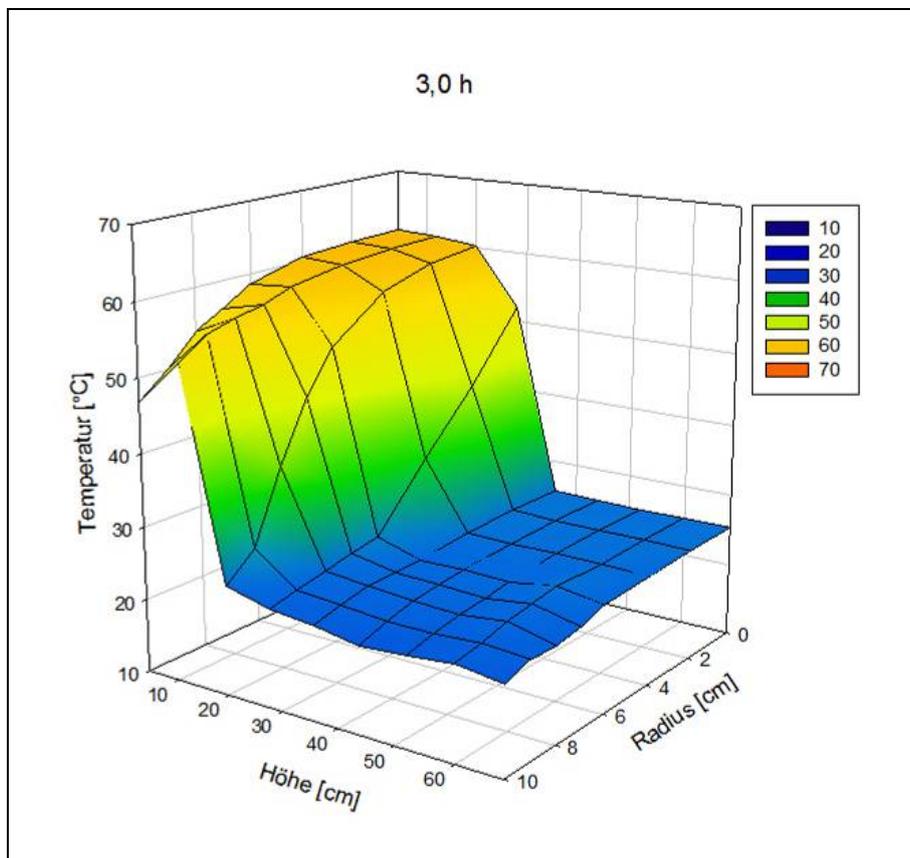


Abb. 58: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 3 – 11 mm nach 3 h

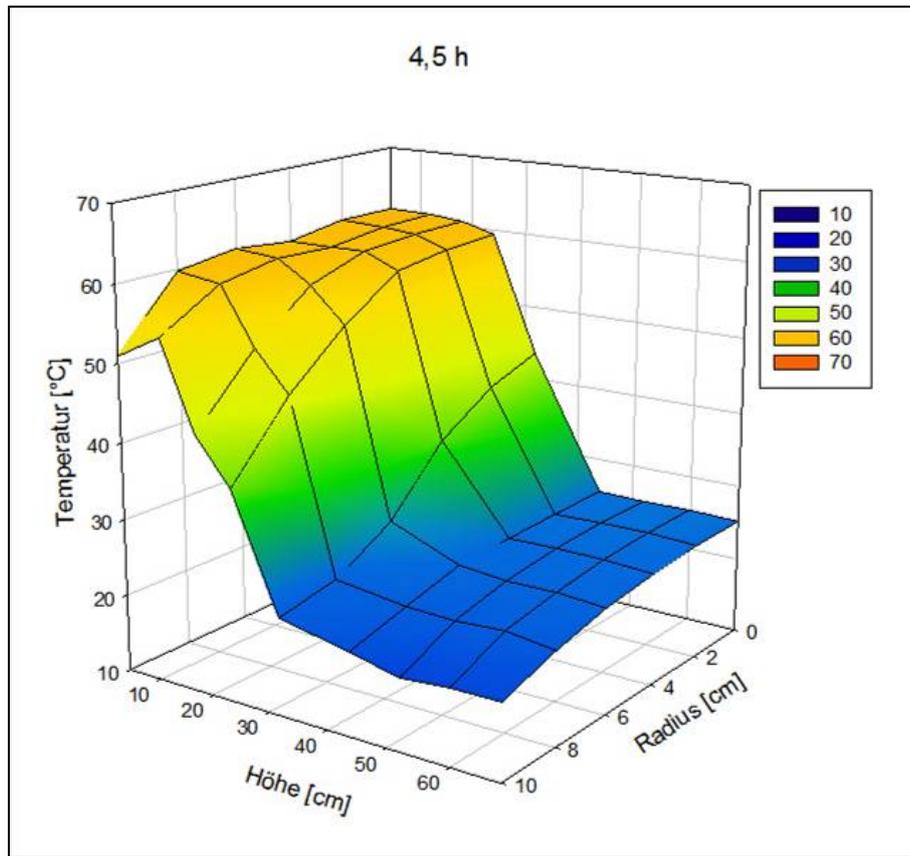


Abb. 59: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 3 – 11 mm nach 4,5 h

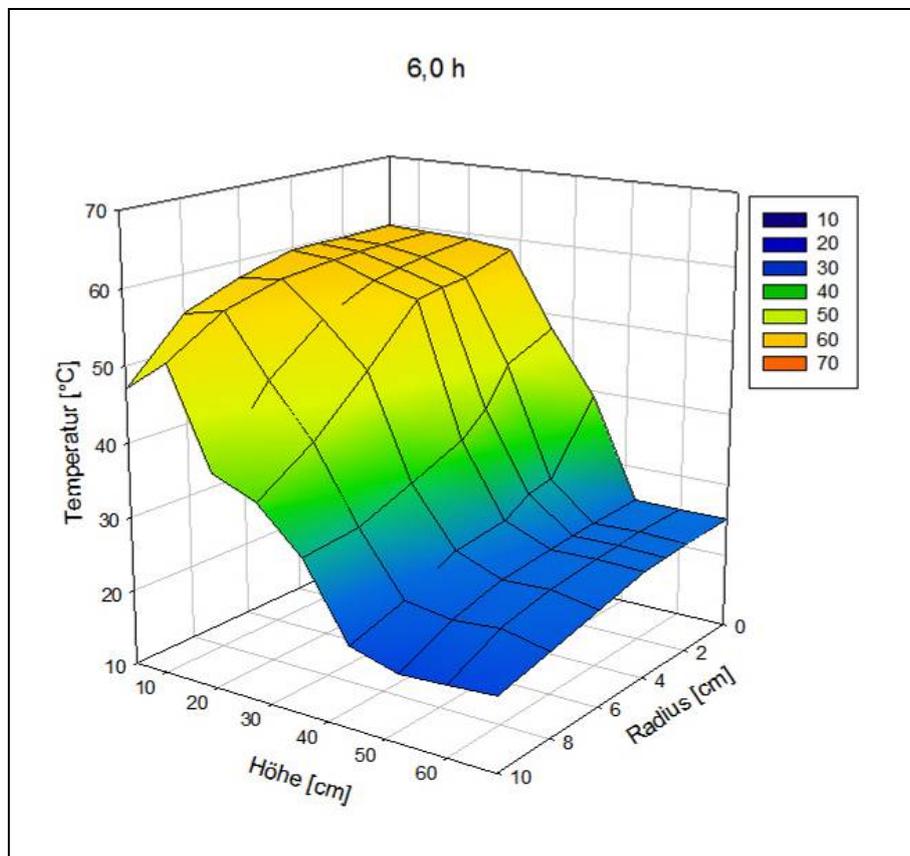


Abb. 60: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 3 – 11 mm nach 6 h

Die Abb. 57 bis Abb. 60 zeigen das zeitliche Temperaturverhalten der Schüttung in Versuch Nr. 36 mit Partikelfraktion 3 – 11 mm. Aufgenommen wird das Temperaturprofil in einem 3D-Diagramm. Die x-Achse beschreibt die Position in radialer Richtung im Trockenreaktor. Die Thermoelemente sind zum Beginn jeder Messung zentrisch angeordnet und werden dann in Schritten von 2 cm Richtung Rand bewegt. Auf der z-Achse ist die Temperatur des jeweiligen Thermoelements aufgetragen während auf der y-Achse die Höhen der Thermoelemente aufgetragen sind. Diese sind in Abständen von 8 cm angeordnet.

Nach 1,5 Stunden ist der Großteil der Schüttung noch auf Kühlgrenztemperatur bei rund 25 °C. Lediglich die Messfühler in 4 cm bzw. 12 cm Höhe registrieren bereits eine deutlich höhere Temperatur, wobei diese zum Rand der Schüttung hin abfällt. Dieses Verhalten ist bei den weiteren Messungen wiederholt zu beobachten: Die Temperatur fällt von der Mitte zum Rand, während mit längerer Dauer des Versuches die Temperaturfront in der Schüttung nach oben wandert.

In Versuch Nr. 37 (Abb. 61 bis Abb. 64) wird das Temperaturprofil in der Schüttung unter denselben Bedingungen aufgezeichnet, wie sie auch beim ersten Versuch geherrscht haben. Lediglich die Partikelgröße ist nun 11 – 16 mm. Das Verhalten ähnelt dem im ersten Versuch: Die Temperaturen im unteren Bereich der Schüttung steigen schnell an und es bildet sich ein Temperaturgradient zwischen Zentrum und Rand der Schüttung aus. Die Trocknungsfront wandert wieder nach oben, ohne ihr Profil zu ändern. Im Verlauf des Versuches vereinheitlicht sich die Temperatur über den Radius in den unteren Schichten der Schüttung. Im oberen Bereich bleibt die Schüttung konstant auf Kühlgrenztemperatur.

Ein möglicher Grund für das Nichtzutreffen des erwarteten Modells in Versuch Nr. 38 (Abb. 65 bis Abb. 68) ist die Porosität der Schüttung im Randbereich. Bei größeren Partikeln steigt der Einfluss der Wand. Es kommt zur Ausbildung einer ringförmigen Randzone, in der die durchschnittliche Porosität aufgrund der räumlichen Verteilung der Hackschnitzel größer ist als im Kern der Schüttung. Der Einfluss der Wand wird größer mit steigendem Verhältnis von Reaktordurchmesser  $D$  zu charakteristischem Durchmesser der Partikel  $d$  ( $D/d$ ). [Nemec, 2005] Auf Grund dessen wird die Randgängigkeit der Strömung erhöht und die Schüttung trocknet im Außenbereich schneller als innen – im Gegensatz zu den beiden vorherigen Versuchen.

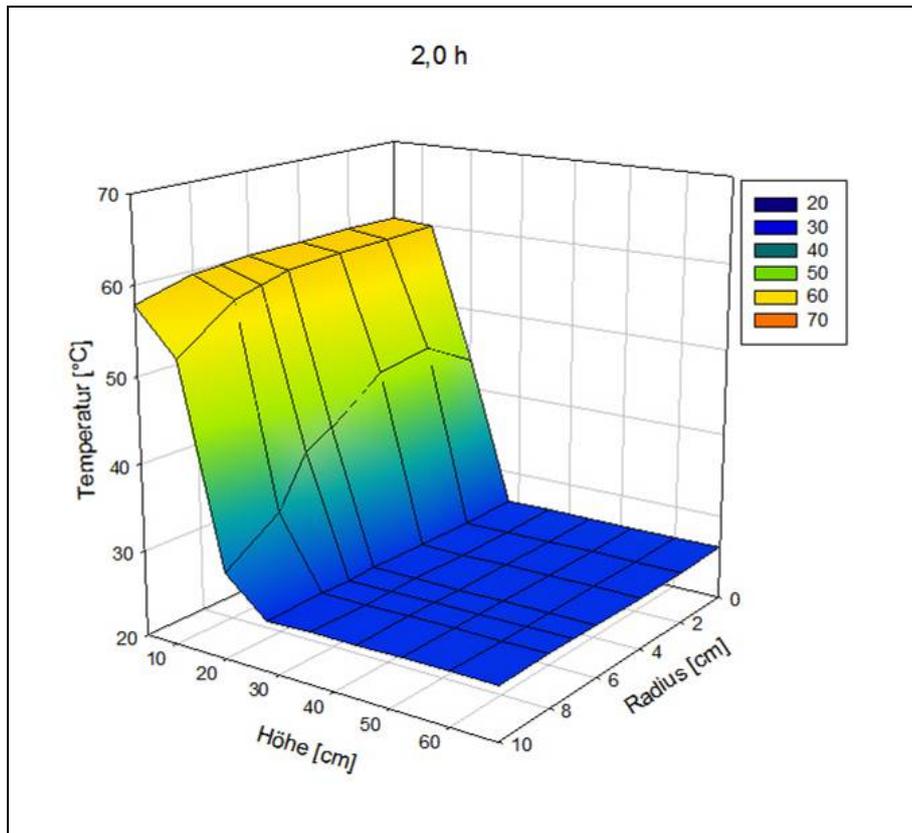


Abb. 61: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 11 – 16 mm nach 2 h

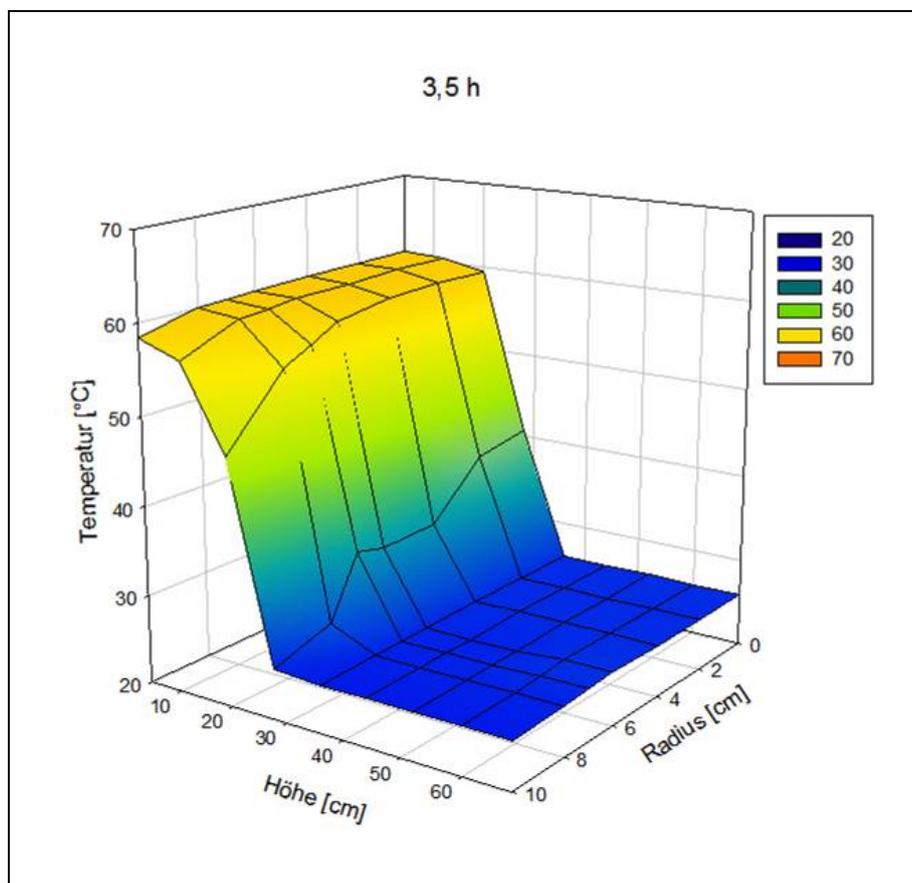


Abb. 62: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 11 – 16 mm nach 3,5 h

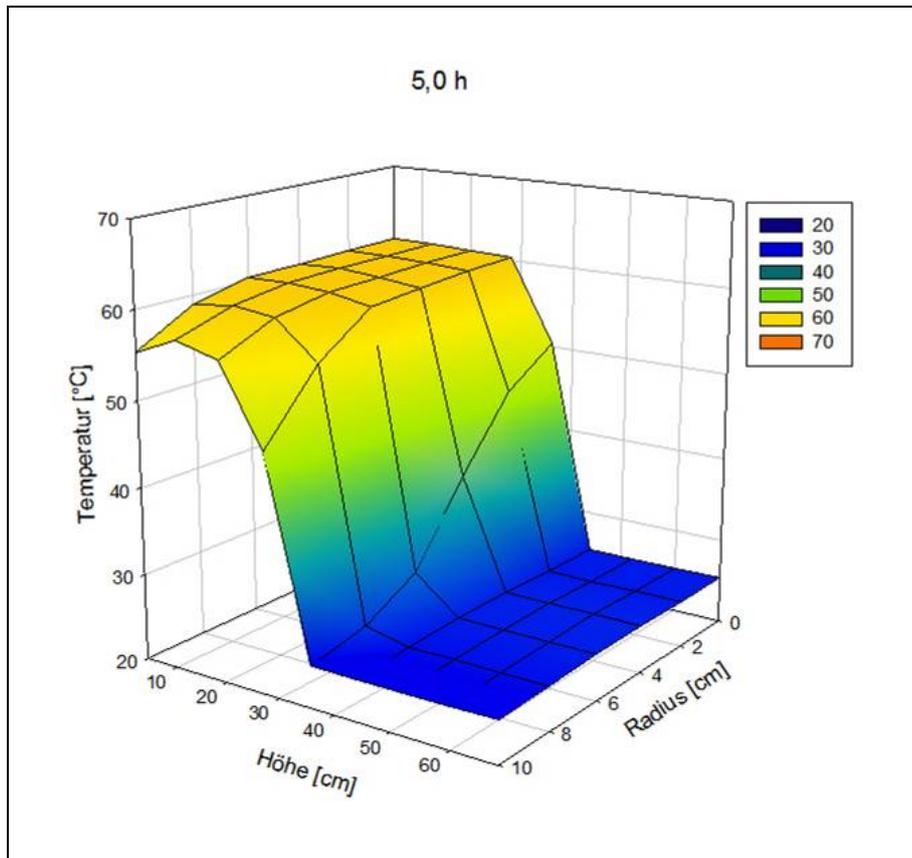


Abb. 63: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 11 – 16 mm nach 5 h

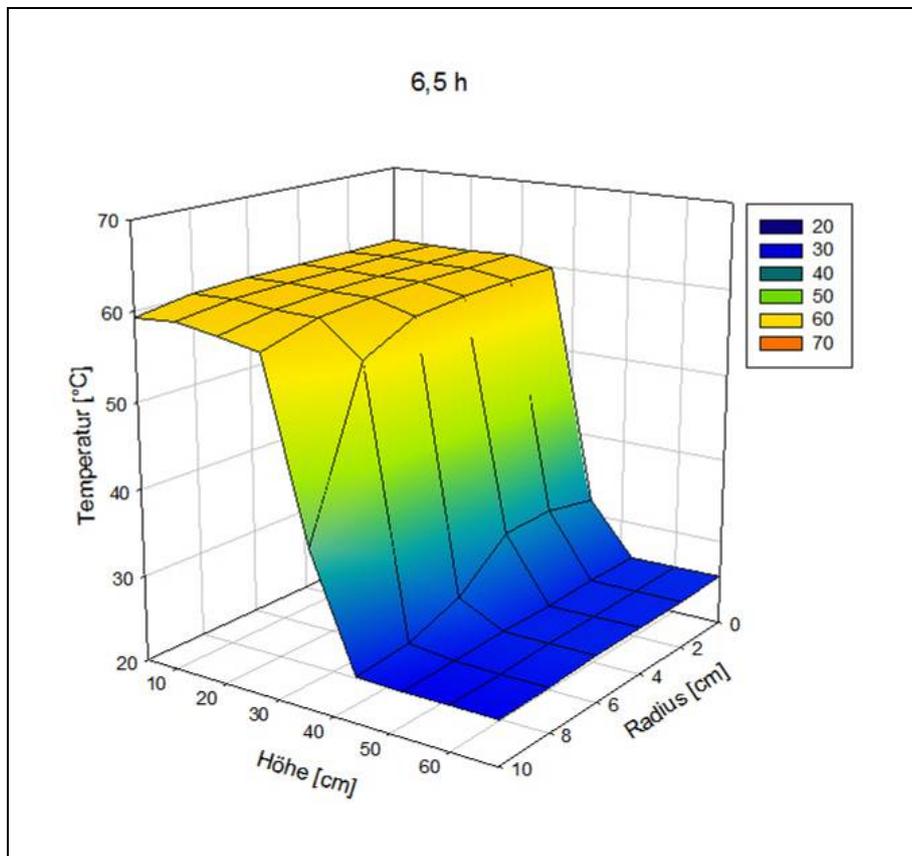


Abb. 64: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 11 – 16 mm nach 6,5 h

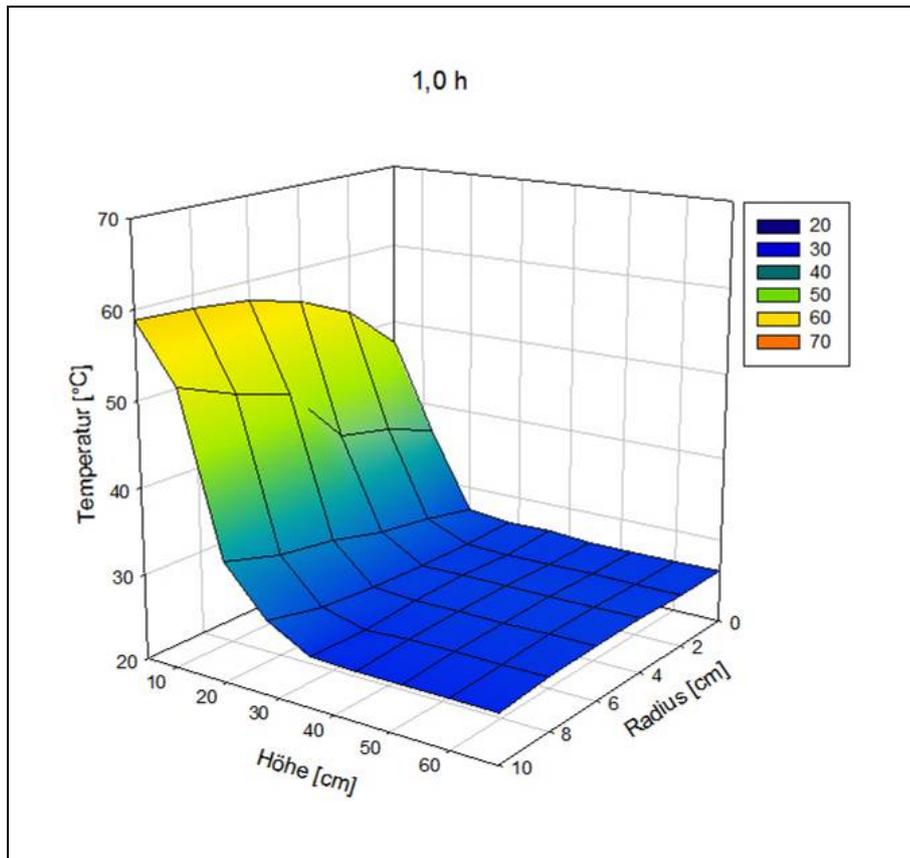


Abb. 65: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 16 – 32 mm nach 1 h

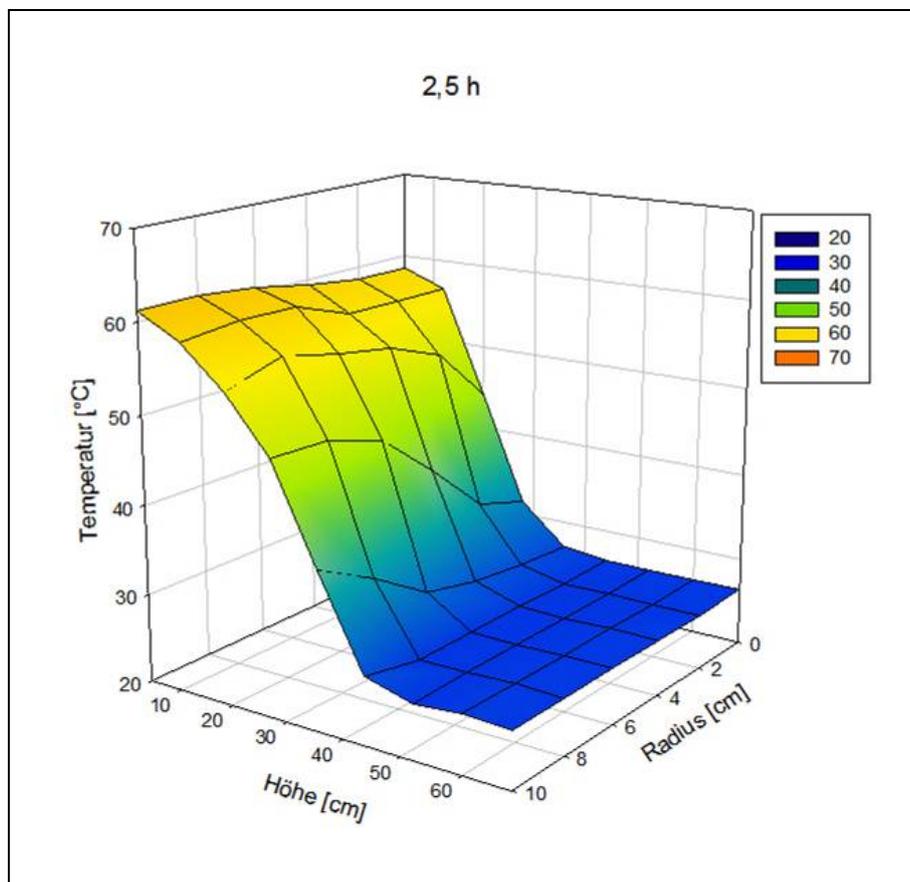


Abb. 66: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 16 – 32 mm nach 2,5 h

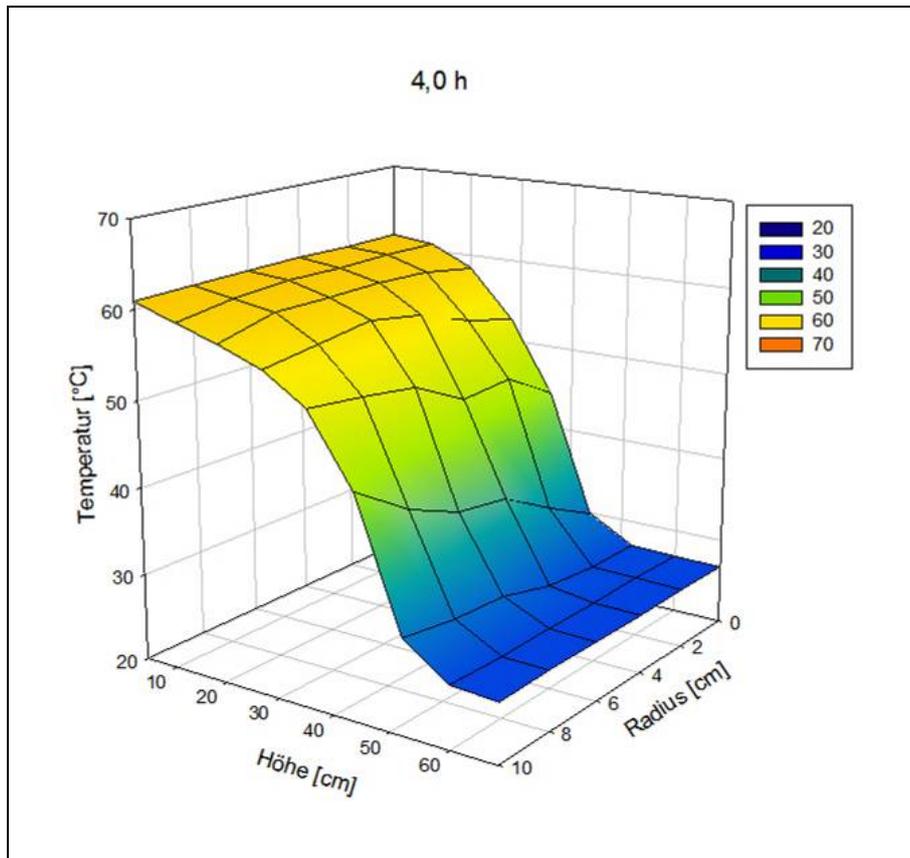


Abb. 67: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 16 – 32 mm nach 4 h

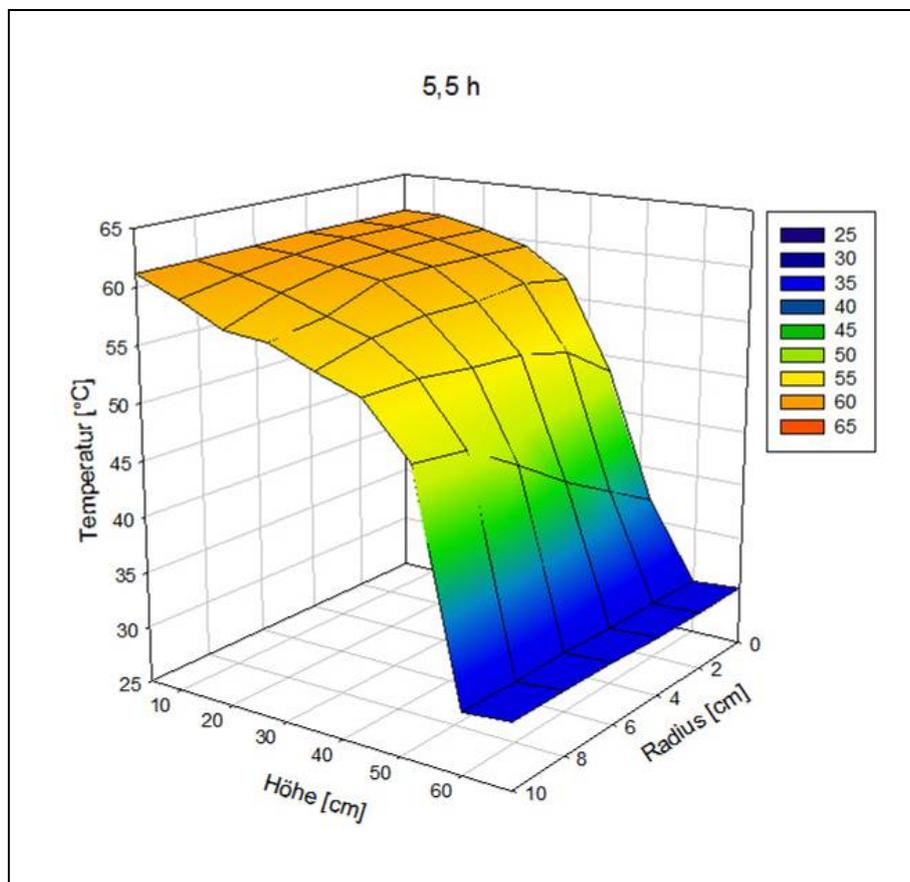


Abb. 68: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 16 – 32 mm nach 5,5 h

Die eingangs gestellten Fragen können nach den durchgeführten Versuchen mit punktförmiger Eindüsung nicht zufriedenstellend beantwortet werden. Totzonen im Bereich rund um die Eindüsung konnten nicht beobachtet werden, sehr wohl jedoch ein Temperaturgefälle zum Rand der Schüttung hin. Nur bei größeren Partikeln, wie im dritten Versuch, gilt dies nicht, da hier Randgängigkeitseffekte überwiegen.

Als Verbesserung des Versuchsaufbaus wird ein Behälter mit größerer Grundfläche vorgeschlagen. In diesem größeren Behälter werden die genannten Randgängigkeitseffekte minimiert.

Aus den Versuchen kann abgeleitet werden, dass die Art der Eindüsung keine große Rolle für das Trocknungsverhalten spielt, da zum Beispiel die Partikelgröße und daraus resultierende Randgängigkeitseffekte größeren Einfluss haben.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Es wird immer schwieriger die steigende Nachfrage nach trockenem Brennstoff für thermische Biomassekonversionsanlagen zu befriedigen. Ein möglicher Ausweg bietet sich in der Verwendung der in solchen Anlagen anfallenden Niedertemperaturabwärmen zur Trocknung des Brennstoffes. Die Verwendung von Niedertemperaturabwärmen hätte neben der Wirkungsgradsteigerung der Gesamtanlage den Vorteil, dass die Belastung der Abluft mit organischen Schadstoffen sehr gering ist und somit eine thermische Nachbehandlung der Abluft entfallen kann. Betrachtet man als Beispiel die Biomassevergasungsanlage Güssing, könnte durch eine integrierte Trocknung die Überlastung verschiedener Anlagenkomponenten wie z.B. Brennkammer, Luftvorwärmer, Saugzug und Kondensathandling vermieden werden, wenn der Wassergehalt des eingesetzten Brennstoffes von derzeit 25 – 30 % auf 10 – 15 % gesenkt wird. Gleichzeitig werden der Kaltgaswirkungsgrad und damit der elektrische Anlagenwirkungsgrad erhöht.

Diese Arbeit liefert mit den verschiedenen Versuchen mit Einzelpartikeln bzw. Schüttungen von Hackschnitzeln die Grundlage für die Auslegung eines Trocknungsapparates.

Die Ergebnisse der Versuche mit Einzelpartikeln zeigen, den großen Einfluss der Partikeldicke. Bei einer Verdopplung der Partikeldicke kommt es zu einer Verdopplung der Trocknungsdauer, um das Partikel von 41 % Feuchte auf 20 % Feuchte zu trocknen. Eine Verfünffachung der Geschwindigkeit der Trocknungsluft verringert die Trocknungsdauer jedoch nur um ca. ein Drittel. Die Temperatur der Trocknungsluft hat im Bereich der Niedertemperaturtrocknung nur geringen Einfluss auf die Trocknungsdauer. Eine Erhöhung der Temperatur der Trocknungsluft um 32 °C führt zu einer Verminderung der Trocknungsdauer um rund 37 %.

Tritt Trocknungsluft in eine Schüttung feuchter Holzpartikel ein, nimmt sie Feuchte aus dem Holz auf und kühlt dabei ab, bis schließlich die Kühlgrenztemperatur erreicht wird. Die Übergangszone, in der diese Abkühlung der Luft und damit auch die eigentliche Trocknung der Partikel stattfinden, wird als Trocknungsfront bezeichnet. Die Breite dieser Trocknungsfront ist von entscheidender Bedeutung für die Auslegung eines Trockners für Biomasseschüttungen. Je höher die Trocknungsfront ist, umso höher sollte auch die Höhe der Schüttung sein, um eine möglichst optimale Ausnutzung der Wasseraufnahmekapazität der Trocknungsluft zu gewährleisten.

Die Höhe der Trocknungsfront wurde für verschiedene Parameter wie Partikelgröße, Temperatur der Trocknungsluft und Leerrohrgeschwindigkeit praktisch ermittelt. Es zeigt sich

eine starke Abhängigkeit der Höhe der Trocknungsfront von der Partikelgröße der eingesetzten Hackschnitzel und der Leerrohrgeschwindigkeit. Der Einfluss der Temperatur der Trocknungsluft ist jedoch gering.

Weiters wurde der Druckverlust in Abhängigkeit von der Leerrohrgeschwindigkeit für verschiedene Partikelfractionen experimentell bestimmt und mit den nach der Formel nach Ergun berechneten Werten verglichen. Es zeigt sich, dass die Formel von Ergun mit den Werten  $k_1=150$  und  $k_2=1,75$  zu geringe Werte für den Druckverlust liefert. Für ein Hackgutklasse G50 wird ein optimaler Wert für  $k_{2opt}$  von 3,85 ermittelt.

Mit Hilfe dieser Ergebnisse lässt sich die benötigte Leistung des Gebläses eines industriellen Trockners berechnen.

Es ist anzumerken, dass alle in dieser Arbeit dargestellten Versuche zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit mit wiederbefeuchtete Hackschnitzel durchgeführt wurden. Das Trocknungsverhalten von rohfeuchten Hackschnitzeln weicht deutlich von jenem von wiederbefeuchteten Hackschnitzeln ab. Dieser Unterschied sollte Gegenstand weiterer Forschung sein. Weitere Untersuchungen sollten auch die Ermittlung der Abhängigkeit der Staubbelastung der Abluft von Parametern wie der Trocknungsluftgeschwindigkeit und der Höhe der Schüttung zum Ziel haben, da dies ebenfalls von entscheidender Bedeutung für die praktische Auslegung eines Trocknungsapparates ist.

## 9 Formelzeichen

A	... Antoine-Koeffizient [-]
aF	... Absolute Feuchte [kg/kg]
A <sub>proj</sub>	... Projizierte Fläche des Körpers [m <sup>2</sup> ]
A <sub>W</sub>	... Widerstandskoeffizient ( $3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$ )
B	... Antoine-Koeffizient [-]
B <sub>W</sub>	... Widerstandskoeffizient ( $-5,802 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-2}$ )
C	... Antoine-Koeffizient [-]
C <sub>w</sub>	... Widerstandsbeiwert [-]
D <sub>p</sub>	... Partikeldurchmesser [m <sup>2</sup> ]
d <sub>sv</sub>	... Sauterdurchmesser [m]
d <sub>v</sub>	... Durchmesser der volumengleichen Kugel [m]
F	... Widerstandskraft [N]
F <sub>A</sub>	... Auftriebskraft [N]
F <sub>K</sub>	... Gewichtskraft [N]
g	... Erdbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
H	... Hubhöhe [m]
h	... Höhe der Trocknungsfront [m]
K	... Sprungsche Konstante ( $66,7 \text{ Pa} \cdot \text{K}^{-1}$ )
k	... Steigung einer Temperaturkurve [°C/h]
k <sub>1</sub>	... Ergunkonstante [-]
k <sub>2</sub>	... Ergunkonstante [-]
L	... Höhe der Schüttung [m]
m <sub>D</sub>	... im feuchten Gas enthaltene Dampfmasse [kg]
M <sub>D</sub>	... molare Masse der Feuchte [g/mol]
m <sub>H,tr</sub>	... Masse des trockenen Holzes [kg]
m <sub>L</sub>	... im feuchten Gas enthaltene Trockengasmasse [kg]
M <sub>L</sub>	... molare Masse des Trockengases [g/mol]
ṁ <sub>L</sub>	... Massenstrom Luft [kg/h]
m <sub>p</sub>	... Masse des Einzelpartikels [g]
m <sub>p,tr</sub>	... Masse des trockenen Einzelpartikels [g]
m <sub>TM</sub>	... Trockenmasse [kg]
m <sub>w</sub>	... Masse Wasser [kg]
n	... Steigung der Geraden im RRSB-Netz [-]
O <sub>p</sub>	... Oberfläche des Partikels [m <sup>2</sup> ]

$O_V$	... Oberfläche der volumengleichen Kugel [m <sup>2</sup> ]
$p$	... Gesamtdruck [Pa]
$p_{0,D}$	... Sättigungsdampfdruck [Pa]
$p_D$	... Partialdruck der Feuchtigkeit in der Feuchtgasatmosphäre [Pa]
$p_W$	... Wasserdampfdruck [Pa]
$Q_3(x)$	... Verteilungssumme [-]
$R_0$	... Elektrischer Widerstand bei 0 °C [Ω]
$R_\vartheta$	... Elektrischer Widerstand bei $\vartheta$ °C [Ω]
$Re$	... Reynoldszahl [-]
$rF$	... Relative Feuchte [-]
$R_t$	... Elektrischer Widerstand bei der Temperatur $t$ [Ω]
$t$	... Zeit [h]
$t_{20\%}$	... Zeit, bei der die Temperatur $\vartheta_{20\%}$ erreicht [h]
$t_{80\%}$	... Zeit, bei der die Temperatur $\vartheta_{80\%}$ erreicht [h]
$u$	... Geschwindigkeit der Trocknungsfront [m/h]
$U$	... Leerrohrgeschwindigkeit [m/s]
$V_G$	... Gefäßvolumen [m <sup>3</sup> ]
$V_K$	... Volumen des Körpers [m <sup>3</sup> ]
$V_L$	... Lückenvolumen [m <sup>3</sup> ]
$V_{min}$	... Kompaktiertes Volumen der Schüttung [m <sup>3</sup> ]
$V_P$	... Volumen des Partikels [m <sup>3</sup> ]
$w$	... Wassergehalt [kg/kg]
$X$	... Feuchte [kg/kg]
$x$	... Partikelgröße [m]
$x'$	... Partikelgröße bei $Q_3(x')=0,632$ [m]
$X_G$	... Feuchtebeladung der Biomasse [kg/kg]
$X_L$	... Feuchtebeladung der Luft [kg/kg]
$\mu$	... Viskosität des Gases [Pa·s]
$\vartheta$	... Temperatur [°C]
$\vartheta_{20\%}$	... 20 % - Temperatur des Intervalls zwischen Kühlgrenz- und Trockentemperatur [°C]
$\vartheta_{80\%}$	... 80 % - Temperatur des Intervalls zwischen Kühlgrenz- und Trockentemperatur [°C]
$\vartheta_f$	... Feuchtetemperatur [°C]
$\vartheta_{kühlgrenz}$	... Kühlgrenztemperatur [°C]
$\vartheta_{mittel}$	... Mitteltemperatur zwischen $\vartheta_{20\%}$ und $\vartheta_{80\%}$ [°C]
$\vartheta_{tr}$	... Trockentemperatur [°C]
$\Delta\vartheta$	... Temperaturdifferenz zwischen $\vartheta_{20\%}$ und $\vartheta_{80\%}$ [°C]

---

$\Delta p$	... Druckverlust über die Schüttung [Pa]
$\Delta p_A$	... Druckverlust am Versuchsanfang [mbar]
$\Delta p_E$	... Druckverlust am Versuchsende [mbar]
$\Delta p_{rel}$	... Relative Druckverluständerung [mbar/mbar]
$\Delta t$	... Zeitintervall [h]
$\Delta t_{mittel}$	... Mittleres Zeitintervall [h]
$\varepsilon$	... Porosität [%]
$\rho_{0,D}$	... Partialdichte des Feuchtedampfes im gerade gesättigten Feuchtegas [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_D$	... Partialdichte des Feuchtedampfes im ungesättigten Feuchtegas [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_K$	... Dichte des Körpers [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_M$	... Dichte des strömenden Mediums [kg/m <sup>3</sup> ]
$\varphi$	... Sphärizität [-]

## 10 Verzeichnisse

### 10.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Typische Sorptionsisothermen für ein hygroskopisches Gut [Sattler, 1995] .....	13
Abb. 2: Hygroskopische Isothermen für Desorption und Adsorption bei 20 °C für A Kiefer, B Eiche, C Rotbuche [Kollmann, 1951] .....	14
Abb. 3: Trocknungsverlauf bei kapillar-porösem Festgut [Sattler, 1995] .....	1
Abb. 4: Ermittlung der relativen Feuchte aus dem Mollier-Diagramm [Weber, 2002] .....	22
Abb. 5: Aufbau eines kapazitiven Sensors [Weber, 2002] .....	25
Abb. 6: Schematischer Aufbau eines resistiven Sensors [Wernecke, 2003] a) Funktionsprinzip, b) Sensoraufbau .....	26
Abb. 7: Anlagenschema des BKW Güssing .....	30
Abb. 8: Elektrischer Anlagenwirkungsgrad brutto in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Brennstoffes [Hofbauer et al., 2004] .....	32
Abb. 9: Schema der Versuchsanlage .....	33
Abb. 10: Gebläsekalibrierung gegen Umgebungsdruck .....	34
Abb. 11: Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes verschiedener Werkstoffe [Bonfig, 1995] .....	35
Abb. 12: Kräfte am Schwebekörper [Bonfig, 2002] .....	36
Abb. 13: Versuchsanlage zur Biomassetrocknung .....	38
Abb. 14: Versuchsaufbau für das Trocknungsverhalten des Einzelpartikels .....	40
Abb. 15: Absolute Feuchten der Trocknungsluft am Eintritt .....	42
Abb. 16: Gegenüberstellung der Feuchteabnahme eines gehackten und eines gesägten Buchenpartikels mit 6 mm Dicke bei 0,5 m/s und 56 °C .....	43
Abb. 17: Verschiedene Einzelpartikel .....	43
Abb. 18: Gegenüberstellung der Feuchteabnahme eines verschieden oft wiederbefeuchteten, gehackten Buchenpartikels mit 6 mm Dicke bei 0,5 m/s und 56 °C .....	44
Abb. 19: Gegenüberstellung der Feuchteabnahme eines verschieden oft wiederbefeuchteten, gesägten Buchenpartikels mit 6 mm Dicke bei 0,5 m/s und 56 °C .....	45
Abb. 20: Verlauf der Feuchteabnahme bei der Holzartvariation (6 mm, 0,5 m/s, 56 °C) .....	46
Abb. 21: Zeit bis zum Erreichen unterschiedlicher Feuchten für verschiedene Holzarten (6 mm, 0,5 m/s, 56 °C) .....	47
Abb. 22: Verlauf der Feuchteabnahme bei der Temperaturvariation (6 mm, 0,5 m/s) .....	48
Abb. 23: Zeit bis zum Erreichen unterschiedlicher Feuchten für verschiedene Trocknungslufttemperaturen (6 mm, 0,5 m/s) .....	48

Abb. 24: Verlauf der Feuchteabnahme bei der Geschwindigkeitsvariation (6 mm, 56 °C) .....	49
Abb. 25: Zeit bis zum Erreichen unterschiedlicher Feuchten für verschiedene Leerrohrgeschwindigkeiten (6 mm, 56 °C) .....	50
Abb. 26: Verlauf der Feuchteabnahme bei der Partikeldickenvariation (0,5 m/s, 56 °C).....	51
Abb. 27: Zeit bis zum Erreichen unterschiedlicher Feuchten für verschiedene Partikeldicken (0,5 m/s, 56 °C) .....	51
Abb. 28: Verlauf der Feuchteabnahme bei der Variation der Faserrichtung bei Eschenpartikeln (6 mm, 0,5 m/s, 56 °C) .....	52
Abb. 29: Zeit bis zum Erreichen unterschiedlicher Feuchten für verschiedene Faserrichtungen bei Eschenpartikeln (6 mm, 0,5 m/s, 56 °C) .....	53
Abb. 30: Siebmaschine .....	54
Abb. 31: Verschiedene Fraktionen gesiebter Hackschnitzel .....	56
Abb. 32: Partikelgrößenverteilung.....	57
Abb. 33: Druckverlust pro Meter Schüttung für verschiedene Partikelfraktionen.....	59
Abb. 34: Gegenüberstellung des nach Ergun berechneten und des gemessenen Druckverlustes für verschiedene Partikelfraktionen .....	61
Abb. 35: Gegenüberstellung des nach Ergun mit optimiertem $k_2$ berechneten und des gemessenen Druckverlustes für verschiedene Partikelfraktionen .....	61
Abb. 36: Beispielhafter Temperaturverlauf in der Schüttung .....	63
Abb. 37: Beispielhafter Druckverlust in der Schüttung.....	63
Abb. 38: Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Feuchte der Schüttung beispielhaft .	64
Abb. 39: Idealisiertes Modell .....	66
Abb. 40: Ermittlung des Zeitintervalls $\Delta t_{\text{mittel}}$ .....	67
Abb. 41: Bestimmung der Höhe der Trocknungsfront.....	68
Abb. 42: Höhe der Trocknungsfront bei der Partikelgrößenvariation (0,5 m/s, 56 °C).....	69
Abb. 43: Mittlere Steigung der Temperaturkurven bei der Partikelgrößenvariation (0,5 m/s, 56 °C) .....	70
Abb. 44: Höhe der Trocknungsfront in Abhängigkeit vom Durchmesser der volumengleichen Kugel bei der Partikelgrößenvariation (0,5 m/s, 56 °C) .....	70
Abb. 45: Vergleich der Temperaturkurven des 36 cm – Messfühlers bei der Partikelgrößenvariation (0,5 m/s, 56 °C).....	71
Abb. 46: Höhe der Trocknungsfront bei der Temperaturvariation (0,5 m/s, 11-16 mm).....	72
Abb. 47: Mittlere Steigung der Temperaturkurven bei der Temperaturvariation (0,5 m/s, 11-16 mm) .....	73
Abb. 48: Vergleich der Temperaturkurven des 36 cm – Messfühlers bei der Temperaturvariation (0,5 m/s, 11-16 mm).....	73

Abb. 49: Geschwindigkeit der Trocknungsfront in Abhängigkeit der Eintrittstemperatur bei der Temperaturvariation (0,5 m/s, 11-16 mm) .....	74
Abb. 50: Höhe der Trocknungsfront bei der Geschwindigkeitsvariation (56 °C, 11-16 mm).....	76
Abb. 51: Mittlere Steigung der Temperaturkurven bei der Geschwindigkeitsvariation (56 °C, 11-16 mm) .....	76
Abb. 52: Vergleich der Temperaturkurven des 36 cm – Messfühlers bei der Geschwindigkeitsvariation (56 °C, 11-16 mm) .....	77
Abb. 53: Geschwindigkeit der Trocknungsfront in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit bei der Geschwindigkeitsvariation (56 °C, 11-16 mm).....	77
Abb. 54: Relative Druckverluständerung über die Schüttung .....	78
Abb. 55: Mögliche Formen der Lufteindüsung für den Trockenboden a Loch-, b Dreiecksprofil .....	79
Abb. 56: Skizze der Schüttung - Modellvorstellung.....	80
Abb. 57: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 3 – 11 mm nach 1,5 h .....	81
Abb. 58: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 3 – 11 mm nach 3 h .....	81
Abb. 59: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 3 – 11 mm nach 4,5 h .....	82
Abb. 60: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 3 – 11 mm nach 6 h .....	82
Abb. 61: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 11 – 16 mm nach 2 h .....	84
Abb. 62: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 11 – 16 mm nach 3,5 h .....	84
Abb. 63: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 11 – 16 mm nach 5 h .....	85
Abb. 64: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 11 – 16 mm nach 6,5 h .....	85
Abb. 65: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 16 – 32 mm nach 1 h .....	86
Abb. 66: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 16 – 32 mm nach 2,5 h .....	86
Abb. 67: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 16 – 32 mm nach 4 h .....	87

Abb. 68: Trocknungsprofilaufnahme bei 70 °C und 0,2 m/s für Partikelfraktion 16 – 32 mm nach 5,5 h .....	87
Abb. 69: Aufbau des Versuchsreaktors.....	103
Abb. 70: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 23 (Partikelgrößenvariation).....	104
Abb. 71: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 24 (Partikelgrößenvariation).....	104
Abb. 72: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 25 (Partikelgrößenvariation).....	105
Abb. 73: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 26 (Partikelgrößenvariation).....	105
Abb. 74: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 27 (Partikelgrößenvariation).....	106
Abb. 75: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 28 (Temperaturvariation).....	106
Abb. 76: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 29 (Temperaturvariation).....	107
Abb. 77: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 30 (Temperaturvariation).....	107
Abb. 78: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 31 (Temperaturvariation).....	108
Abb. 79: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 32 (Geschwindigkeitsvariation).....	108
Abb. 80: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 33 (Geschwindigkeitsvariation).....	109
Abb. 81: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 34 (Geschwindigkeitsvariation).....	109
Abb. 82: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 35 (Geschwindigkeitsvariation).....	110

## 10.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Psychrometertafel .....	23
Tab. 2: Auslegungsdaten des Biomassekraftwerks Güssing [Pröll, 2004] .....	31
Tab. 3: Kalibrierung der Federwaage 10 g .....	39
Tab. 4: Versuchsreihenfolge für das Trocknungsverhalten von Einzelpartikeln .....	41
Tab. 5: Energiehackgut nach ÖNORM M 7133 .....	55
Tab. 6: Volumina für die Porositätsbestimmung .....	58
Tab. 7: Durchmesser einer volumengleichen Kugel, Sauterdurchmesser und Sphärizität für verschiedene Partikelfractionen .....	60
Tab. 8: Optimale Werte für die Konstante $k_2$ in der Ergungleichung für verschiedene Partikelfractionen .....	60
Tab. 9: Versuchsreihenfolge für das Trocknungsverhalten der Schüttung .....	65
Tab. 10: Ergebnisse der Partikelgrößenvariation .....	69
Tab. 11: Ergebnisse der Temperaturvariation .....	72
Tab. 12: Ergebnisse der Geschwindigkeitsvariation .....	75
Tab. 13: Versuchsreihenfolge für das Trocknungsprofil in der Schüttung .....	80

## 10.3 Literaturverzeichnis

### ACCC; 2006

Österreichischer Klimabeirat

*„Stellungnahme des ACCC zum Zweiten Bericht des IPCC“*

[www.accc.gv.at](http://www.accc.gv.at), 21.09.2006

### AEA; 2006

Österreichische Energieagentur

*„Daten über erneuerbare Energieträger in Österreich“*

[www.eva.ac.at](http://www.eva.ac.at), 20.12.2006

### BKW – Jour Fix; 2006

*Besprechungsprotokoll des Biomassekraftwerk Güssing – Jour Fixe vom 17.08.2006*

### BMLFUW; 2006

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

*„Wie entwickelt sich der Wald in Österreich?“*

[www.forstnet.at](http://www.forstnet.at), 21.09.2006

### Bonfig, K.W.; 1995

*„Sensorik – Band 6: Temperatursensoren“*

Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1995

### Bonfig, K.W.; 2002

*„Technische Durchflussmessung“*

Dritte Auflage, Vulkan-Verlag, Essen, 2002

### Brammer, J.G. / Bridgewater A.V.; 1999

*„Drying technologies for an integrated gasification bio-energy plant“*

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1999, 3, pp. 243-289

### Braun, M.; 2003

*„Durchströmungsversuche eines Festbettvergasers anhand eines Labormodells“*

Diplomarbeit an der TU Wien, Inst. für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2003

### Bridgeman, O.C. / Aldrich, E.W.; 1964

*„Vapor Pressure Tables for Water“*

Heat Transfer, 1964, 86, pp. 279-286

### Brunnbauer, M.; 1995

*„Niedertemperatur-Trocknung von Holz-Hackschnitzeln“*

Diplomarbeit an der TU Wien, Inst. für Technische Wärmelehre, 1995

**Friedl, A.; 2000**

*„Thermische Verfahrenstechnik I“*

Vorlesungsskriptum, TU Wien

**Hofbauer, H.; 1996**

*„Wirbelschichttechnik“, Dritte Auflage*

Vorlesungsskriptum, TU Wien

**Hofbauer, H. / Pröll, T. / Rauch, R.; 2004**

*„Variation wesentlicher Betriebsgrößen vom BHKW Güssing“*

RENET-Bericht 41/2003, TU Wien

**Hofbauer, H.; 2006**

*„Thermische Biomassenutzung I und II“*

Vorlesungsskriptum, TU Wien

**Jörg, K.; 2003**

*„Abwasserfreie Abscheidung von Partikeln und Teeren aus Holzgas“*

Dissertation an der TU Wien, Inst. für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2003

**Kemp, I. / Bahu, R.; 1995**

*„A new algorithm for dryer selection“*

Drying Technology, 1995, 5-7, pp. 1563-1578

**Kollmann, F.; 1951**

*„Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Erster Band“*

Zweite Auflage, Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1951

**Krain, J.; 2002**

*„Brennstofftrocknung und Brennstoffkonditionierung für einen Doppelfeuervergaser“*

Diplomarbeit an der TU Wien, Inst. für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2002

**Krischer, O. / Kast, W.; 1978**

*„Trocknungstechnik, Erster Band“*

Dritte Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1978

**Kröll, K.; 1978**

*„Trocknungstechnik, Zweiter Band“*

Zweite Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1978

**Kröll, K. / Kast, W.; 1989**

*„Trocknungstechnik, Dritter Band“*

Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 1989

**Müller, R.; 2003**

*„Energie- und Stoffströme im Biomassekraftwerk Güssing“*

Diplomarbeit an der TU Wien, Inst. für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2003

**Nemec, D. / Levec, J.; 2005**

*„Flow through packed bed reactors: 1. Single-phase flow“*

Chemical Engineering Science, 2005, 60, pp. 6947-6957

**Pröll, T.; 2004**

*„Potenziale der Wirbelschichtdampfvergasung fester Biomasse – Modellierung und Simulation auf Basis der Betriebserfahrungen am Biomassekraftwerk Güssing“*

Dissertation an der TU Wien, Inst. für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2004

**Puchner, B.; 2004**

*„In-situ CO<sub>2</sub>-adsorption during biomass steam gasification“*

Diplomarbeit an der TU Wien, Inst. für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2004

**Rupar-Gadd, K.; 2006**

*„Biomass Pre-Treatment for the Production of sustainable Energy, Emissions and Self-Ignition“*

Doctoral thesis at the Växjö University, Faculty of Mathematics/Science/Technology, School of Technology and Design, 2006

**Sattler, K.; 1995**

*„Thermische Trennverfahren“*

Zweite Auflage, VCH-Verlag, Weinheim, New York, Basel, Cambridge, Tokyo, 1995

**Ståhl, M. / Granström, K. / Berghel J. / Renström R.; 2003**

*„Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets“*

Biomass and Bioenergy, 2004, 27, pp. 621-628

**Weber, D.; 2002**

*„Technische Feuchtemessung in Gasen und Festkörpern“*

Überarbeiteter Nachdruck der 1. Auflage, Vulkan-Verlag, Essen, 2002

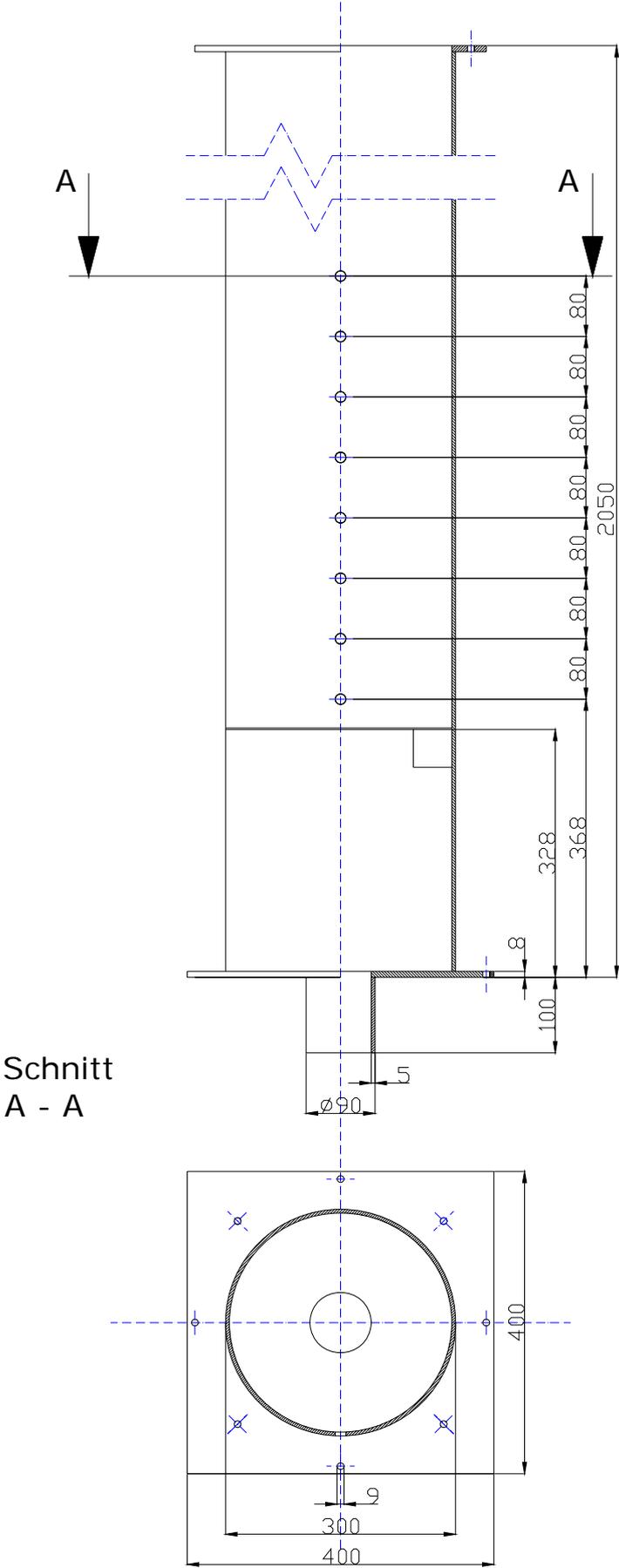
**Wernecke, R.; 2003**

*„Industrielle Feuchtemessung“*

Wiley VCH-Verlag, Weinheim, 2003

## 11 Anhang

Hier finden sich eine Skizze der Versuchsanordnung (Abb. 69) und die Temperaturverläufe der einzelnen Versuche mit Schüttungen von Hackschnitzeln. (Abb. 70 bis Abb. 82).



Schnitt  
A - A

Abb. 69: Aufbau des Versuchsreaktors

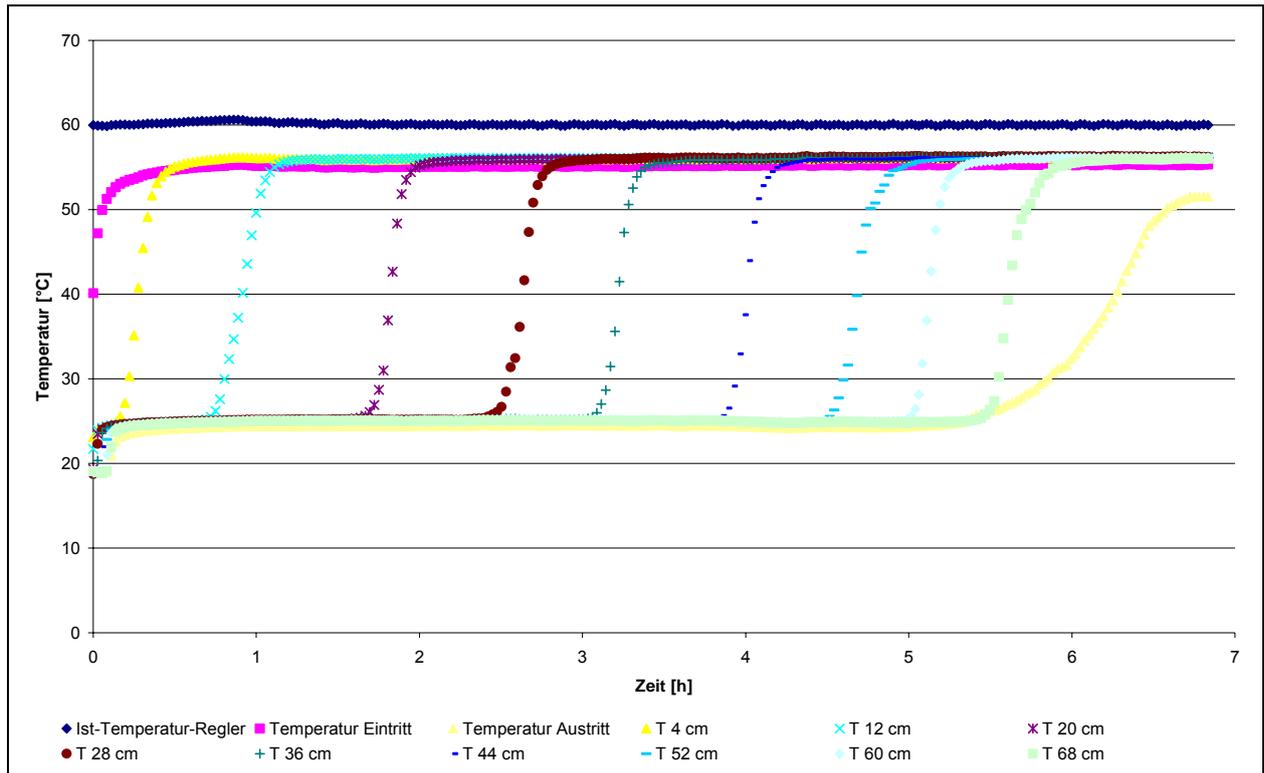


Abb. 70: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 23 (Partikelgrößenvariation)

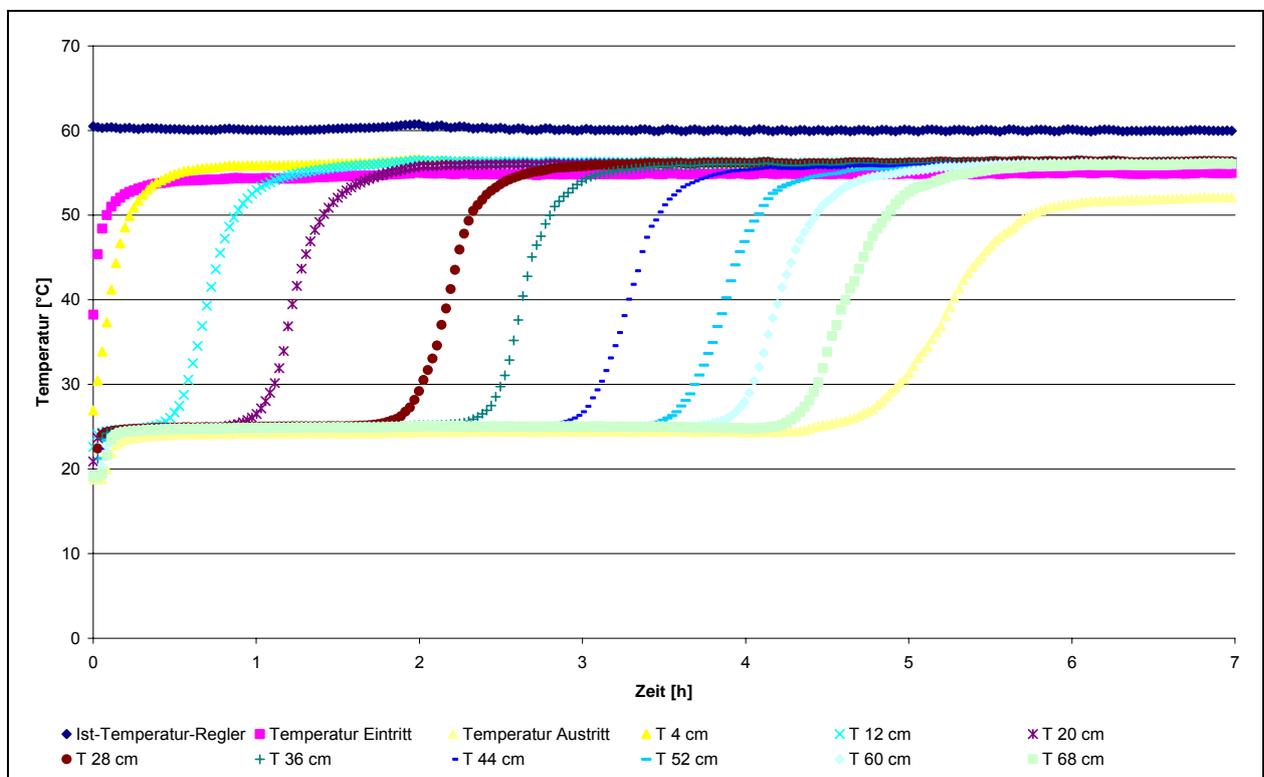


Abb. 71: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 24 (Partikelgrößenvariation)

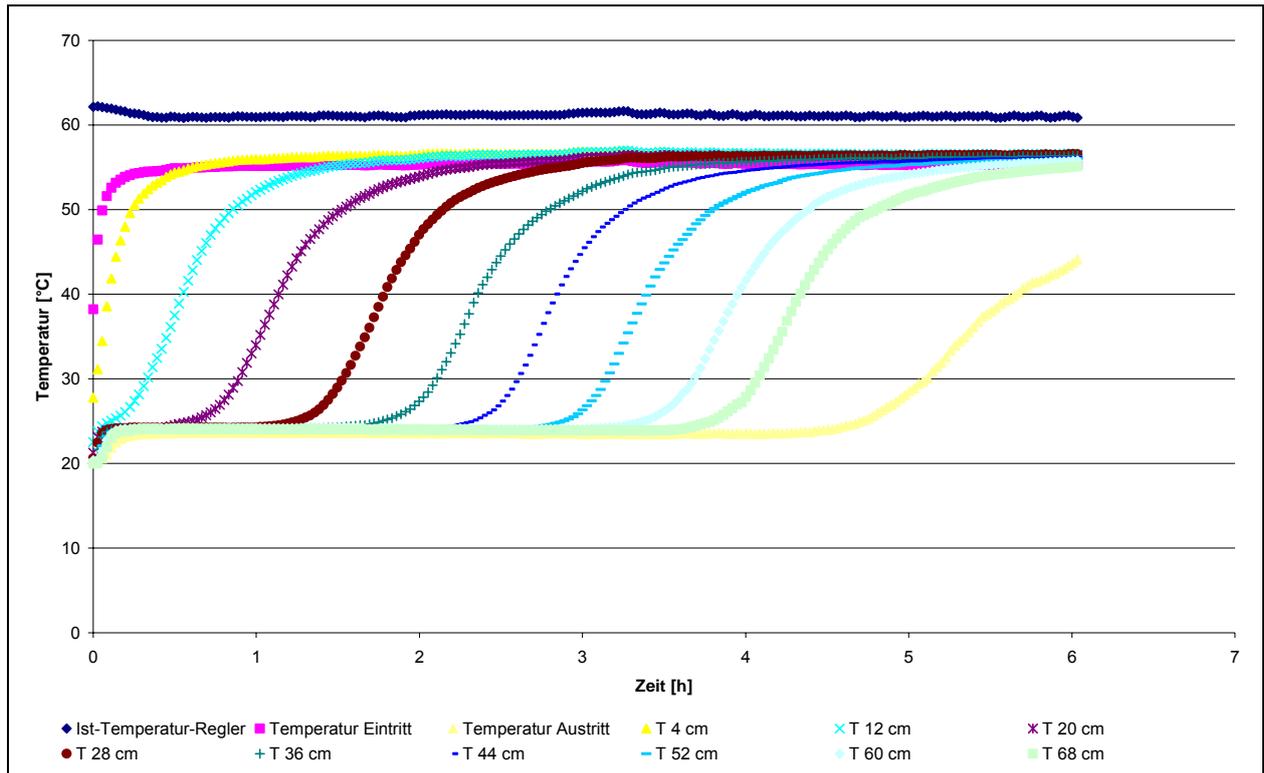


Abb. 72: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 25 (Partikelgrößenvariation)

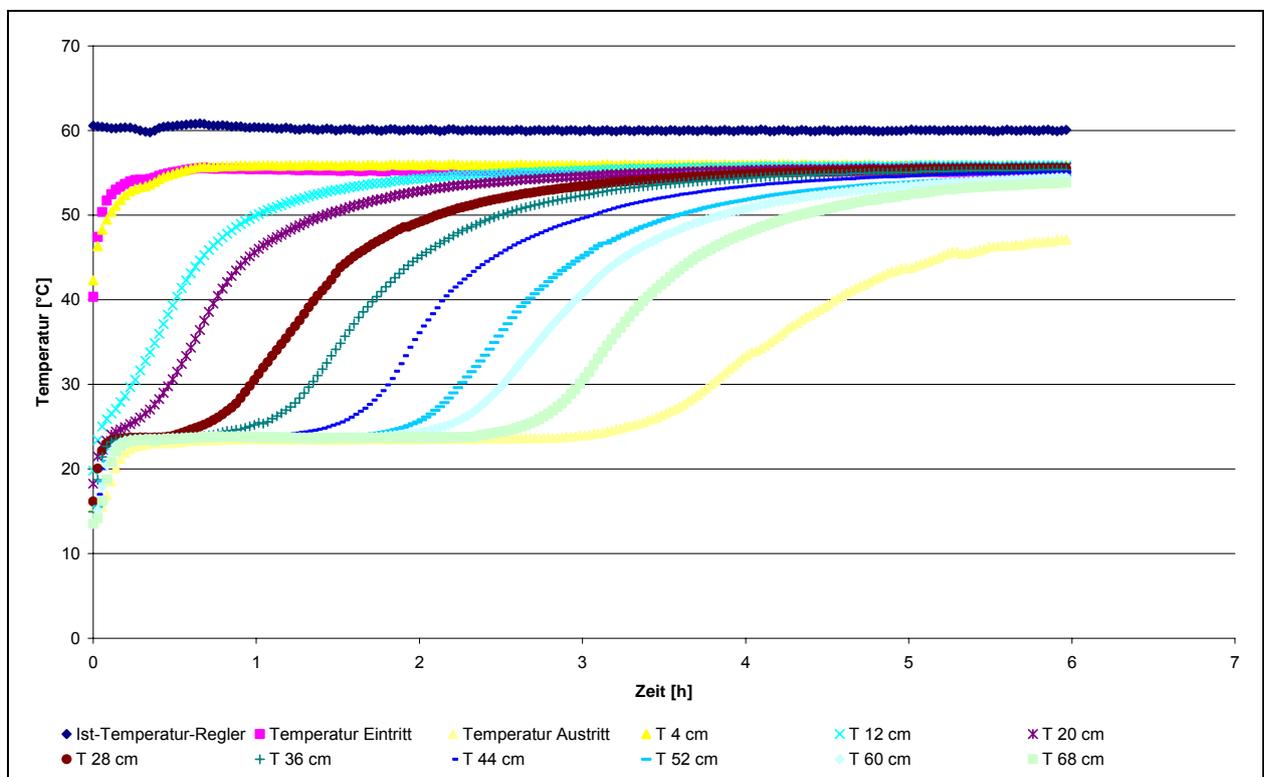


Abb. 73: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 26 (Partikelgrößenvariation)

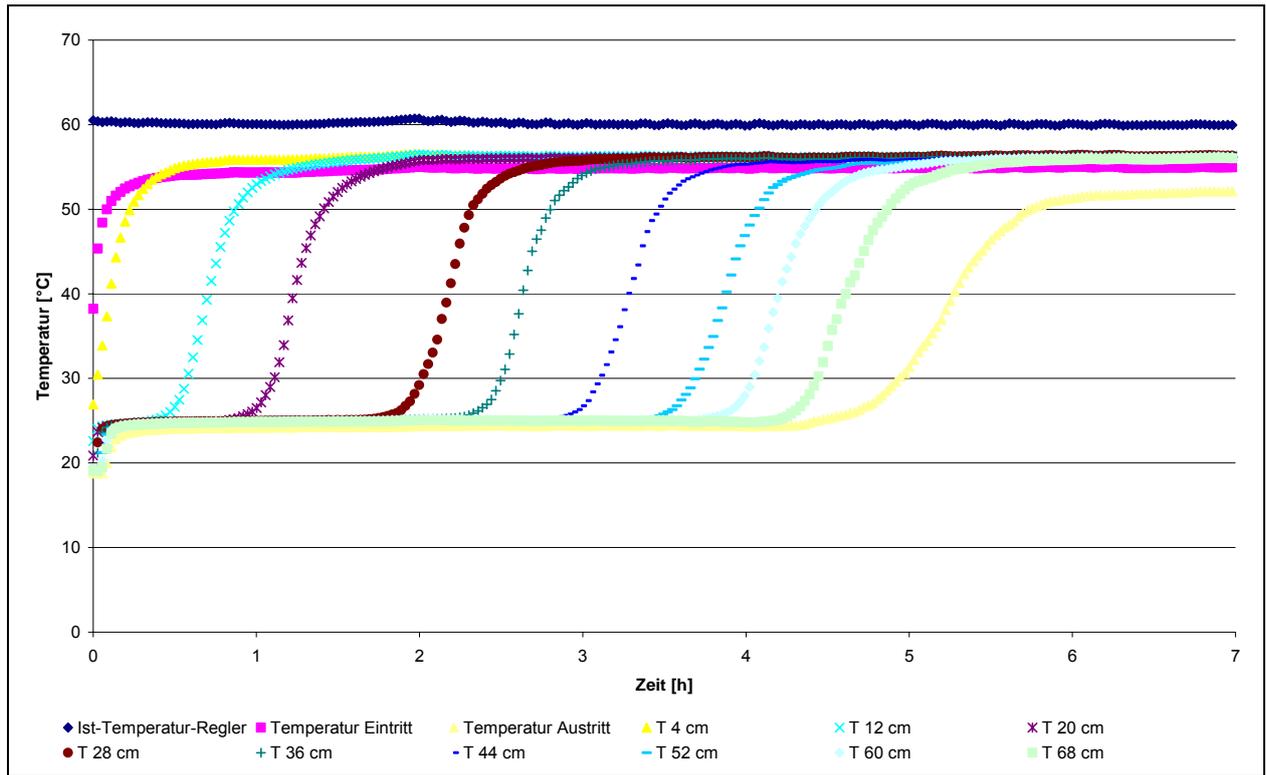


Abb. 74: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 27 (Partikelgrößenvariation)

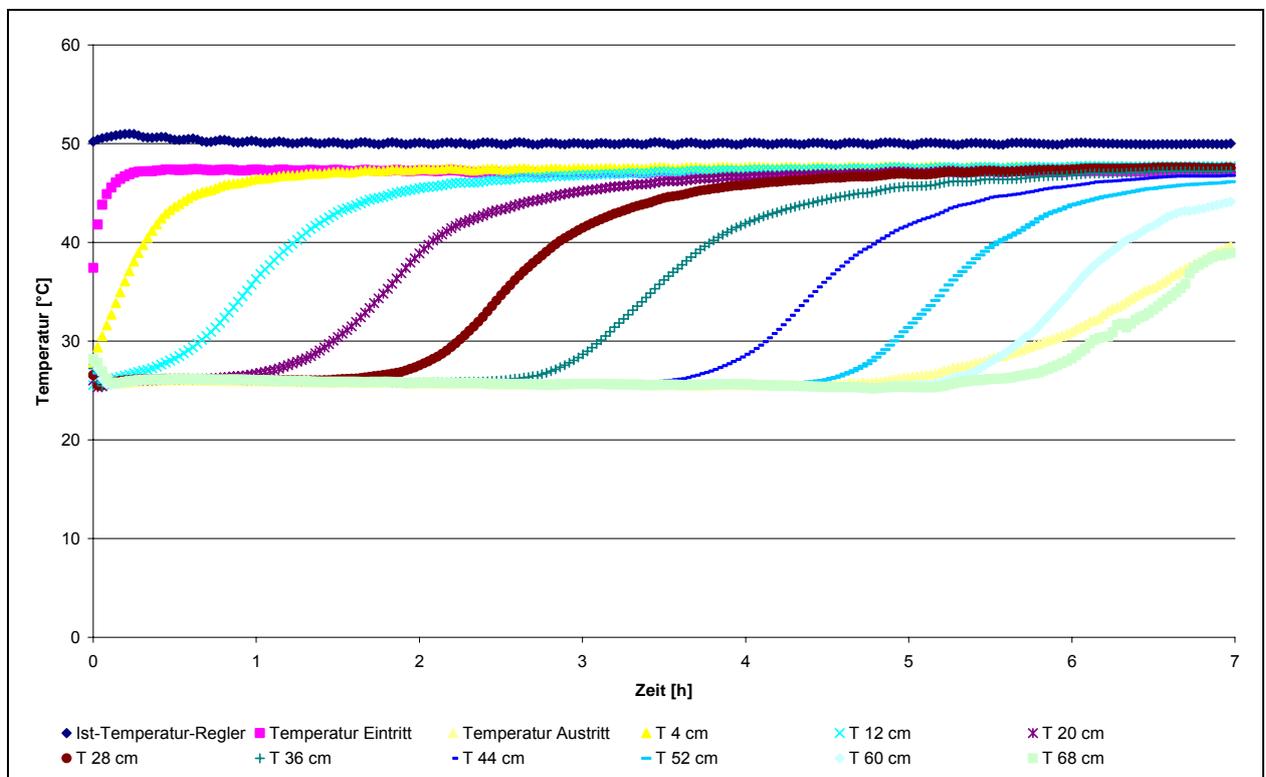


Abb. 75: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 28 (Temperaturvariation)

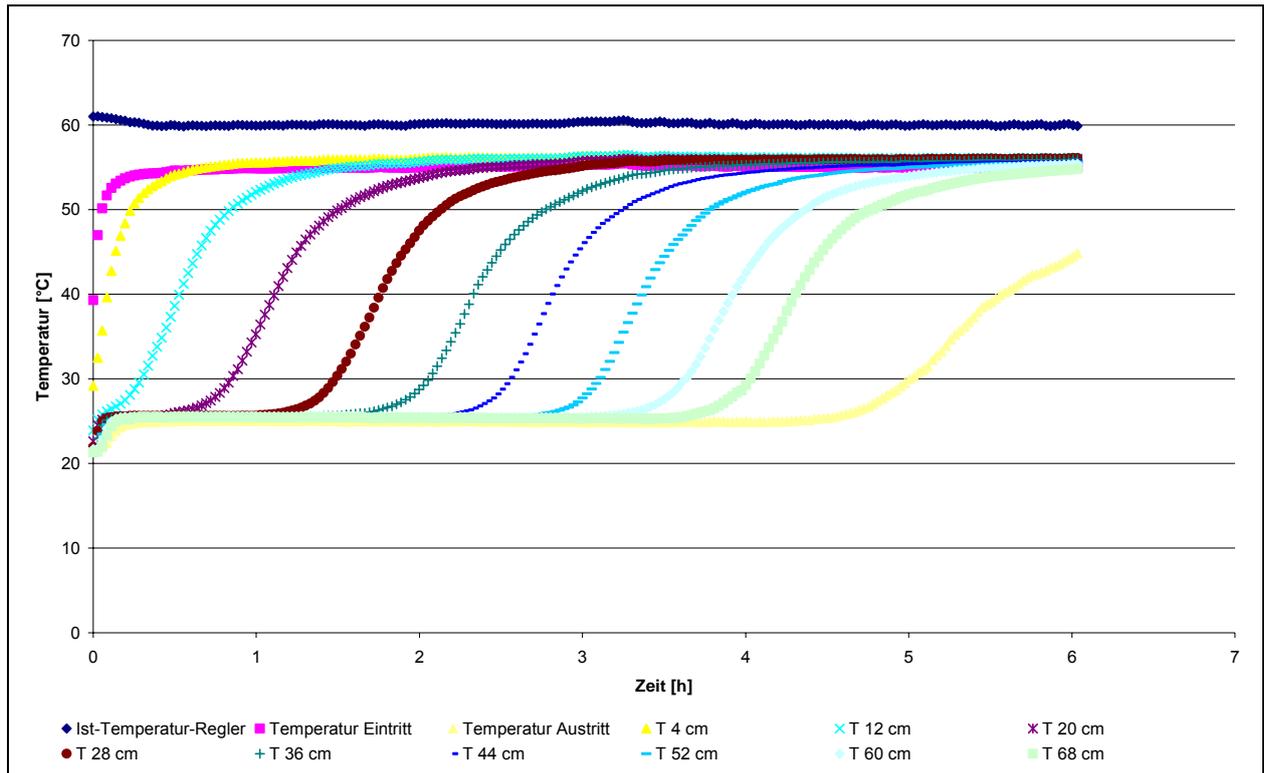


Abb. 76: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 29 (Temperaturvariation)

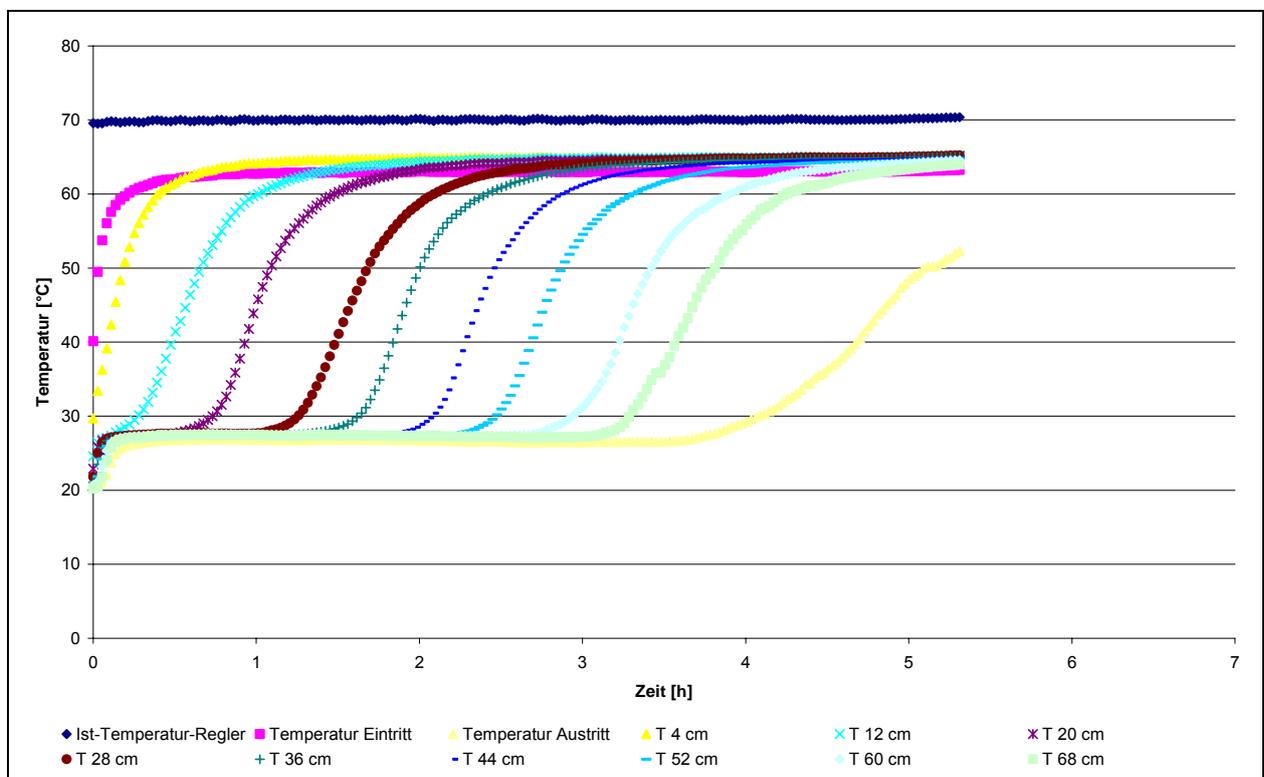


Abb. 77: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 30 (Temperaturvariation)

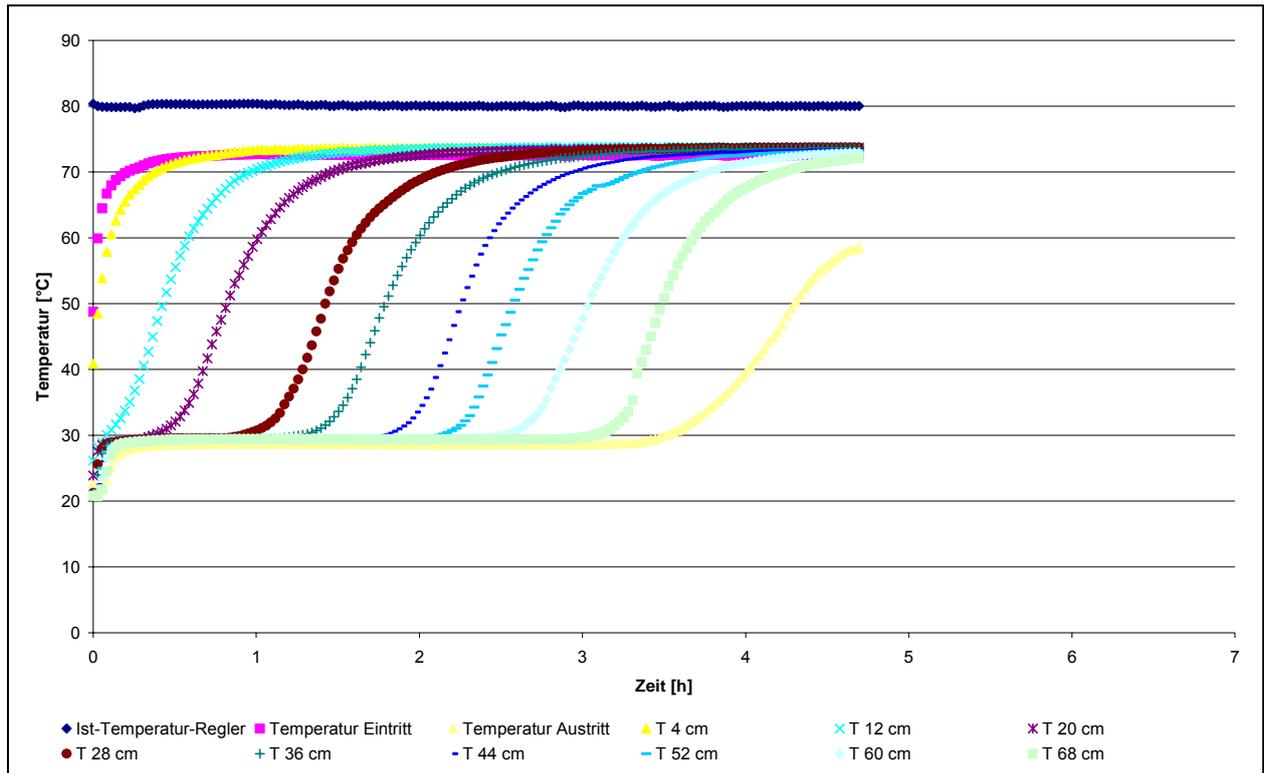


Abb. 78: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 31 (Temperaturvariation)

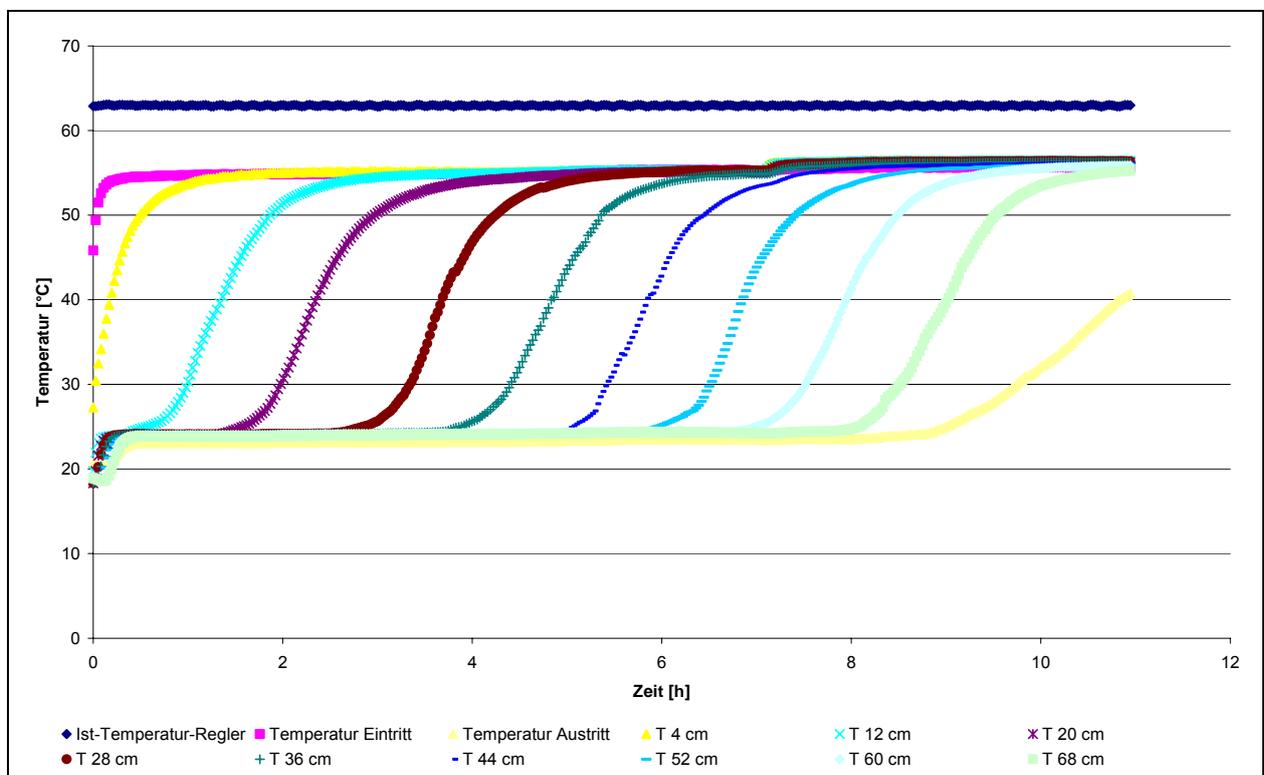


Abb. 79: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 32 (Geschwindigkeitsvariation)

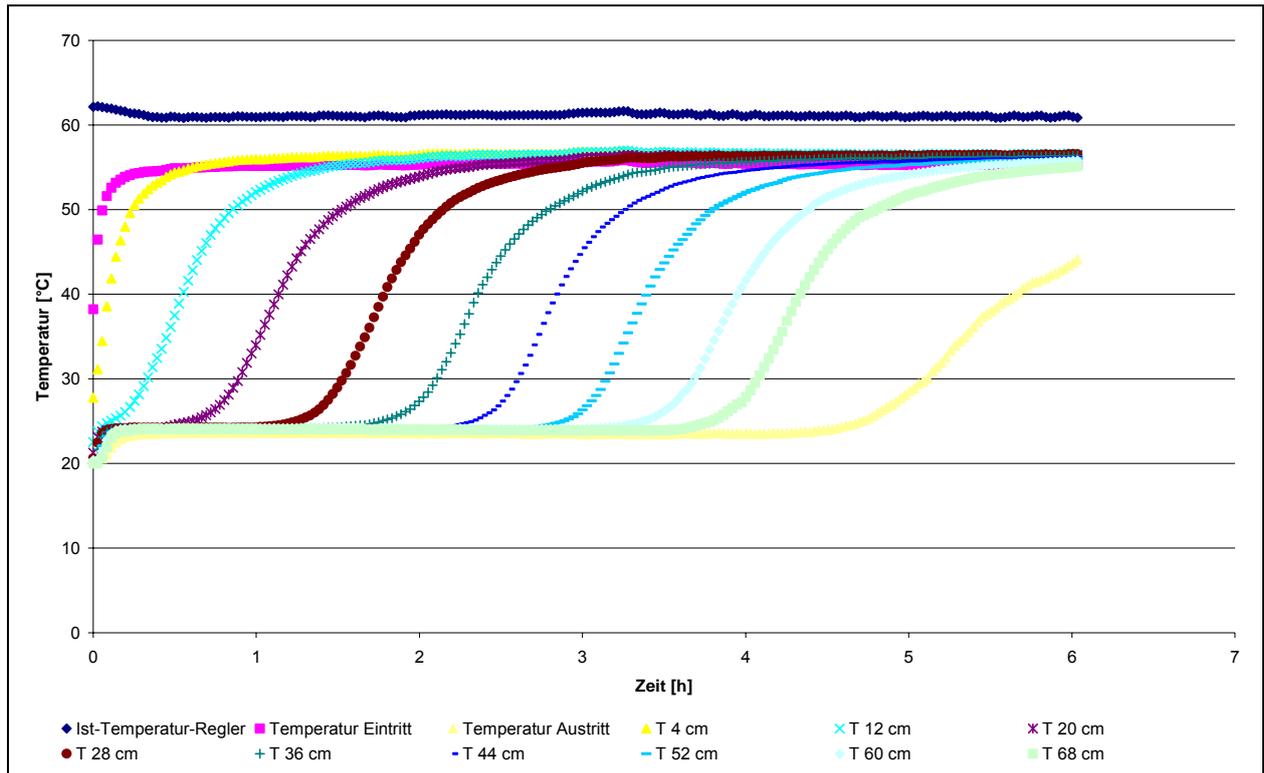


Abb. 80: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 33 (Geschwindigkeitsvariation)

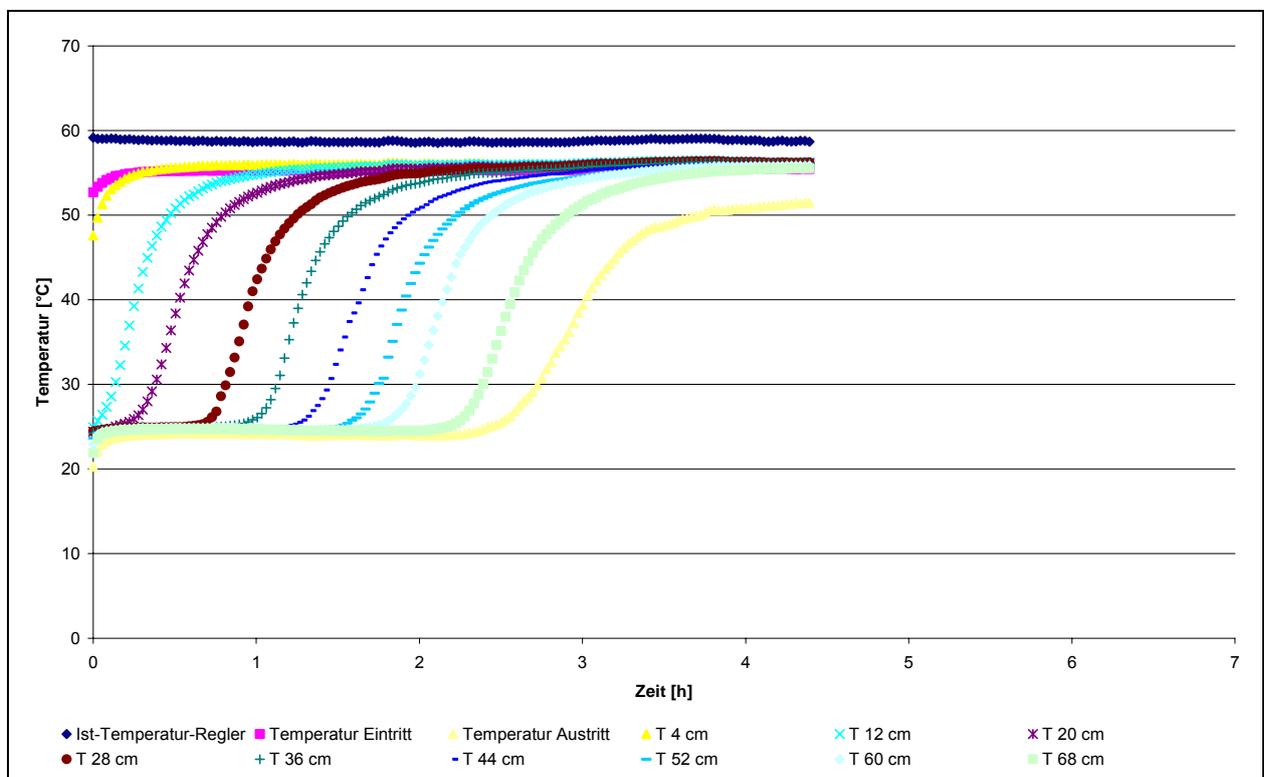


Abb. 81: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 34 (Geschwindigkeitsvariation)

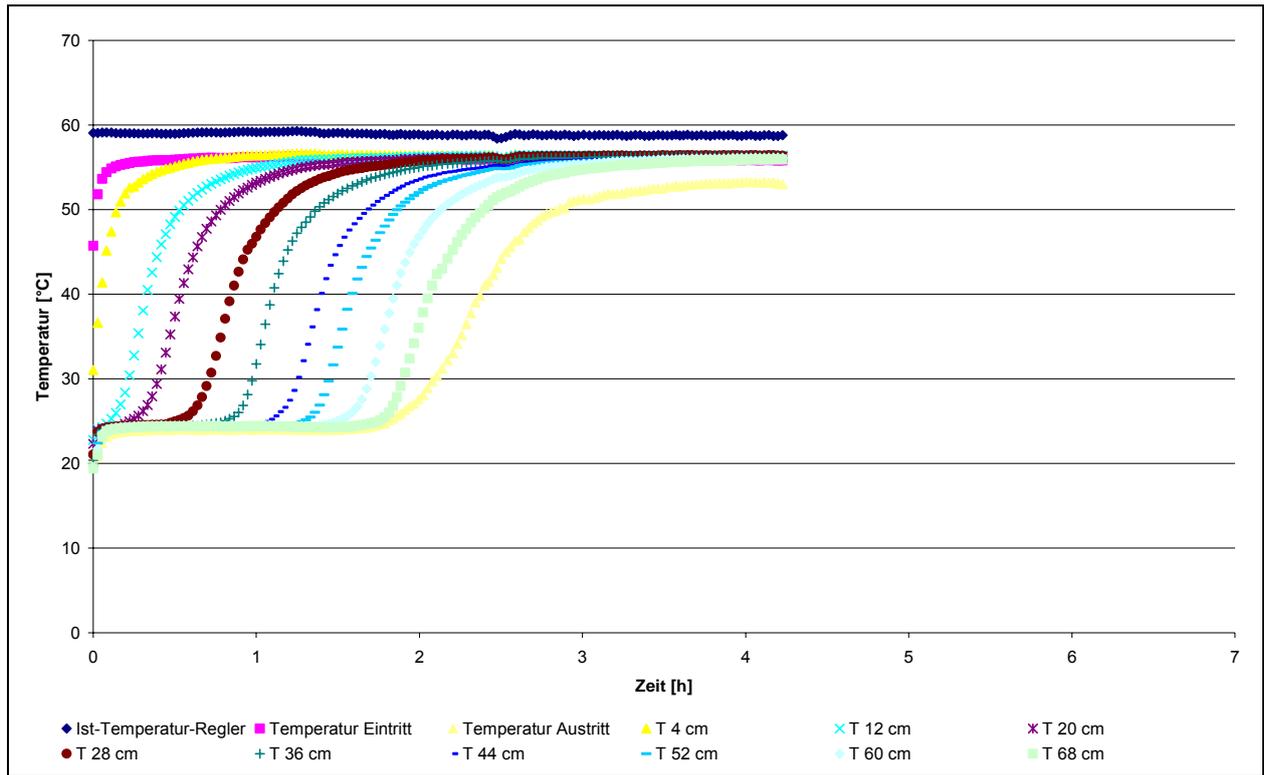


Abb. 82: Temperaturkurven in der Schüttung – Versuch Nr. 35 (Geschwindigkeitsvariation)