

NEUE ENERGIEN 2020

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Projektdaten

Kurztitel	OPTEHACK	
Langtitel	Optimierte Technische Hackguttrocknung auf Basis nachhaltiger Technologien - Grundlagen, Empfehlungen und Testanwendung	
Projektnummer	821904	
Programm / Programmlinie	Neue Energien 2020 2 Ausschreibung	
Antragsteller	Nahwärme Gleinstätten GmbH Projektleiter: DI(FH) DI Alois Kraußler (FH JOANNEUM)	
Projektpartner	- Fachhochschule JOANNEUM Gesellschaft mbH / Studiengang „Energie-, Verkehrs- und Umweltmanagement“ - Technisches Büro f. Chemie und Biotechnologie Theißing-Brauhart	
Projektstart u. - Dauer	Projektstart: 01.01.2010	Dauer: 24 Monate
Berichtszeitraum	von 01.01.2010 bis 31.12.2011	
Autoren	Kraußler A., Bischof W., Schwab T., Theißing-Brauhart I.	

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Aufgabenstellung	5
1.2	Schwerpunkte des Projektes	5
1.3	Einordnung in das Programm	6
1.3.1	Energiestrategische Ziele	6
1.3.2	Systembezogene Ziele	7
1.3.3	Technologiestrategische Ziele	8
1.3.4	Relevanz des Vorhabens	10
1.4	Verwendete Methoden	12
1.4.1	Phase 1: Entwicklung und Bau eines Labor-Versuchsaufbaues	12
1.4.2	Phase 2: Planung und Durchführung von Labor-Messungen	17
1.4.3	Phase 3: Aufbereitung / Auswertung, Analyse und Schlussfolgerungen der Labor-Ergebnisse	20
1.4.4	Phase 4: Verifizierung der Labor-Ergebnisse im Feldbetrieb	21
1.4.5	Phase 5: Analyse und Empfehlungen der sinnvollen Integration nachhaltig bereitgestellter Trocknungsenergie	22
1.4.6	Phase 6: Konsolidierung der Ergebnisse	23
1.5	Aufbau der Arbeit	24
2	Grundlagen	25
2.1	Begriffsdefinitionen	25
2.1.1	Wassergehalt / Brennstoff-Feuchte	25
2.1.2	Einfluss des Wassergehaltes auf den Heiz- und Brennwert	25
2.2	Grundlagen der Hackguttrocknung	26
2.2.1	Bindung von Wasser im Holz	26
2.2.2	Feuchtebewegung bei der Trocknung	26
2.2.3	Trocknungspotential von Luft	28
2.2.4	Wärme- und Stoffübergänge bei der Konvektionstrocknung	28
2.2.5	Trocknungsabschnitte	29
2.2.6	Thermodynamische Bewertungsgrößen	34
2.2.7	Regelung des Trockners	34
2.3	Trocknungsmethoden	36
2.3.1	Definition des Trocknens	36
2.3.2	Trocknungsverfahren	36
2.3.3	Stand der Technik: Trocknungsapparate im Allgemeinen	37
2.3.4	Gegenüberstellung ausgewählter Hackguttrocknungssysteme	42
2.4	Hackgutlogistik im Kontext der Hackguttrocknung	47
2.4.1	Transport	47

2.4.2	Hackgutmanipulation	48
3	Auswertungs- und Analyseergebnisse der Labormessungen.....	49
3.1	Darstellung der allgemeinen Trocknungscharakteristik	49
3.2	Verlauf der Temperatur und der relativen Luftfeuchte	50
3.3	Verlauf der Wasseraufnahme	52
3.4	Verlauf der mittleren relativen Luftfeuchte und des Hackgutwassergehalts	55
3.5	Verlauf des Wirkungsgrades der Trocknung	57
3.6	Vertikaler Trocknungsverlauf im Schüttgut	58
3.7	Auswertung der normierten Trocknungsversuche	60
3.7.1	Auswertung der Trocknungsversuche des Materials 1.....	60
3.7.2	Auswertung der Trocknungsversuche des Materials 2.....	65
3.7.3	Auswertung der Trocknungsversuche des Materials 3.....	70
3.8	Vergleich der normierten Trocknungsversuche	75
3.8.1	Vergleich der Trocknungsversuche bei 20 °C Trocknungslufttemperatur	76
3.8.2	Vergleich der Trocknungsversuche bei 40 °C Trocknungslufttemperatur	77
3.8.3	Zusammenfassung	79
3.9	Korrelationsanalyse	79
3.9.1	Trocknungsdauer	79
3.9.2	Wirkungsgrad	86
3.9.3	Zusammenfassung	92
3.10	Monitoring zur Steuerung der Trocknungsdauer	93
3.11	Zusammenfassung der Laborergebnisse.....	94
4	Auswertungs- und Analyseergebnisse der Feldmessungen.....	96
4.1	Beschreibung der zu untersuchenden Trocknungsanlage	96
4.2	Messaufbau	96
4.3	Auswertung der Messserien	97
4.3.1	Detaildarstellung der Feldmessung 1	98
4.3.2	Detaildarstellung der Feldmessung 9	104
4.4	Analyseergebnisse der Feldmessungen	108
5	Bereitstellung und Integration der Trocknungsenergie	110
5.1	Solarthermie	110
5.2	Abwärmenutzung zur Hackguttrocknung in einem Heizwerk	111
5.2.1	Örtliche Gegebenheiten.....	111
5.2.2	Temperaturniveau der Abwärmelieferung	111
5.2.3	Art der Abwärmelieferung	111
5.2.4	Abschätzung eines Potentials zur Wärmenutzung für die Hackguttrocknung am Beispiel eines Heizwerkes	111
5.2.5	Möglichkeiten zur Hackguttrocknung durch zusätzliche Wärmeerzeugung im Biomassekessel.....	113
6	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	116
6.1	Schlussfolgerungen hinsichtlich des Trocknungsbetrieb-Einflusses	116

Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

6.2	Schlussfolgerungen hinsichtlich des Material-Einflusses	118
6.3	Schlussfolgerungen hinsichtlich der sinnvollen Integration nachhaltig bereitgestellter Trocknungsenergie	119
7	Ausblick.....	120
8	Verzeichnisse	124
8.1	Literaturverzeichnis	124
8.2	Abbildungsverzeichnis.....	126
8.3	Tabellenverzeichnis	129
8.4	Formelverzeichnis	130

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Die Bedeutung von holzartigem Hackgut für die Raumwärme- und Gebrauchtwasserbereitstellung ist unumstritten. Aufgrund der stark heterogenen Eigenschaften des Rohproduktes Holz (unterschiedliche(r) Größenfraktionen, Feuchte, Heizwert, Aschengehalt, Verschmutzung, Zusammensetzung, etc.) und der daraus resultierenden Berücksichtigung im Feuerungs- und Fördersystem, ist eine Bereitstellung des Brennstoffes entsprechend der ÖNORM M 7133 (Holzhackgut für energetische Zwecke - Anforderungen und Prüfbestimmungen), insbesondere für den kleineren Leistungsbereich (Haushaltsgrößen, bis 50 kW), von besonderer Bedeutung. Ausgehend von dieser Problematik ist die Etablierung eines funktionierenden Hackgut-Marktes für Haushaltsgrößen äußerst schwierig, da Feuerungs- und Fördersysteme dieser Leistungen einen größeren Anspruch an eine homogene und definierte Brennstoffqualität stellen. Im kleineren Leistungsbereich ist v. a. die Feuchtigkeit (maximal 20-25 %) von besonderer Bedeutung, weshalb für diesen Einsatz das Hackgut getrocknet werden muss.

Eine Möglichkeit zur Trocknung der Hackschnitzel ist die Lagerung unter freiem Himmel. Eine Lagerung des Hackgutes ohne Abdeckung birgt allerdings wegen der Niederschläge in Form von Regen oder Schnee die Gefahr eines unnötigen Qualitätsverlustes des Hackgutes. Entsprechend negative Erfahrungen mit dieser Art der Lagerung wurden innerhalb unterschiedlicher Projekte bereits gemacht. Der mikrobielle Substanzabbau geht bei nassem Hackgut viel schneller vor sich als bei trockenem. Ein halbes Jahr nach der Ernte im März haben die Hackschnitzel immer noch einen hohen Wassergehalt, sind dunkel verfärbt und können nur zu einem sehr niedrigen Preis abgesetzt werden. Zusätzlich nimmt der Energiegehalt stark ab. Mit sinkendem Wassergehalt nimmt der Substanzverlust durch mikrobiellen Biomasseabbau ab, da die mikrobielle Aktivität gehemmt wird. Weitere Nachteile der natürlichen Trocknung sind die potenzielle Selbstentzündung (insbesondere bei größerem Rindenanteil) und das größere benötigte Lagervolumen. Weiters kann mit der natürlichen Trocknung ein Wassergehalt von unter 25 % nur schwer erreicht werden, wodurch beim Verbrennen von natürlich getrocknetem Hackgut auch größere Rauchgasmengen pro kWh erzeugter Energie entstehen.

Die natürliche Lufttrocknung hat daher viele Nachteile. Eine effiziente Alternative dazu wäre, Hackgut durch Fremdeinwirkung zu trocknen um den Brennstoff für den häuslichen und kleineren Gewerbebereich als sinnvollen Brennstoff etablieren zu können. Zwar ist dieser Vorgang energieintensiver, jedoch wird der Energieeinsatz durch die Vermeidung eines Abbaus des Energiegehaltes durch alternative natürliche Trocknung (teilweise) kompensiert. Eine solche Brennstoffaufwertung ist daher auch vom energetischen Gesichtspunkt sinnvoll.

Im Zusammenhang mit dieser technischen Hackguttrocknung, als Beitrag für einen homogenen Brennstoff definierter Qualität, gibt es jedoch kaum wissenschaftlich fundierte Grundlagen. Hierbei gibt es material- und betriebsbedingte Faktoren, welche berücksichtigt werden müssen.

1.2 Schwerpunkte des Projektes

Ausgehend von der dargestellten Ausgangssituation / Problemstellung verfolgt das vorliegende Projekt folgende Zielsetzungen:

- Relevante material- und betriebsbedingte Grundlagen im Zusammenhang mit einer sinnvollen Hackguttrocknung stehen zur Verfügung.

- Die Integrationsmöglichkeiten nachhaltig bereitgestellter Trocknungsenergie sind erhoben und analysiert.
- Sämtliche im Labor erhobenen Daten und Ergebnisse sind aufbereitet und auf Konsistenz überprüft.
- Die Anwendbarkeit und Signifikanz der erarbeiteten Daten und Ergebnisse wird durch eine beispielhafte Praxisanwendung bestätigt.
- Ausgehend von den erarbeiteten Ergebnissen werden Empfehlungen über eine nachhaltige Hackguttrocknung abgegeben.
- Sämtliche relevanten Projektergebnisse sind zielgruppenorientiert aufbereitet und stehen in übersichtlicher Form zur Verfügung.

1.3 Einordnung in das Programm

1.3.1 Energiestrategische Ziele

- Sicherstellung der Kriterien der Nachhaltigkeit: ökonomisch, ökologisch und sozial dauerhaft
 - In Bezug auf die ökologische Nachhaltigkeit werden folgende Ziele erreicht:
 - o Unterstützung des Einsatzes von holzartiger Biomasse, welche mit geringem Energieaufwand (z. B. im Vergleich zur Pelletsherstellung) vorrangig für den kleineren Leistungsbereich bereitgestellt werden kann.
 - o Nachhaltige Trocknungswärmezufuhr
 - o Optimierung des Energieeinsatzes zur Trocknung (Input-Output-Betrachtung)
 - o Ausnützung von kleineren Temperaturniveaus, insbesondere aus diversen Abwärmeprozessen, welche andernfalls ungenützt bleiben würden.
 - In Bezug auf die soziale Nachhaltigkeit werden folgende Ziele erreicht:
 - o Erhöhung der Akzeptanz von Hackgutanlagen im kleineren Leistungsbereich.
 - o Geringere Gesundheitsbelastung durch Pilz- und Schimmelbefall.
- Erhöhung der Ressourcen- und Energieeffizienz
 - o Erhöhung des Wirkungsgrades von Biomasseheizwerken.
 - o Sinnvolle Nutzung von Rauchgaskondensation am Biomasseheizwerk zur Hackguttrocknung.
 - o Nutzung von überschüssiger Wärme (überschüssige Solarenergie in den Sommermonaten, abwärmeproduzierende Prozesse insbesondere im Niedertemperaturbereich, etc.)
 - o Hackguttrocknung unter optimalen Energieaufwand
 - o Aufwertung des Brennstoffes Hackgut und dadurch höhere Ressourceneffizienz (nicht getrocknetes Hackgut verliert bei der Lagerung durch bio-chemische Vorgänge an Energiewert)
 - o Vermeidung / Reduktion des energetischen Abbaus bei natürlicher Trocknung und energetische Rechtfertigung der technischen Trocknung (durch Kompensation)

- o Längere Lebensdauer der Feuerungs- und Förderanlagen und dadurch Ressourcen- und Energieeinsparung
 - o Höherer Wirkungsgrad bei der Verbrennung (durch höheren Energiegehalt, höhere Verbrennungstemperaturen dadurch geringere Emissionen)
- Reduktion der Importabhängigkeit bei Energieträgern
 - o Direkte Substitution von fossil betriebenen (Klein-)feuerungsanlagen möglich:
 - Durch Marktaufbau von Hackgut
 - Durch Erhöhung der Benutzerfreundlichkeit indem ein Brennstoff garantierter Qualität bereit gestellt wird.
 - o Erhöhung der holartigen Biomasseverwertung insbesondere im Raumwärmebereich
 - o Unterstützung einer autarken Energieversorgung
- Aufbau und Sicherung langfristig klimaschützender Raum- und Wirtschaftsstrukturen
 - o Unterstützung beim Aufbau einer biomasse-solar basierenden Wirtschaftsstruktur insbesondere im Wärmebereich.
 - o Durch Forcierung des Nachhaltigkeitsgedankens werden klimaschützende Maßnahmen integriert.

1.3.2 Systembezogene Ziele

- Reduktion des Verbrauchs fossiler und nuklearer Energieträger
 - o Im Haushalts- und kleineren Gewerbebereich werden höchste Ansprüche an einen einfachen und zuverlässigen Betrieb der Feuerungs- und Fördersysteme gestellt. Dies ist bislang zu einem großen Anteil durch fossile Energieträger gewährleistet worden, aber auch Pellets kamen vermehrt zum Einsatz, wobei deren Herstellung energieintensiver ist und das Rohprodukt eine bestimmte Qualität aufweisen muss. Hackgut ist energieextensiver herzustellen und das Rohprodukt kann unterschiedlicher Qualität sein (Nutzung bislang unrentabler Holzarten möglich!). Jedoch ist eine Trocknung erforderlich. Durch Gewährleistung dieses Qualitätsparameters kommt diesem Brennstoff auch in besagtem Leistungs- und Einsatzbereich mehr Bedeutung zu, wodurch direkt fossile Energieträger substituiert werden.
- Erschließung von Ressourcen erneuerbarer Energieträger
 - o I. e. S. handelt es sich hierbei nicht um eine Erschließung von erneuerbaren Energieträgern, sondern um eine effizientere Nutzung (Verwendung überschüssiger Wärme / Energie, höherer Verbrennungswirkungsgrad, Vermeidung / Reduktion des energetischen Abbaus, etc.)
- Verbesserung der Umwandlungseffizienz
 - o Da in Zukunft mit einer vermehrten Hackguttrocknung zu rechnen ist, diese jedoch noch weitgehend unkontrolliert und unorganisiert erfolgt, wird die Umwandlungseffizienz von einem feuchten, energetisch ungeeigneteren Brennstoff in einen trockenen, höherwertigen Brennstoff anhand dieses Projektes stark verbessert.

- Herstellung einer Optionenvielfalt bei Technologien und Energieträgern
 - o Die Nutzungsmöglichkeiten von abwärmeproduzierenden Technologien / Prozesse (insbesondere im Niedrigtemperaturbereich) wird stark vergrößert.
 - o Durch Wahl des besser geeigneteren wärmebereitstellenden, regenerativen Energieträgers (direkte Sonnenenergie oder Biomasse), wird die Optionenvielfalt erhöht.
- Multiplizierbarkeit, Hebelwirkung und Signalwirkung
 - o Die Erkenntnisse können allgemein zur Hackguttrocknung herangezogen werden, wodurch ausgehend von der Referenzanlage mit multiplizierenden Effekten zu rechnen ist.
 - o Durch verbleibende Wertschöpfung (Biomasseproduktion, Technologie- und Know-how-Bereitstellung) in der Region kommt es zu einer Hebelwirkung.
 - o Die Referenzanlage kann nach Projektumsetzung als Vorzeigeprojekt angesehen werden und bewirkt eine große Signalwirkung.

1.3.3 Technologiestrategische Ziele

- Unterstützung von Innovationssprüngen
 - o Neue Vermarktungskonzepte für Hackgut im kleineren Leistungsbereich können entwickelt werden.
 - o Neue Integrationsmöglichkeiten nachhaltig bereitgestellter Trocknungswärme können umgesetzt werden.
 - o Innovative Hackguttrocknungstechnologie und –komponenten können entwickelt werden.
 - o Neue Systemlösungen für abwärmeproduzierende Prozesse können geschaffen werden (z. B. Ansiedlung einer Hackguttrocknungsanlage in unmittelbarer Nähe eines niedertemperatur-bereitstellenden Betriebes)
- Erhöhung des inländischen Wertschöpfungsanteils im Energiesystem
 - o Der inländische Wertschöpfungsanteil wird erhöht durch:
 - Biomasseproduktion
 - Technologieherstellung
 - Anlagenbau
 - Know-how-Transfer
 - Kein Geldmittelfluss ins Ausland in Bezug auf die Energiebeschaffung
- Forcierung von Kooperationen und Partnerschaften zwischen Wissenschaft und Wirtschaft
 - o Eine Forcierung von Kooperation zwischen Wissenschaft und Wirtschaft wird durch gegenständliches Projekt erreicht, da über die gesamte Projektlaufzeit eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Antragsteller, als Wirtschaftsteilnehmer, und den Projektpartnern, als Forschungseinrichtungen, besteht.

- o Weiters können auch durch diverse Folgeprojekte aufgrund dieser „Initialzündung“ weitere Partnerschaften aufrechterhalten werden bzw. sich neue Kooperationen ergeben (nicht zuletzt durch Ausnutzung der Innovationssprünge).
- Stärkung der Technologiekompetenz österreichischer Unternehmungen
 - o Österreich kann sich durch diese Projekt in der Vorreiterschaft in Bezug auf die Technologiekompetenz im Bereich der Biomasse und Solarenergie festigen und auch ausbauen.
 - Neue Systemlösungen und Integrationsmöglichkeiten erfordern eine fundierte Technologiekompetenz
 - Neue Trocknungsverfahren und –systeme können auf Basis bereits bestehender Erfahrungen aufbauen, wobei ein Know-how-Vorsprung entsteht und die Technologiekompetenz wiederum gestärkt wird.
- Verstärkung interdisziplinärer Kooperationen und des Systemdenkens
 - o Die Interdisziplinärität ergibt sich durch:
 - Betriebe im Zusammenhang mit erneuerbaren Energieträgern:
 - Biomasselogistik
 - Biomasseaufbereitung / Hackguttrocknung
 - Biomassetechnologie
 - Solartechnologie
 - Etc.
 - Konsumenten
 - Abwärme-Produzenten
- Verstärkung internationaler Kooperationen und Ausbau der internationalen Führungsrolle
 - o Internationale Kooperationen werden durch dieses Projekt nicht direkt ermöglicht.
 - o Ein Ausbau der internationalen Führungsrolle, insbesondere im Zusammenhang mit Biomasse-, Solar- und Abwärmetechnologie bzw. –Know-how wird durch dieses Projekt direkt gestärkt.
- Förderungen von Qualifikationen im Energie- und Klimaschutzbereich und Ausbau des Forschungsstandortes
 - o Dieses Projekt trägt durch seine Zielsetzungen direkt der Förderung von Qualifikationen im benannten Bereich sowie dem Ausbau des Forschungsstandortes Österreich bei.
- Generierung von Sekundärnutzen bzw. Spin Offs durch eine Technologie
 - o Durch Ausnutzung der möglichen Innovationssprünge im Zuge dieses Projektes können Spin Offs generiert werden.

1.3.4 Relevanz des Vorhabens

Die Relevanz dieses Vorhabens lässt sich von den Vorteilen von trockenem Hackgut ableiten:

1. Signifikante Wertsteigerung der Hackschnitzel
2. Geringere Transportkosten auf Grund des geringeren Gewichts (bezogen auf den Heizwert)
3. Optimaler Energiegewinn aus Biomasse
4. Verwertung bisher unrentabler Holzarten
5. Verbrennung in kleineren (Haushalts-)Anlagen wegen des höheren Heizwertes des Hackgutes
6. Förder- und feuerungstechnische Vorteile:
 - a. Geringere Anforderung an die Fördertechnik
 - b. Verlängerung der Lebenszeit des Ofens durch Vermeidung von Verschlackung
 - c. Weniger Luftüberschuss notwendig bei der Verbrennung
 - d. Weniger Emissionen bei der Verbrennung durch höhere Temperaturen
 - e. Durch höheren Energiegehalt besserer Wirkungsgrad der Heizanlage
7. Geringerer Pilz und Schimmelbefall des Lagerraums bzw. der Hackschnitzel und dadurch geringere gesundheitliche Belastung durch Pilzsporen.
8. Vermeidung / Reduktion des Energiegehalt- / Substanzabbaues

Für die Etablierung eines funktionierenden Hackgutmarktes für Haushalte und (Klein-)Gewerbe ist die Trocknung von besonderer Relevanz, da für den Hackguteinsatz im kleineren Leistungsbereich Hackgut bestimmter Feuchte zur Verfügung gestellt werden muss.

Für die Hackguttrocknung kann Niedertemperaturwärme eingesetzt werden. Für sämtliche Abwärme produzierenden Vorgänge hat daher die Hackguttrocknung großes Potenzial (insbesondere für dezentrale Anordnungen), wodurch z. B. diverse Speichertechnologien ersetzt werden können.

Das niedrige Temperaturniveau ist häufig der Grund für eine Nichtverwertbarkeit der Abwärme bei sehr vielen produzierenden Betrieben. Die Koppelung von Hackguttrocknungsanlagen an solche Anlagen ist daher eine günstige Option.

Derzeit gibt es vermehrt Anstrengungen Hackguttrocknungsanlagen österreichweit zu errichten, jedoch ist gänzlich unklar, wie das zu trocknende Hackgut sinnvoll beschaffen sein soll, und wie der Betrieb optimal erfolgen kann. Trocknungsvorgänge werden daher ohne fundiertes Hintergrundwissen betrieben. Versuche einen optimierten Prozess zu entwickeln sind derzeit gescheitert bzw. konnte es nicht nachvollzogen werden, weshalb bestimmte „Chargen“ schneller trocken werden als andere.

Dies begründet sich durch unterschiedliche Faktoren:

- Unterschiedliche Beschaffenheit der Trocknungsaußenluft, welche stets eine unterschiedliche Feuchtigkeit und Temperatur aufweist.
- Unterschiedliche Hackgutzusammensetzung.
- Variation der Betriebsweise.
- Etc.

Für solche Anlagen ist eine wissenschaftlich fundierte Datengrundlage von sehr großer Relevanz.

Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

Eine weitere Bedeutung des Vorhabens besteht durch die Integrationsbetrachtung regenerativer Trocknungsenergie. Zum einen ist dies im Sinne eines nachhaltigen Energiesystems sehr sinnvoll und zum anderen führt dies zu einer Optimierung von Wärmebereitstellungssystemen:

- Gewährleistung eines konstanten Heizwerkbetriebes im Jahresverlauf (Erhöhung des Wirkungsgrades!)
- Sinnvolle Verwendung von etwaigem Überangebot
 - Nutzung etwaigen Überangebotes an Solarenergie im Sommer.
 - Integration von (regenerativer) Abwärme, insbesondere des Niedertemperaturbereiches.
- Wirkungsgraderhöhung
- etc.

Daher ist diese Betrachtung auch für Wärmeversorger von besonderer Relevanz.

Das Projekt hat für folgende Zielgruppe höchste Relevanz:

- Betriebe und Vereinigungen zur Bereitstellung von Biomasse / Hackgut (Land- und Forstwirte, Waldverband, etc.)
- Dienstleistungsbetriebe im Zusammenhang mit Biomasse und Solarenergie (Planer, Lieferanten, Aufbereitung, Hackguttrocknung, etc.)
- Hersteller von Technologie sowie Know-how-Träger im Zusammenhang mit der Nutzung von Biomasse und Solarthermie sowie Hackguttrocknung
- Abwärmeproduzenten (insbesondere des Niedertemperaturbereiches)
- F&E-Institutionen
- Regionale / kommunale Entscheidungsträger
- Interessensvertretungen (z. B. Land- und Forstwirtschaftskammer)

Einsatzmöglichkeiten der Projektergebnisse

- Einsatz in Biomasseheizwerken
- Verwertung bei Prozessen, welche Abwärme, sonstige Niedertemperatur- und Überschusswärme produzieren
- Verwertung der Ergebnisse bei bestehenden Hackguttrocknungsanlagen
- Verwertung bei der Konzeption nachhaltiger Wärmesysteme (insbesondere bei solarintegrierenden Anlagen)

Nutzen des Projektes

- Sicherstellung entsprechender Hackgutqualität
- Aufwertung des Brennstoffes Hackgut (insbesondere durch Nutzung bisher unrentabler Holzarten)
- Verringerung der energiespezifischen Transportkosten des ohnehin energie-intensiveren Transportes von Biomasse (aufgrund der geringen Energiedichte im Vergleich zu fossilen Energieträgern)
- Erhöhung der Benutzerfreundlichkeit für den Konsumenten

- Erhöhung der Hackgutqualität (Wertsteigerung)
- Erhöhung der Akzeptanz von Hackgut im kleinen Leistungsbereich
- Förder- und feuerungstechnische Vorteile (geringere Anforderung an die Fördertechnik, längere Lebenszeit des Feuerungssystems, höhere Verbrennungstemperaturen, weniger Emissionen, besserer Wirkungsgrad, etc.)
- Unterstützung beim Aufbau eines Hackgutmarktes für Haushalte und (Klein-)Gewerbe
- Optimierung von bestehenden Hackguttrocknungsanlagen
- Vermeidung / Reduktion des Energiegehaltabbaues
- Geringere gesundheitliche Auswirkungen durch den unvermeidlichen Pilz- und Schimmelbefall bei natürlicher Trocknung
- Integrationsmöglichkeit überschüssiger Wärme (insbesondere der Niedertemperaturwärme)

1.4 Verwendete Methoden

1.4.1 Phase 1: Entwicklung und Bau eines Labor-Versuchsaufbaues

Diese Projektphase gliedert sich in folgende methodische Einzelschritte:

- a. Recherche und Evaluierung geeigneter Trocknungsverfahren bzw. –technologien.
- b. Identifikation eines repräsentativen Trocknungsverfahrens.
- c. Entwicklung und Bau des Versuchsaufbaues zur Simulation des identifizierten Trocknungsverfahrens entsprechend nachfolgenden Anforderungen an den Versuchsaufbau:
 - i. Der Aufbau entspricht den realen Bedingungen, wobei nur ein (isolierter) Teilbereich betrachtet werden soll.
 - ii. Der Trocknungsluftmassenstrom ist variierbar.
 - iii. Unterschiedliche Hackgutfraktionen können problemlos eingesetzt werden.
 - iv. Der Wasserverlust kann online bestimmt werden.
 - v. Durch entsprechende Messvorrichtungen ist der Trocknungsvorgang auch an unterschiedlichen Messstellen online erfassbar (zur Bestimmung der Trocknungsgradienten im Schütthaufen).

Ziele dieser Phase:

- Geeignete Trocknungsverfahren sind erhoben und evaluiert.
- Ein repräsentatives Trocknungsverfahren ist identifiziert.
- Ein Testaufbau ist geplant / entwickelt.
- Ein Testaufbau ist gebaut.
- Realistische Zustände sind simulierbar.
- Relevante Parameter / Teilkomponenten sind variierbar / veränderbar.
- Eine Online-Messung der Feuchte ist möglich.

Inhalt und Beschreibung:

Im Rahmen dieser Projektphase wurde ein Labor-Versuchsaufbau erstellt und dessen Einsatz durch Testanwendungen auf seine Tauglichkeit / seine Praxisrelevanz verifiziert.

Zuerst wurden sämtliche relevanten Trocknungsverfahren bzw. –technologien erhoben und evaluiert. Auf Basis dieses Wissenstandes erfolgte eine Identifikation eines repräsentativen und geeigneten Trocknungsverfahrens, welches simuliert wurde.

Der Testaufbau sollte realistischen Zuständen entsprechen, um aussagekräftige Ergebnisse erzielen zu können. Weiters sollten sämtliche betriebsbedingten Einflussfaktoren auf die Trocknung variierbar sein, damit unterschiedliche Zustände simuliert werden konnten (Rost, Luftmassenstrom, Leuchteuchte, etc.).

Durch diesen Testaufbau konnten rasch, einfach und unter geringen Kosten praxisrelevante Ergebnisse erzielt werden, welche im Feldbetrieb nicht mit diesem Ressourceneinsatz gewährleistet werden hätten können. Anhand einer entsprechenden Anzahl an Testserien konnten signifikante Ergebnisse erzielt werden.

Kurz-Beschreibung der Methodik:

Recherche und Evaluierung geeigneter Trocknungsverfahren bzw. -technologien, Identifikation eines geeigneten Trocknungsverfahrens, Recherche über zu berücksichtigende Faktoren (Normen, Empfehlungen etc.), Planung und Entwicklung des Versuchsaufbaues entsprechend den Anforderungen, Bau des Versuchsaufbaus, diverse Testanwendungen und Verifizierung des Aufbaues.

1.4.1.1 Beschreibung der Versuchsanlage

Wahl und Bau der Versuchsanlage

Anhand der Literaturrecherche zeigt sich, dass für die Trocknung von Hackgut hauptsächlich Rosttrockner zum Einsatz kommen. Dies liegt in der einfachen und daher kostengünstigen Bauweise dieser Trockner auch wenn andere Trocknungsarten (z.B. Durchlauftrockner) eine gleichmäßigere und schnellere Trocknung ermöglichen. Für den Laboraufbau wurde ein Ventilatorbelüfteter-Durchström- Behältertrockner entwickelt, der die großtechnische Rosttrocknung bestmöglich abbildet. Bei dieser Art der Trocknung handelt es sich um eine Konvektionstrocknung. Dies bedeutet, dass die notwendige Trocknungsenergie für das Hackgut aus einem vorbeiströmenden Fluid (erwärmte Luft) bereit gestellt wird. Die Vorgänge der Wärme- und Stoffübertragung bei der Konvektionstrocknung sind hinreichend erforscht und bekannt [Kröll & Kast, 1989; Krischer & Kast, 1992].

Das geeignete Trocknungsverfahren im Pilotmaßstab erfüllt folgende Anforderungen:

- a) Der Aufbau entspricht den realen Bedingungen, wobei ein (isolierter) Teilbereich betrachtet wird:
 - 1. Repräsentative Anlagengröße (Anlagendesign)
 - 2. Repräsentative Betriebsbedingungen
- b) Aufzeichnung und Steuerung: Durch entsprechende Messtechnik (z. B. Feuchte-, Temperatursensoren) kann der Trocknungsvorgang auch an unterschiedlichen Messstellen online erfasst werden (zur Bestimmung der Trocknungsgradienten im Schütthaufen).
- c) Variation der Anlagenparameter sowie Möglichkeit zur Adaptierung (Betriebsdesign)
 - 1. Die Trocknungslufttemperatur ist variierbar.
 - 2. Der Trocknungsluftmassenstrom ist variierbar.
 - 3. Der Trocknungsrost, die Lufteinbringung und Schüttung können variiert werden
 - 4. Unterschiedliche Hackgutfraktionen können problemlos eingesetzt werden.

1.4.1.2 Anlagendesign der Versuchsanlage

Die Anlagengröße soll so gewählt werden, dass der Aufbau möglichst den realistischen Zuständen der Trocknung im Heizwerk entspricht, aber dennoch eine einfache Handhabung der Versuchsanlage gewährleistet ist. Da es im Labor nicht möglich ist eine gesamte Hackgutschüttung zu simulieren, wurde der Versuchsaufbau dahingehend ausgelegt, dass ein Volumensegment der Hackgutschüttung dargestellt wird um vor allem die unterschiedlichen Trocknungsschichten erkennen zu können. Aufgrund dessen ergibt sich ein Anlagendesign in der Form eines Quaders. Die Breite der Versuchsanlage wurde so gewählt, dass sie im Verhältnis zur Höhe eine typische Beschickung der Trocknungsbox des Heizwerkes darstellt. Die Tiefe der Versuchsanlage wurde so gewählt, dass in der Mitte der Schüttung ein Bereich vorhanden ist, in dem keine Beeinflussung durch die Wände der Trocknungsanlage zu erwarten ist. Aufgrund dieser Überlegungen ergibt sich eine Größe der Trocknungsbox von 200 x 100 x 30 cm (H x B x T). An der Unterseite der Trocknungsbox wird ein 40 cm hoher Bereich zum Einblasen der Trocknungsluft freigelassen. Dieser Bereich wird durch ein Lochblech abgeschlossen, durch welches die Luft in das Hackgut strömt. Die Oberseite der Trocknungsbox verläuft konisch um einen Anschluss der Abluftleitung gewährleisten zu können, damit für Bilanzierungen ein geschlossenes System bereitgestellt werden kann. Daher ergeben sich für den Prüfraum Abmessungen von 160 x 100 x 30 cm. Dies entspricht einem maximalen Prüfvolumen von 480 l bzw. 0,48 m³. Die Vorderseite der Trocknungsbox ist mit einer schwenkbaren Tür und einer Plexiglasscheibe ausgestattet. Durch die Plexiglasscheibe kann die Schüttung während des gesamten Trocknungsprozesses beobachtet werden. Nachfolgend ist in Abbildung 1-1 die Versuchsanlage dargestellt.

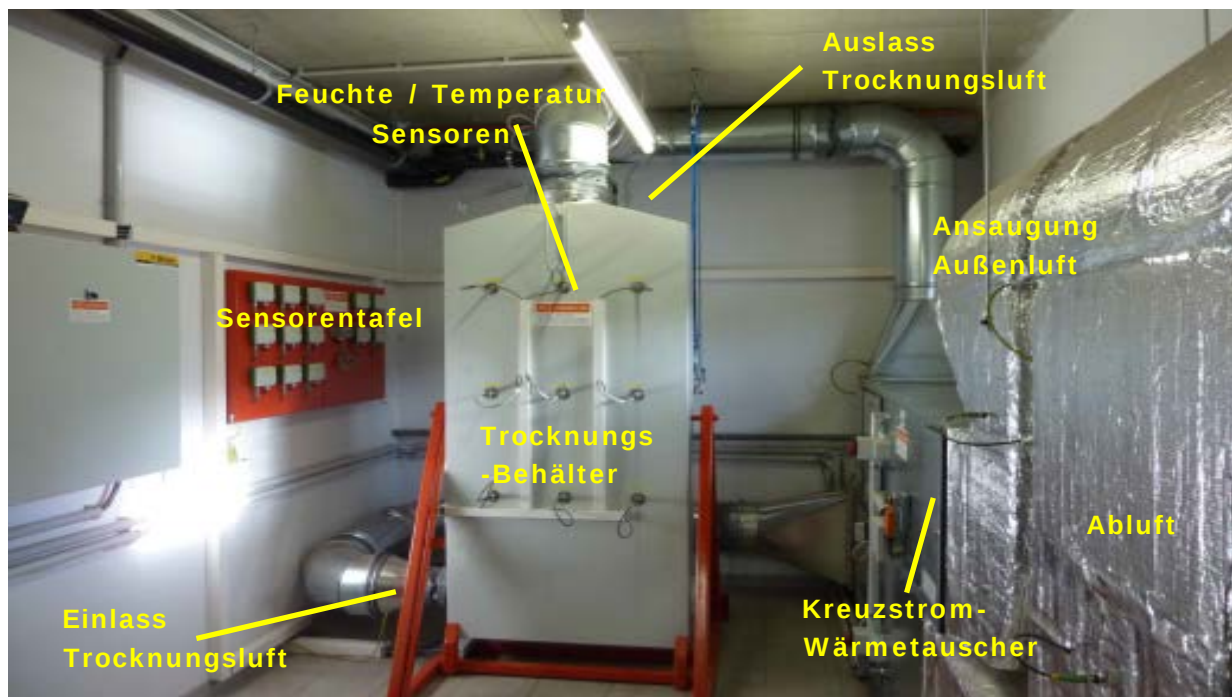


Abbildung 1-1 Versuchsanlage

Quelle: [eigene Darstellung]

In Abbildung 1-2 wird das Schemabild des Laboraufbaus / der Versuchsanlage dargestellt. Die Frischluft wird hierbei über einen Feuchte- und Temperaturfühler (F/T 10) und einen Filter (schützt den Wärmetauscher sowie die Anlage vor Verschmutzungen) geführt, ehe sie anschließend im Kreuzstromwärmetauscher von der Abluft vorgewärmt und vom Heizregister auf die eingestellte Temperatur aufgeheizt wird. Danach wird die Luft vom Zuluftgebläse über einen weiteren F/T-

Sensor (F/T 11) sowie über die Durchflussmessung in den Trocknungsbehälter gepresst. Im Trocknungsbehälter sind 9 F/T-Sensoren (von F/T 0 bis F/T 8) in drei Sensorreihen gleichmäßig verteilt, damit der Trocknungsverlauf über den Schüttquerschnitt verfolgt werden kann. Der Trocknungsbehälter befindet sich auf 4 Wägezellen, welche eine Online-Betrachtung des Trocknungsverlaufes ermöglichen, indem die Gewichtsabnahme dargestellt wird. Die Abluft aus dem Trocknungsbehälter wird vom Abluftgebläse über einen weiteren F/T-Sensor (F/T 9), einen Filter und dem Wärmetauscher angesaugt. Über einen weiteren F/T-Sensor (F/T 12) gelangt die Abluft ins Freie.

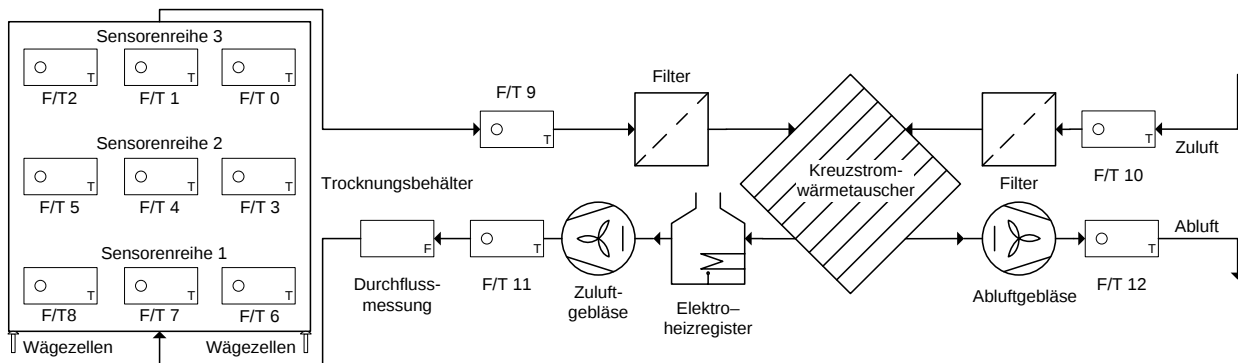


Abbildung 1-2 Schemabild des Laboraufbaus

Quelle: [eigene Darstellung]

1.4.1.3 Aufzeichnungsparameter und Steuerung der Versuchsanlage

Die gesamte Steuerung der Anlage sowie die Datenaufzeichnung werden über eine in LabView-programmierte Software realisiert. In diesem Programm laufen alle Daten der Messtechnik zusammen und werden auf dem Bildschirm in übersichtlicher Form dargestellt. In einer Eingabemaske des Programms können die jeweiligen Informationen für den Versuchsdurchlauf eingegeben werden. Für die Steuerung der Ventilatoren im Klimagerät werden zwei Wechselrichter eingesetzt. Einerseits ist dadurch ein langsames Anlaufen der Ventilatoren gegeben und andererseits kann dadurch die Leistung stufenlos zwischen 50 und 100 % geregelt werden. Das Heizregister wird über Halbleiterrelais mittels einer Pulserregelung gesteuert.

Folgende Parameter werden messtechnisch erfasst und online aufgezeichnet:

- Temperatur und rel. Feuchte der Zuluft: Die Temperatur und Feuchte der Zuluft wird nach dem Einlass und noch vor dem Filter und Ventilator mit einem Sensor gemessen.
- Temperatur und Feuchte der Trocknungsluft unmittelbar vor dem Trocknungsprozess: Die Temperatur der Trocknungsluft wird nach dem Wärmetauscher, nach dem Heizregister und dem Ventilator in der Zuleitung (Edelstahl DN 300) zur Trocknungsbox mit einem Sensor gemessen.
- Temperatur und Feuchte in der Trocknungsbox: In der Trocknungsbox sind insgesamt neun Sensoren zur Bestimmung der Temperatur und Feuchte der Luft in den Materialzwischenräumen angebracht. Diese sind auf 3 Ebenen mit jeweils 3 Sensoren aufgeteilt. Die erste Sensorebene ist in einem Abstand von 30 cm nach dem Rost angebracht. Die zwei weiteren Reihen folgen mit einem Abstand von jeweils 50 cm.
- Temperatur und Feuchte der Trocknungsluft unmittelbar nach dem Trocknungsprozess: Die Temperatur und Feuchte der Abluft aus der Trocknungsbox wird mit einem Sensor in der Rückleitung vor dem Ventilator und dem Wärmetauscher gemessen.

- Temperatur und Feuchte der Abluft: Des Weiteren wird von einem Sensor auch die Temperatur und Feuchte der an die Umwelt abgegebenen Abluft nach dem Ventilator und dem Wärmetauscher gemessen.
- Massenstrom der Trocknungsluft: Der Massenstrom der Trocknungsluft wird im Edelstahlrohr DN300 gemessen, das sich zwischen dem Klimagerät und der Trocknungsbox befindet. Die Messung erfolgt mittels Heißfilm-Sensorelement und ermöglicht daher eine sehr genau Messung der Strömungsgeschwindigkeit. Des Weiteren wird mit diesem Sensor nochmals die Temperatur der Trocknungsluft gemessen.
- Nettogewicht des Hackguts: Um das Nettogewicht des Hackguts feststellen zu können, wird der gesamte Versuchsaufbau kontinuierlich über vier Wägezellen gewogen und das Leergewicht des Versuchsaufbaus vom Gesamtgewicht abgezogen. Dadurch ist es möglich das Gewicht der eingefüllten Hackschnitzel sowie den Wasserverlust über die Dauer des Versuches darzustellen.

1.4.1.4 Betriebsdesign / Betriebsbedingungen der Versuchsanlage

Für eine realistische Nachbildung des Trocknungsverfahren sind repräsentative Betriebsbedingungen erforderlich (z. B. richtige Dimensionierung der Gebläseleistung und der Heizleistung). Da am Standort der Laboranlage keine Abwärmequelle zur Verfügung steht, wird Außenluft angesaugt und über einen Wärmetauscher sowie ein Heizregister auf das notwendige Temperaturniveau gebracht. Die maximale Temperatur der Trocknungsluft beträgt etwa 60 °C, da dies dem typischen Temperaturniveau von Abwärme entspricht, die in Trocknungsanlagen von Heizwerken genutzt wird. Für die Dimensionierung des Massenstromes wurde einerseits auf bekannte Literaturwerte für die Trocknung von Schüttgütern sowie auf die Trocknung von Heu zurückgegriffen. Um über eine gewisse Leistungsreserve verfügen zu können, wurde die Anlage leicht überdimensioniert und auf eine maximale Pressung von etwa 1.400 Pa ausgelegt. Dies bedeutet, dass ein maximaler Gegendruck von 1.400 Pa überwunden werden kann.

Nachfolgend sind in Tabelle 1-1 die möglichen Betriebsbedingungen bzw. Verstellmöglichkeiten dargestellt.

Tabelle 1-1 Parameter und Verstellbereiche der Trocknungsanlage

Parameter	Verstellbereich	Anmerkung
Temperatur der Trocknungsluft	Außenluft – 60 °C	Die Temperatur der Trocknungsluft kann stufenlos zwischen der Außenlufttemperatur und etwa 60° variiert werden.
Rel. Feuchte der Trocknungsluft	--	Die relative Luftfeuchte kann nicht aktiv geregelt werden, sondern ändert sich nur durch die Temperaturerhöhung der angesaugten Außenluft.
Luftmassenstrom	bis 2.000 m ³ /h	Der Luftmassenstrom kann maximal 2.000 m ³ /h betragen. Dieser Wert gilt jedoch für die leere Trocknungsbox. Der tatsächliche Luftmassenstrom ist vom Widerstand des Schüttgutes abhängig.
Trocknungsrost	Fläche	Der Trocknungsrost besteht aus einem Lochblech und kann durch Verschließen/Öffnen von Löchern verändert werden.
Lufteinbringung	Strömungsart	Die Strömungsverhältnisse der eingebrachten Trocknungsluft können durch Prallbleche verändert werden.
Schüttung	Schütthöhe	Da die Sensoren in verschiedenen Höhen angebracht sind, kann die Schütthöhe zwischen diesen variiert werden.

1.4.2 Phase 2: Planung und Durchführung von Labor-Messungen

Ziele dieser Phase:

- Die Labor-Messungen sind geplant
- Die Labor-Messungen sind durchgeführt.
- Der Feuchtigkeitsgehalt diverser Probenentnahmen ist bestimmt.

Inhalt und Beschreibung:

Zur effizienten Gestaltung der Labor-Messungen erfolgte zuerst eine Planung des Versuchsdesigns. Hierbei sind Hackgutanolieferung, -lagerung, -menge, und –zusammensetzung zu berücksichtigen. Nach erfolgter Planung wurden die Testserien gestartet. Hierbei wurde für jede Testserie eine entsprechende Anzahl an Durchgängen durchgeführt. Vor und nach jedem Testlauf wurden Hackgutproben entnommen, welche auf deren Wassergehalt untersucht wurden.

Im Rahmen der Planung des Versuchsdesigns wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- i. Hackgutanolieferung
- ii. Hackgutlagerung (voraussichtlich im Container)
- iii. Hackgutmenge
- iv. Hackgutzusammensetzung (nach Fraktionen, Feuchte, Weich-/Hartholz u. Alter)

Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- i. Signifikante Testlaufanzahl
- ii. Entnahme von Proben

Ad Hackgutlagerung

Für die Anlieferung und Lagerung des Hackgutes ist es von großer Bedeutung, dass sich die Eigenschaften des Hackguts während der Lagerung nicht verändern, damit ein möglichst gleichwertiges Ausgangsmaterial zur Verfügung steht. Es hat sich gezeigt, dass sich der Wassergehalt von Hackgut, das in Plastiksäcken luftdicht verschlossen ist und dunkel sowie trocken gelagert wird, für die Versuchsdurchführung nicht signifikant verändert. Daher wurden die Hackschnitzel in 80 l-Säcke luftdicht verpackt und bis zu Verwendung kühl zwischengelagert.

Kurz-Beschreibung der Methodik:

Planung des Versuchsdesigns, Durchführen der Testserien, Probenentnahmen u. Feuchtigkeitsbestimmung.

Ad Versuchsdurchführung:

Die Trocknung wird automatisiert ausgeführt, wobei nach Unterschreiten der eingestellten Feuchte der Versuch selbständig beendet wird. Die Trocknungsdauer der Versuche wird hierbei über die von den Temperatur- und Feuchte-Sensoren gemessenen Werten festgelegt. Dies bedeutet, dass der Versuch beendet ist sobald an allen Sensoren eine zuvor eingestellte Feuchte unterschritten wurde. Danach wurden an festgelegten Stellen Proben zur Bestimmung des Wassergehaltes im Trocknungsofen gezogen. Dadurch kann der tatsächliche Wassergehalt des Materials bestimmt werden.

Bei den Versuchsserien wird zwischen Grundlagen- und Spezialversuchen unterschieden, welche auf einem vorgegebenen Trocknungsplan samt vorgegebenen Parametern basieren.

Die Grundlagenversuche sollen einen Aufschluss über das typische Trocknungsverhalten von Hackgut unter verschiedenen Bedingungen aufzeigen. Hierbei werden die Korngrößen, die Trocknungslufttemperatur (somit auch die relative Luftfeuchte der Trocknungsluft) sowie der Luftmassenstrom variiert. Für die Grundlagenversuche wird auf einen durchschnittlichen Wassergehalt von 25% getrocknet.

Nach der Durchführung und Auswertung der Grundlagenversuche sind die typische Trocknungscharakteristik sowie die Einflüsse bei der Trocknung identifiziert. In weiterführenden Versuchen erfolgt im Anschluss eine Optimierung der Trocknung. Hierbei werden ausgewählte Trocknungsverläufe betrachtet und das Material wird auf einen vorher definierten Gesamtwassergehalt getrocknet. So wurden die Versuchsserien mit unterschiedlicher Trocknungslufttemperatur und unterschiedlichem Luftmassenstrom durchgeführt.

Nachfolgend werden relevante Aspekte dieser Phase näher beschrieben.

1.4.2.1 Versuchsdurchführung

Die Trocknung wird über die angeschlossenen Sensoren sowie deren Aufzeichnung automatisch ausgeführt. Nach dem Unterschreiten der zuvor eingestellten Grenzwerte für die gemessene Luftfeuchte in der Trocknungsbox wird der Trocknungsvorgang automatisch beendet. Daher ist die Trocknungsdauer über die gemessenen Temperaturen in der Trocknungsbox festgelegt und der Versuch ist beendet sobald an allen Sensoren die eingestellte Feuchte unterschritten wurde. Danach werden an festgelegten Stellen einzelne Proben zur Bestimmung des Wassergehaltes im Trocknungsofen gezogen. Diese werden jeweils in der Höhe der Sensoren in drei verschiedenen Tiefen genommen. Mit Hilfe dieser kann der tatsächliche Wassergehalt in den verschiedenen Punkten untersucht werden.

Bei den Versuchsserien wird auf die so genannten Grundlagenversuche eingegangen, welche auf einem vorgegebenen Trocknungsplan samt vorgegebenen Parametern basieren. Die Grundlagenversuche sollen einen Aufschluss über das typische Trocknungsverhalten von Hackgut unter verschiedenen Bedingungen aufzeigen. Hierbei werden die Korngrößen, die Trocknungslufttemperatur (somit auch die relative Luftfeuchte der Trocknungsluft) sowie der Luftmassenstrom variiert. Nach der Durchführung und Auswertung der Grundlagenversuche sind die typische Trocknungscharakteristik sowie die Einflüsse bei der Trocknung identifiziert.

1.4.2.2 Versuchsserien

Die Grundlagenversuche teilen sich, wie bereits in Kapitel 1.4.2.1 erwähnt wurden, in verschiedene Versuchsserien auf. Diese werden aufgrund folgender Parameter unterschieden:

- Trocknungslufttemperatur (davon abhängig unterschiedliche Trocknungsluftfeuchten)
- Trocknungsluftmassenstrom
- Körnung des Trocknungsmaterials

Nachfolgend ist in Tabelle 1-2 der Versuchsplan der durchgeführten Grundlagenversuche dargestellt. Je Versuchsserie wurden mehrere Messungen mit gleicher Trocknungslufttemperatur und Trocknungsluftmassenstrom durchgeführt. Des Weiteren wurde bei jedem Versuch die Trocknungsbox bis zur gleichen Höhe mit Hackgut befüllt.

Tabelle 1-2 Grundlagenversuche der Hackguttrocknung

Versuchs-Serie	Versuchs-Nummer	Trocknungsluft-Temperatur [°C]	Trocknungsluft-Massenstrom [m³/h]	Material
1	1	20	500	ungesiebt
	2	20	1.000	ungesiebt
	3	40	500	ungesiebt
	4	40	1.000	ungesiebt
	5	60	1.000	ungesiebt
2	1	20	500	gesiebt G30
	2	20	750	gesiebt G30
	3	30	500	gesiebt G30
	4	30	750	gesiebt G30
	5	40	500	gesiebt G30
	6	40	750	gesiebt G30
3	1	20	500	gesiebt G50
	2	20	750	gesiebt G50
	3	30	500	gesiebt G50
	4	30	750	gesiebt G50
	5	40	500	gesiebt G50
	6	40	750	gesiebt G50

1.4.2.3 Chargenauswahl

Die Chargenauswahl wird unter Berücksichtigung der Zielsetzung durchgeführt. Die Einflüsse auf das Hackgut sollten unter Berücksichtigung des Ausgangsproduktes, der Lagerung und der Trocknung untersucht werden. Diese Einflüsse sollten auch für die unterschiedlichen Größenfraktionen der Proben untersucht werden. Die gewählten Chargen sollte ein breites Spektrum des zur Verfügung stehenden Holzbestandes widerspiegeln.

1.4.2.4 Durchführung

Um eine Lagerung ohne Veränderung (Wassergehalt) des Hackgutes zu ermöglichen wurde diese in stabilen 80 Liter Säcken verpackt. Es wurde auf einen dichten Verschluss der Säcke geachtet. Diese wurden dann für die weiteren Versuch kühl und dunkel gelagert.

1.4.2.5 Trocknungsmaterial

Die Anlieferung und Lagerung des Hackgutes ist von großer Bedeutung, da sich die Eigenschaften des Hackguts während der Lagerung nicht verändern sollen, damit ein möglichst gleichwertiges Ausgangsmaterial zur Verfügung steht. Es hat sich gezeigt, dass sich der Wassergehalt von Hackgut, das in Plastiksäcken luftdicht verschlossen ist und dunkel sowie trocken gelagert wird, für die Versuchsdurchführung nicht signifikant verändert. Daher werden die Hackschnitzel in 80 l-Säcke luftdicht verpackt und bis zu Verwendung zwischengelagert.

Die Zusammensetzung des Trocknungsmaterials wurde so gewählt, dass es eine repräsentative Mischung aus Hart- und Weichholz darstellt. Dieses entspricht dem am Heizwerk des Kooperationsbetriebes und auch allgemein dem zumeist verwendeten Material in Österreich. Des Weiteren wurde sehr frisches Material ohne Zwischenlagerung in Schüttungen (wodurch es aufgrund

der biologischen Prozesse bereits zu einer Reduktion des Wassergehalts kommt) verwendet. Das Trocknungsmaterial wurde in zwei Korngrößen an der Siebanlage beim Heizwerk gesiebt. Aufgrund dessen wurden folgende Korngrößen zur Verfügung gestellt:

- Ungesiebt: Direkt nach der Hackung angeliefertes Material, inklusive Feinanteil und allen Korngrößen
- Gesiebt G30: Feinhackgut gesiebt, ohne Feinanteil bis zur Korngröße G30
- Gesiebt G50: Mittleres Hackgut, ohne Feinanteil zwischen den Korngrößen G30 und G50

1.4.2.6 Probennahme

Die Probennahme im Heizwerk beginnt damit, dass relevante Informationen über das gelagerte Hackgut erhoben werden. Die Informationen, die in ein Probenahmeprotokoll eingetragen werden, enthalten den Ort und das Datum der Probennahme, die Zusammensetzung und die Lagerungsdauer der Hackschnitzel, der ungefähre Zeitpunkt der Schlägerung, das Ergebnis der Schüttdichtermittlung und weitere Anmerkungen, wie Schimmelbildung oder Vortrocknung.

1.4.3 Phase 3: Aufbereitung / Auswertung, Analyse und Schlussfolgerungen der Labor-Ergebnisse

Diese Projektphase gliedert sich in folgende methodische Einzelschritte:

- a. Auswertung der Online-Messergebnisse
- b. Auswertung entnommener Hackgutproben
- c. Verifizierung der Online-Messergebnisse anhand der Offline-Messergebnisse
- d. Zusammenführen der Ergebnisse
- e. Analyse der Ergebnisse
- f. Ableiten entsprechender Aussagen / Empfehlungen für den Praxisbetrieb

Ziele dieser Phase:

- Sämtliche Labor-Ergebnisse sind aufbereitet.
- Ergebnisse aus relevanten Vorprojekten sind vorhanden.
- Die Online-Messergebnisse sind anhand der Offline-Messergebnisse verifiziert.
- Die Labor-Ergebnisse sind analysiert.
- Ableitungen / Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen stehen zur Verfügung.

Inhalt und Beschreibung:

Dieses Arbeitspaket beschäftigte sich mit der Aufbereitung der im Labor erarbeiteten Ergebnisse. Weiters wurde im Rahmen dieses Arbeitspaketes eine Erhebung über relevante Ergebnisse aus anderen Projekten bzw. Publikationen im Zusammenhang mit der Hackguttrocknung durchgeführt. Schließlich erfolgte auch eine Überprüfung der online gemessenen Daten, indem die Offline-Ergebnisse diesen gegenübergestellt wurden. Auf Basis der aufbereiteten und verifizierten Daten erfolgte eine Analyse, wobei anschließend Schlussfolgerungen und sonstige Empfehlungen aus den Labor-Messungen für den anschließenden Feldbetrieb erfolgt sind.

Die aufgezeichneten Daten der einzelnen Versuchsserien wurden zu weiteren Auswertung in einheitliche Excel Mappen übernommen. Um die verschiedenen Versuche aussagekräftig miteinander vergleichen zu können wurden diese normiert. Die Auswertung bezieht sich auf einen Gesamtwassergehalt zwischen 40 und 20 % (Material 1) sowie zwischen 35 und 20 % (Material 2

und 3). Des Weiteren wurden spezifische Kennwert für die Trocknungsdauer bezogen auf ein kg Trockensubstanz festgelegt. Um die aufgezeichneten online Daten mit offline Daten vergleichen zu können wurden nach jeder Messung an jedem Sensor 3 Hackgutproben genommen. Der Wassergehalt dieser Proben wurde anhand der Trockenschrankmethode bestimmt. Dies lieferte einen genauen und von den Sensoren unabhängigen Verlauf des Wassergehalts in der Schüttung.

Anhand einer Korrelationsanalyse wurde überprüft welche Trocknungsparameter einen Einfluss auf relevante Trocknungsergebnisse besitzen. Als relevante Trocknungsergebnisse wurden die Trocknungsdauer sowie der Wirkungsgrad identifiziert. Die erhaltenen Ergebnisse wurden mit den typischen Werten und Verläufen aus der Literatur verglichen. Anhand dieser Auswertung und Gegenüberstellung wurden die Empfehlungen für den Praxisbetrieb festgelegt.

Kurz-Beschreibung der Methodik:

Aufbereitung und Auswertung der Labor-Ergebnisse, Recherche über relevante Ergebnisse aus Vorprojekten, Verifizierung der Online-Messergebnisse anhand der Offline-Messergebnisse, Analyse der Labor-Ergebnisse, Erarbeitung von Schlussfolgerungen bzw. Abgabe von Empfehlungen für den Praxisbetrieb.

1.4.4 Phase 4: Verifizierung der Labor-Ergebnisse im Feldbetrieb

Diese Projektphase gliedert sich in folgende methodische Einzelschritte:

- a. Planung des Praxis-Versuchsdesigns / der Feldmessung beim Antragsteller, welcher über ein hackgutbetriebenes Heizwerk mit integrierter Hackguttrocknung verfügt
- b. Durchführung des Praxis-Versuches (analog zum Laborbetrieb, jedoch keine Online-Messung des Wasserverlustes mit Wägezellen)
- c. Aufbereitung / Auswertung und Analyse der Praxis-Ergebnisse
- d. Verifizierung der Labor-Ergebnisse

Ziele dieser Phase:

- Das Praxis-Versuchsdesign ist analog zum Labor-Vorgang geplant.
- Die Praxis-Messungen sind durchgeführt.
- Die Praxis-Messergebnisse sind aufbereitet, ausgewertet und analysiert.
- Die Labor-Ergebnisse sind verifiziert.

Inhalt und Beschreibung:

Im Zuge dieser Projektphase wurde das Versuchsdesign der Feldmessungen geplant und durchgeführt. Hierbei wurde die Hackguttrocknungsanlage des Antragstellers herangezogen. Die Messung erfolgte ohne Onlinemessungen der Feuchtigkeit. Es erfolgte eine nachträgliche Feuchtigkeitsbestimmung. Anschließend wurden diese Ergebnisse aufbereitet, ausgewertet und analysiert. Durch eine Gegenüberstellung der Praxis- mit den Labor-Ergebnissen wurde eine Verifizierung der Labor-Ergebnisse und Schlussfolgerungen herbeigeführt.

- Für den Feldbetrieb wurde in einer Trocknungsbox gemessen.
- Ein wasserseitiger Wärmemengenzähler stand zur Verfügung.
- Es wurden Materialart (Holzart, gesiebt / ungesiebt), Ausrichtung der Strömungsführung (horizontal/vertikal), Temperaturen und Feuchtegehalt erfasst.

Aufbau der Messtechnik:

Messsensoren für Feuchtigkeit und Temperatur wurden an der Rückwand der Trocknungsbox montiert. Diese Sensoren wurden zum mechanischem Schutz in einem Kunststoffrohr (3 x 0,003 m) eingebracht. Weiters ermöglichte die Montage der Rohre auf der Rückwand der Box auch ein nach hinten herausziehen der Sonden und damit das Messen mehrere Punkte bei voller Box (siehe Abbildung 1-3).



Abbildung 1-3 Anbringung der Messtechnik an der Trockenboxrückwand

Quelle: [eigene Darstellung]

Kurz-Beschreibung der Methodik:

Planung des Praxis-Versuchsdesigns, Durchführung der Praxis-Messungen, Aufbereitung / Auswertung / Analyse der Praxis-Messergebnisse, Gegenüberstellung der Labor- mit den Feldbetriebsmessergebnisse sowie Verifizierung der Labor-Messergebnisse.

1.4.5 Phase 5: Analyse und Empfehlungen der sinnvollen Integration nachhaltig bereitgestellter Trocknungsenergie

Diese Projektphase gliedert sich in folgende methodische Einzelschritte:

- Anhand des zugrunde liegenden Biomasseheizwerkes mit integrierter Solaranlage (am Heizwerkdach befindet sich eine 1.315 m² große Solaranlage mit einem daran gekoppelten Pufferspeicher von 90 m³) soll eine Hackguttrocknung im Feldbetrieb durchgeführt werden.
- In Bezug auf die Integrationsmöglichkeiten wurde der Fernwärmelastgang des daran gekoppelten Fernwärmenetzes herangezogen.
- Analyse der unterschiedlichen Bereitstellungsmöglichkeiten.
- Empfehlungen zur sinnvollen Integration nachhaltig bereitgestellter Trocknungsenergie.

Ziele dieser Phase:

- Integrationsmöglichkeiten nachhaltig bereitgestellter Trocknungsenergie sind identifiziert.
- Integrationsmöglichkeiten nachhaltig bereitgestellter Trocknungsenergie sind analysiert.
- Empfehlungen zur sinnvollen Integration nachhaltig bereitgestellter Trocknungsenergie stehen zur Verfügung.

Inhalt und Beschreibung:

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden in einem ersten Schritt unterschiedliche nachhaltige Energiequellen erhoben, welche sinnvoll zur Bereitstellung einer Trocknungsenergie eingesetzt werden können. Diese Integrationsmöglichkeiten wurden anschließend analysiert. Abschließend wurden allgemeine Empfehlungen und Schlussfolgerungen für die sinnvolle Integration dieser Energiequellen abgegeben werden.

Es wurden relevante Daten von verschiedenen Herstellern von Trocknungstechnologien zur Hackguttrocknung gesammelt. Mit Hilfe dieser Daten wurden die unterschiedlichen Trocknungsanlagen nach dem Stand der Technik voneinander differenziert und getrennt dargestellt und beschrieben. Dabei wurden die Funktionsweise sowie die Vor- und Nachteile der einzelnen Anlagentypen analysiert.

Die Anlagentypen wurden hinsichtlich unterschiedlicher Faktoren verglichen. Dazu gehörten wichtige anlagenspezifische Parameter, Vor- und Nachteile, die Hackgutmanipulation und die Betriebsweise sowie die Kosten.

Für die Darstellung der Wirtschaftlichkeit / der Kosten der Anlagen wurden Szenarien erstellt. Neben der Darstellung der unterschiedlichen Anlagen wurden unterschiedliche Bereitstellungs- und Integrationsmöglichkeiten von verschiedenen Trocknungsenergien untersucht. Hierbei wurden die nachhaltigen Wärmequellen Solarthermie und verschiedene Formen der industriellen Abwärme (stationär, instationär, aus einem Batchbetrieb) betrachtet. Die technische Integrierbarkeit der unterschiedlichen Energiequellen wurde mit Hilfe von Lastgängen untersucht. Dazu wurden Lastgänge für Solarthermie und Fernwärmenetz sowie typische Lastcharakteristiken industrieller Abwärmequellen und die Trocknungscharakteristik einer Konvektionstrocknung herangezogen. Für die technische Integrierbarkeit wurden die unterschiedlichen relevanten Lastgänge übereinander gelegt / verglichen. So wurde untersucht, wie viel von der Solarthermie in das Fernwärmenetz integriert werden kann. Dazu wurden die Lastgänge der Solarthermie und des Fernwärmenetzes übereinander gelegt. Daneben wurden noch unterschiedliche Szenarien der Integration von Abwärme betrachtet.

Kurz-Beschreibung der Methodik:

Recherche über sämtlichen relevanten Integrationsmöglichkeiten nachhaltig bereitgestellter Trocknungsenergie, Analyse dieser Ergebnisse, Abgabe von Empfehlungen und Schlussfolgerungen zur Integration dieser Energiequellen.

1.4.6 Phase 6: Konsolidierung der Ergebnisse

Diese Projektphase gliedert sich in folgende methodische Einzelschritte:

- a. Zielgruppenrelevante Aufbereitung der Ergebnisse
- b. Zusammenführen der erarbeiteten Ergebnisse

Schließlich wurden in dieser Projektphase Erkenntnisse und Schlussfolgerungen abgeleitet. Hierbei wurden die für die Technische Hackguttrocknung relevanten Aspekte aufbereitet. Die Ergebnisse wurden im Projektteam diskutiert und reflektiert. Dadurch konnte bestmögliche Praxistauglichkeit und großer Anwendungsbezug hergestellt werden. Auch konnte ein Ausblick erarbeitet werden.

1.5 Aufbau der Arbeit

Am Beginn dieses Berichtes werden unter dem **Kapitel 1** die Aufgabenstellung, die behandelten Schwerpunkte dieses Projekts, die Einordnung in die Programmlinie und die angewandten Methoden näher erläutert.

Das **Kapitel 2** beinhaltet die Grundlagen der zugrunde liegenden Arbeit. Es werden relevante Begriffsdefinitionen erläutert, Ausgewählte Eigenschaften und Parameter des Brennstoffes Holz dargestellt, der Aufbau des Holzes präsentiert, die Grundlagen der Holzhackgut-Lagerung und der Hackguttrocknung erläutert. Auch werden in diesem Abschnitt die Hackgutlogistik im Konnex zur Trocknung beschrieben sowie die angewendeten Messverfahren näher erläutert.

Unter **Kapitel 3** erfolgt eine Darstellung der Auswertungs- und Analyseergebnisse aus den Labormessungen. Dabei erfolgt eine Darstellung der allgemeinen Trocknungscharakteristik und der Verläufe von Temperatur, relativer Luftfeuchte, Wasseraufnahme, mittleren relativen Luftfeuchte und des Hackgutwassergehalts und des Wirkungsgrades der Trocknung. Auch wird die Homogenität des Trocknungsmaterials betrachtet. Schließlich erfolgt eine Auswertung der normierten Trocknungsversuche und der Trocknungsversuche der unterschiedlichen Materialien, ein Vergleich der normierten Trocknungsversuche und der Trocknungslufttemperatur bei unterschiedlichem Niveau (20 °C und 40 °C. Es erfolgt auch eine Darstellung der Korrelationsanalyse, des Monitorings zur Steuerung der Trocknungsdauer und eine Zusammenfassung der Auswertung über die Laborergebnisse.

Im **Kapitel 4** wird aufgezeigt, welche Erkenntnisse aus den Feldmessungen gewonnen werden konnten. Daher werden die Trocknungsanlage, der Versuchsaufbau und die Versuchsserien beschrieben. Schließlich erfolgt eine Darstellung der Auswertung und Analyse der Feldmessungen mit hohem Detaillierungsgrad.

Im **Kapitel 5** werden die Bereitstellung und Integration der Trocknungsenergie behandelt. Dabei wurden Solarthermie, die Abwärmenutzung zur Hackguttrocknung in einem Heizwerk und die im Biomassekessel erzeugte Wärme zur Hackguttrocknung näher betrachtet.

In **Abschnitt 6** erfolgt schließlich eine Darstellung von wesentlichen Ergebnissen und Schlussfolgerungen aus dem Projekt, wobei allgemeine Schlussfolgerungen sowie Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses des Trocknungsbetriebes, des Einflusses des Materials und der sinnvollen Integration nachhaltig bereitgestellter Trocknungsenergie behandelt werden.

In **Abschnitt 7** erfolgt ein Ausblick.

Das **Kapitel 8** beinhaltet das Literatur-, das Abbildungs-, das Tabellen- und Formelverzeichnis.

2 Grundlagen

2.1 Begriffsdefinitionen

2.1.1 Wassergehalt / Brennstoff-Feuchte

Der Wassergehalt bzw. die Brennstofffeuchte besitzen einen sehr starken Einfluss auf die Holzeigenschaften, wie z. B. Festigkeit, Heizwert oder Widerstand gegen Schimmelbefall, und sind daher als Qualitätsmerkmal von besonderem Interesse. [Kollmann, 1982]

Der Wassergehalt kann mit direkten und indirekten Verfahren bestimmt werden. Bei den direkten Verfahren wird das Wasser vom Probematerial getrennt und mit direkten Messmethoden, wie z.B. Wiegen, bestimmt. Direkte Verfahren zeichnen sich durch eine hohe Genauigkeit aus und sind zeitintensiv. Bei den indirekten Verfahren werden Materialeigenschaften gemessen, die vom Wassergehalt beeinflusst werden. Der Vorteil indirekter Verfahren ist, dass diese berührungsfrei erfolgen und sich daher vor allem für kontinuierliche Messungen eignen. [Golser et.al, 2004]

Der Wassergehalt von biogenen Brennstoffen schwankt zwischen ca. 10 und ca. 65 %. Waldfrisches Holz weist abhängig von der Baumart (Harthölzer haben einen geringeren Wassergehalt und Weichhölzer einen höheren) einen Wassergehalt zwischen 40 bis 65 % auf. Hackgut aus Kurzumtrieben (Energieholz) kann ebenfalls einen Wassergehalt von bis zu 50 % erreichen. Des Weiteren besitzt Splintholz (Leitungsgefäße des Holzes im äußeren Bereich) einen höheren Wassergehalt als Kernholz. Luftgetrocknetes Holz kann hingegen nach entsprechender Lagerdauer in den so genannten Gleichgewichtszustand gelangen. Dies entspricht einem Wassergehalt, der je nach Jahreszeit zwischen 10 und 20 % schwankt. [Kaltschmitt & Hartmann, 2009]

2.1.2 Einfluss des Wassergehaltes auf den Heiz- und Brennwert

Der Einfluss des Wassergehalts auf den Heiz- und Brennwert ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Der Heiz- und Brennwert nehmen mit steigendem Wassergehalt linear ab und bei einem Wassergehalt von knapp unter 90 % wird der Wert 0 erreicht. Praktisch ist eine Verbrennung von sehr feuchtem Material von über 60 % Wassergehalt schwer möglich. Weiters zeigt sich, dass der relative Abstand zwischen Heiz- und Brennwert sich mit steigendem Wassergehalt vergrößert. Umso feuchter das Ausgangsmaterial ist, desto größer ist der durch eine Rauchgaskondensation erzielbare Energiegewinn. [Kaltschmitt & Hartmann, 2009]; [Deimling et al., 2000]

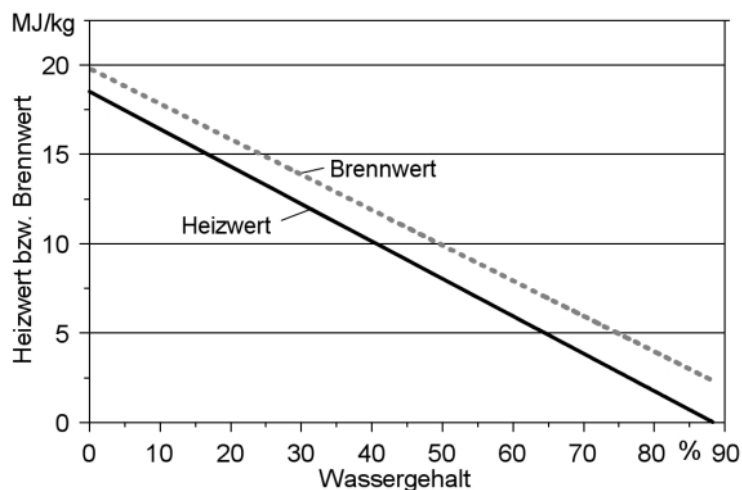


Abbildung 2-1 Heiz- und Brennwert von Holz in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Quelle: [Kaltschmitt & Hartmann, 2009]

2.2 Grundlagen der Hackguttrocknung

Eine Trocknung kann durch verschiedene Gründe gerechtfertigt sein. Durch den Entzug von Feuchte werden viele Güter erst haltbar, weiterverwendbar oder überhaupt erst brauchbar. Viele Stoffe lassen sich erst nach einer Trocknung weiterverarbeiten, andere müssen getrocknet werden, damit die folgenden Arbeitsgänge mit einem erträglichen Kostenaufwand zu realisieren sind. Des Weiteren können sich durch eine Trocknung das Aussehen und der Wert des Gutes erhöhen. In der Regel soll das Gut beim Trocknen seine Form, Festigkeit, Farbe sowie, wenn vorhanden, die wertvollen Bestandteile behalten [Kröll & Kast, 1989]. Bei der Trocknung von Hackgut stehen vor allem folgende Punkte im Vordergrund:

- Heizwertsteigerung
- Qualitätssteigerung
- Gewichtsminderung
- Lagerfähigkeit

2.2.1 Bindung von Wasser im Holz

Tabelle 2-1 zeigt die verschiedenen Bindungsarten sowie den dazugehörigen Wassergehalt. Die Bindungskräfte nehmen von der Kapillar- über die Elektro- bis zur Chemosorption zu.

Bindung	Wassergehalt	Merkmale
Kapillarsorption und Adhäsion	> 25 %	feines, ungebundenes Wasser in den Zellhohlräumen, gebundenes Wasser in den Holzfaser
Fasersättigungspunkt	19 % – 25 %	in den Holzfaser (Zellwänden) gebundenes Wasser, Holzschwind bei Wasserentzug
Kapillarsorption	13 % – 25 %	kolloidal gebundenes Wasser, Feuchtigkeitsbewegung durch Diffusion und Kapillarkräfte
Elektrosorption	5,7 % – 13 %	Wasser an der Micelle durch elektrische Kräfte gebunden
Chemosorption	0 % – 5,7 %	molekulare Anziehungskräfte

Tabelle 2-1 Bindung von Wasser im Holzkörper

Quelle: [Kaltschmitt & Hartmann, 2009]

Vor allem die Kenntnis, in welcher Form das Wasser im Gut vorliegt, ist für die Auswahl der geeigneten Messmethoden sowie für die Abstimmung des Trocknungsprozesses von Bedeutung. [Wernecke, 2003]

2.2.2 Feuchtebewegung bei der Trocknung

Für die Feuchtebewegung bei der Trocknung oberhalb des Fasersättigungsbereiches bewirken Kapillarkräfte eine Wanderung des flüssigen (freien) Wassers im Holz. Unterhalb des Fasersättigungspunktes wird die Feuchtigkeitsbewegung durch Kapillarkräfte sowie durch Diffusion infolge von Feuchtigkeits- oder Teildruckunterschieden verursacht. [Kollmann 1982]

Kapillarbewegung

Durch Zugunterschiede infolge der Oberflächenkräfte entstehen Wasserbewegungen in den Menisken der Kapillaren. In einer einzelnen Kapillare kann ein ausgelasteter und ein nicht ausgelasteter Meniskus vorhanden sein. Dies geschieht dadurch, dass an dem ausgelasteten Meniskus Feuchtigkeit

verdunstet, während sie an dem nicht ausgelasteten kondensiert. Durch diesen Zugunterschied kommt es, wie in Abbildung 2-2 dargestellt wird, zu einer Feuchtigkeitsbewegung im Holz. Liegt hingegen ein Netz aus untereinander verbundenen und verschieden weiten Kapillaren vor, ergeben sich in den ausgelasteten Menisken der Kapillaren verschieden hohe Zugkräfte. Je enger die Kapillaren sind, desto höher ist die Zugkraft. Somit folgt, dass die engen Kapillaren aus den weiteren Kapillaren saugen. Des Weiteren gilt es zu beachten, dass der Dampfdruck über einer gekrümmten Wasseroberfläche niedriger sein muss als über einem ebenen Wasserspiegel. Je stärker der Meniskus in der Kapillare gekrümmt ist, desto kleiner wird der Dampfdruck, der mit der Flüssigkeit im Gleichgewicht steht. Ist also der Druck über dem Meniskus kleiner als der Dampfdruck der darüber liegenden Luftsäule, so wird Wasserdampf aus dieser auf dem Meniskus kondensiert und es kommt zur Kapillarkondensation. Da bei Holz, als zu trocknendes Gut, sowohl durchgehende untereinander verbundene Kapillaren als auch luftgefüllte Poren vorhanden sind, ist eine reine Kapillarbewegung in dem ganzen System nicht möglich. Die Feuchtigkeitsbewegung kommt zustande, weil beim vorhandenen Dampfdruckgefälle Wasser an den ausgelasteten Menisken verdampft, dann in Dampfform durch die luftgefüllten Poren diffundiert und an den nicht ausgelasteten Menisken kondensiert. Aufgrund von Zugunterschieden wird in den gefüllten Kapillaren das kondensierte Wasser gefördert. [Kollmann 1982]

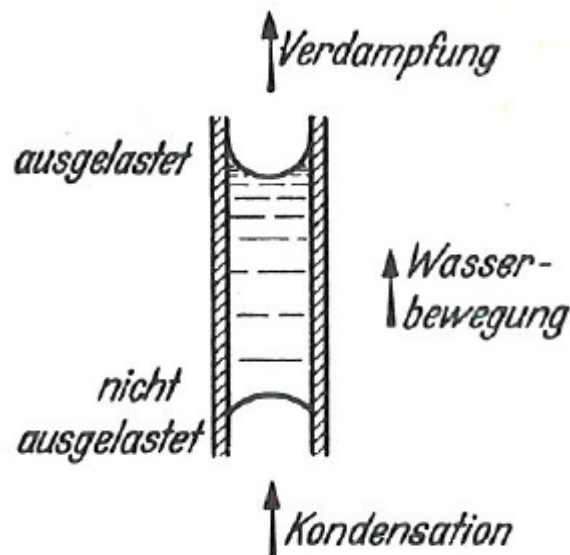


Abbildung 2-2 Wasserbewegung in den Kapillaren

Quelle: [Kollmann, 1982]

Diffusion

Bezogen auf die Trocknung von Holz sind vor allem die Gas- bzw. Dampfdiffusion von großer Bedeutung. Die Diffusion beginnt bereits während die Kapillarbewegung im Holz noch statt findet. Dies geschieht bereits über dem Fasersättigungsbereich. Jedoch handelt es sich hierbei nur um eine kleine Menge an Wasser die im Verhältnis zur Kapillarbewegung vernachlässigbar klein ist. Den wesentlichen Beitrag zur Trocknung liefert die Diffusion erst unterhalb des Fasersättigungspunktes, bei welchem es zu einer Diffusion durch alle Hohlräume kommt. Vor allem das Diffusionsverhalten wird vom inhomogenen Aufbau von Holz beeinflusst. Dieses wird durch den Diffusionsfaktor beschrieben, der angibt um wie viel der Mengenstrom durch das zu trocknende Gut kleiner ist, als im Vergleich zu einer geraden Röhre mit derselben Querschnittsfläche sowie der gleichen Druckdifferenz. Der Diffusionswiderstand in Längsrichtung (entlang der Faser) ist kleiner als quer zur Faserrichtung. Dies ergibt sich daher, dass bei einer Diffusion in Längsrichtung der Dampf

weniger oft von einer Zelle in eine andere wechseln muss. Der Übergang von einer Faser in die nächste wirkt sich negativ auf die Diffusion aus, da eine immer engere Kapillare durchwandert werden muss. Des Weiteren spielt der Wassergehalt eine Rolle. Mit sinkendem Wassergehalt der Zellwand steigt der Diffusionswiderstand an. Jedoch wird die transportierte Dampfmenge mit steigender Temperatur größer. [Kollmann 1982]

2.2.3 Trocknungspotential von Luft

In der Trocknungstechnik wird fast ausschließlich Luft als Wärmeträger benutzt. Wasser liegt hingegen in den meisten Fällen als auszutreibende Flüssigkeit vor. Daher wird in der Regel für eine Veranschaulichung von Zustandsänderungen bei Trocknungsprozessen mit feuchter Luft das h,x-Diagramm von Mollier herangezogen. [Krischer & Kast, 1992]

2.2.4 Wärme- und Stoffübergänge bei der Konvektionstrocknung

Die Wärme- und Stofftransporte laufen bei der Konvektionstrocknung gekoppelt ab. Das Gut erhält die notwendige Energie von einem strömenden Fluid. Die Wärme dient dazu, dass die im Feststoff enthaltene Flüssigkeit verdunstet oder verdampft wird. [Christen, 2010]

Unter Verdunsten versteht man, wenn der entstehende Dampf, der an der Oberfläche der Flüssigkeit des angrenzenden Raumes auftritt, nicht alleine, sondern zusammen mit einem anderen Gas, vorhanden ist. Von Verdampfen wird gesprochen, wenn im angrenzenden Raum nur der entstehende Dampf alleine vorhanden ist. [Krischer & Kast, 1992]

Für die detaillierte Beschreibung des Wärme- und Stoffüberganges wird ein Ausschnitt eines Gutsstückes herangezogen (siehe Abbildung 2-3).

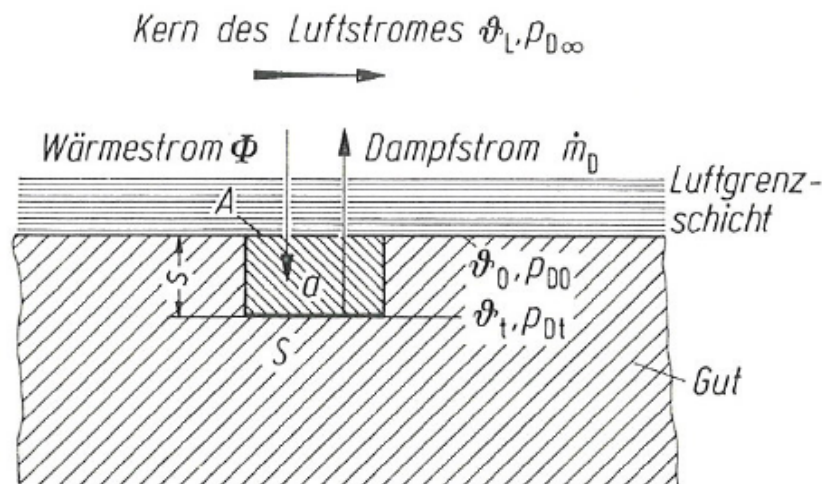


Abbildung 2-3 Luft-, Wärme- und Dampfstrom bei der Konvektionstrocknung

Quelle: [Kröll & Kast, 1978]

Betrachtet wird das Gutstück q , über das Luft mit einer Temperatur strömt. An der Fläche S im Inneren des Gutes liegt eine bestimmte Temperatur v vor. Die Temperatur im Gutsinneren ist niedriger als die Temperatur der Trocknungsluft, so dass die Wärme von der Luft durch die Gutsoberfläche nach S wandert, wo der Wärmestrom ankommt. Vereinfachend wird angenommen, dass dieser gleich dem Wärmestrom, den das Gutstück von der Luft aufnimmt, ist. In diesem Fall findet die Energieübertragung in zwei Schritten statt. Der erste Schritt ist der Wärmeübergang von der Luft an die Oberfläche A durch Leitung von der Fläche A zur Fläche S . In der Fläche S des porösen und lufthaltigen Trocknungsguts erzeugt der Wärmestrom Dampf mit einem bestimmten Partialdruck. Der Dampfpartialdruck herrscht hingegen im Kern des Luftstromes. Der Dampf

diffundiert von der Fläche S durch die Luft in den Gutsproben zur Fläche A und gelangt durch die Luftgrenzschicht in den Kern des Luftstroms. Eine Erhöhung des Dampfstromes ist durch eine Erhöhung der Trocknungslufttemperatur, indem die Luft schnell über das Gut strömt, oder indem der Weg s des Wärme- und Feuchtestroms möglichst kurz gehalten wird, möglich. [Kröll & Kast, 1989]

Der Stofftransport stellt sicher, dass der entstehende Dampf dann aus dem Gutsinneren abgeführt wird. Dabei gilt es zu verhindern, dass sich der Dampf beim Abkühlen des Guts wieder auf oder im Gut niederschlägt. Durch die Wärmezufuhr steigen die Gutstemperatur und somit auch der Dampfdruck der im Gutsinneren enthaltenen Flüssigkeit. Aufgrund des dadurch entstehenden Partialdruckgefälles von innen nach außen wird der Stofftransport des Dampfes eingeleitet. Gleichzeitig wird dem Gut jedoch durch die Verdampfung der Flüssigkeit die Verdampfungsenthalpie entzogen, wodurch die Temperatur im Gutsinneren wieder sinkt. Das dadurch entstehende Temperaturgefälle stellt eine treibende Kraft dar, die den Wärmetransport von außen nach innen weiter begünstigt. Durch den Entzug der Verdampfungskälte kommt es bei der konvektiven Trocknung mit Luft immer zu einer Gutstemperatur die unterhalb der Temperatur der Trocknungsluft liegt. Ist das zu trocknende Gut an der Oberfläche genügend feucht, so ist die Trocknungsgeschwindigkeit ausschließlich von den Wärme- und Stoffübergängen an seiner Oberfläche bestimmt. Ist die Oberfläche des Guts bereits trocken, so wandert die Grenze zwischen trockenem und feuchtem Gut mit Fortdauer der Trocknung ins Gutsinnere. Diese sich einstellende Feuchtigkeitsgrenze wird als Trockenspiegel bezeichnet. Die Trocknungsgeschwindigkeit wird jetzt auch von der Wärmeleitung und der Feuchtwanderung im Gut beeinflusst. Die maßgebenden Faktoren sind die Hygroskopie, die Porenstruktur und die Wärmeleitfähigkeit in den trockenen und feuchten Schichten. [Christen, 2010]

2.2.5 Trocknungsabschnitte

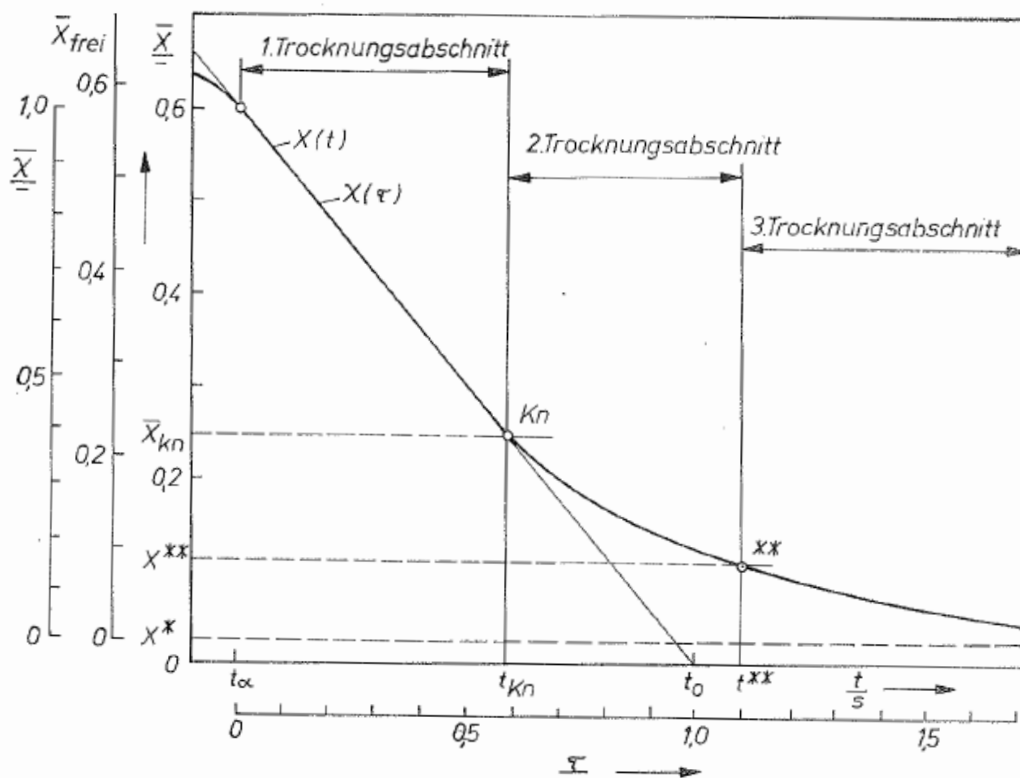


Abbildung 2-4 Schematischer Verlauf der Trocknungsfunktion $X(t)$

Quelle: [Roth, 1989]

Bei der Trocknung von hygroskopischen Gütern kann der Trocknungsverlauf in drei Abschnitte eingeteilt werden, in welchen die Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes durch die Bindungsmechanismen des Wassers im Gut bestimmt wird [Krischer & Kast, 1992].

Abbildung 2-4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Trocknungsgeschwindigkeit (Verlauf der Trocknungsfunktion $X(t)$) eines hygroskopischen kapillarporösen Gutes.

Nach einer kurzen instationären Aufwärmphase geht der Trocknungsvorgang in den ersten Trocknungsabschnitt über, der durch eine konstante Trocknungsgeschwindigkeit bis zum Knickpunkt K_n gekennzeichnet ist. An diesem Knickpunkt, der von den kapillaren Eigenschaften des Gutes abhängig ist, endet der erste Trocknungsabschnitt. Der zweite Trocknungsabschnitt ist durch eine Abnahme der Trocknungsgeschwindigkeit gekennzeichnet. Dieser Trocknungsabschnitt endet mit dem Erreichen der maximalen hygroskopischen Feuchte X^{**} in der Gutsmitte. Dies bedeutet, dass das ganze Gut ein hygroskopisches Verhalten zeigt. Nachfolgend beginnt der dritte Trocknungsabschnitt in dem die Trocknungsgeschwindigkeit mit der Zeit asymptotisch auf den Wert Null fällt. [Krischer & Kast, 1992], [Roth, 1989]

Der erste Trocknungsabschnitt

Beginnt die Trocknung bei einem hohen Wassergehalt des Gutes, so stellt sich thermisch betrachtet sehr rasch ein gewisser scheinbarer Beharrungszustand im Gut ein. Dieser ist durch ein Einpendeln der Temperaturen auf ein gleich bleibendes Niveau zu beachten. Solange die Kapillarkräfte groß genug sind, um die an der Oberfläche verdunstende Wassermenge aus dem Gutsinneren nach zu fördern, bleibt die Verdunstung an der Oberfläche näherungsweise konstant. Dies erklärt sich dadurch, dass an der Oberfläche eines grobkapillaren Gutes mit konstanter Temperatur immer Sattedampfdruck herrscht. Dieser Bereich stellt den ersten Trocknungsabschnitt dar, der durch eine konstante Trocknungsgeschwindigkeit gekennzeichnet ist. In diesem Bereich ist die Verdunstung in den Luftstrom nur von den äußeren Bedingungen abhängig. Es ändert sich nur die Verteilung des Flüssigkeitsgehaltes im Inneren des Gutes. Der kapillare Flüssigkeitstransport aus dem Inneren an die Oberfläche setzt die Ausbildung eines Flüssigkeitsgefälles nach der Oberfläche hin voraus. Abhängig von der Höhe der anfänglichen Verdunstung und der Höhe der kapillaren Leitfähigkeit tritt nach einer bestimmten Zeit ein Knickpunkt tkn_1 ein. In diesem Fall ist eine Verteilung erreicht in der der Flüssigkeitsgehalt an der Oberfläche Null wird. Von diesem Zeitpunkt an ist es nicht mehr möglich die anfängliche Trocknungsgeschwindigkeit weiterhin aufrecht zu erhalten. [Krischer & Kast, 1992] Für den ersten Trocknungsabschnitt gelten folgende Gesetzmäßigkeiten: [Kröll & Kast, 1989]

- Die Oberflächentemperatur des Gutes hängt nur wenig von der Geschwindigkeit der Luftströmung ab. Die Oberflächentemperatur beim Verdunsten von Wasser in Luft liegt in diesem Fall immer nahe an der Kühlgrenztemperatur der Luft.
- Wenn die Trocknungsluft absolut trocken ist, stellt sich die höchste mögliche Trocknungsgeschwindigkeit bei dieser Temperatur ein.
- Während des ersten Trocknungsabschnittes trocknet ein Gut in Luft mit 70 °C und 20 % relativer Feuchte aufgrund des ähnlichen Partialdruckes annähernd gleich schnell wie mit 120 °C und 30 % relative Luftfeuchte. Die Oberflächentemperatur beträgt im ersten Fall 41 °C sowie 88 °C im zweiten Fall.

Der zweite Trocknungsabschnitt

Der zweite Trocknungsabschnitt beginnt sobald nicht mehr genügend Feuchte vom Gutsinneren zur Oberfläche wandert und keine freie Wasseroberfläche feucht erscheint. Der Knickpunkt K_n befindet sich, abhängig von der inneren Beschaffenheit, der Form des Gutes und den äußeren Trocknungsbedingungen, bei unterschiedlichen durchschnittlichen Feuchte/Grundstoff-

Masseverhältnissen. Der Knickpunkt liegt umso höher je enger die Kapillaren des Gutes sind. Durch eine Erhöhung der Gutstemperatur wird ein Absinken des Knickpunktes verursacht. Die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt im zweiten Trocknungsabschnitt stetig ab, da der Trocknungsspiegel immer mehr in das Gutsinnere zurückweicht. Die Lage des Trockenspiegels ist dadurch gekennzeichnet, dass die in flüssiger Form aus dem Gutsinneren an die Oberfläche der Flüssigkeit transportierte Flüssigkeitsmenge durch Dampfdiffusion zunächst durch eine trockene Gutsschicht an die Oberfläche diffundieren muss. Daher müssen der Wärme- und Dampfstrom zunehmend länger werdende Wege im Gut zurücklegen. Danach wird die Flüssigkeit durch den Stoffübergang an die umgebende Luft abgegeben. [Kröll & Kast, 1989], [Krischer & Kast, 1992]

Der dritte Trocknungsabschnitt

Der dritte Trocknungsabschnitt beginnt wenn die im Gut gebundene Feuchte Dampf geringen Druckes bildet und sich ein kleines Dampf-Partialdruckgefälle zum gutsberührenden Luftstrom einstellt. Hier spricht man von einem hygroskopischen Zustand, wenn die freie Feuchte verschwunden ist. Dies ist dadurch gekennzeichnet, dass der Dampfpartialdruck im Inneren geringer ist als der Sattedampfdruck, den die freie Feuchte bei der gleichen Temperatur hätte. Im Laufe des dritten Trocknungsabschnittes strebt das Verhältnis X aller Gutsschichten jenen Zustand an, bei welchem alle Gutsteile in das hygroskopische Gleichgewicht mit dem Gutsstrom gelangen. Dieser Wert kann nicht unterschritten werden und wird theoretisch erst nach unendlich langer Zeit erreicht. Die Trocknungsgeschwindigkeit verläuft langsamer als im zweiten Trocknungsabschnitt und stellt eigentlich einen Ausgleichsvorgang dar, dessen Ablaufgeschwindigkeit irgendwann auf den Wert Null fällt. Im Gegensatz zur freien Feuchte, wandert die gebunden Feuchte nicht an eine schmale Zone, wo sie verdampft, sondern sie verdampft gleichzeitig an vielen Stellen im Inneren des Gutes und bewegt sich als Dampf durch die mit Luft gefüllten Poren bis zur Gutoberfläche. Im dritten Trocknungsabschnitt hat die Geschwindigkeit des Trocknungsluftstromes beinahe keinen Einfluss mehr auf die Trocknungsgeschwindigkeit. Diese wird maßgebend vom Dampfpartialdruck im Luftstrom sowie der Gutstemperatur beeinflusst. Die Gutstemperatur nähert sich bereits am Beginn des dritten Trocknungsabschnittes an die Trocknungslufttemperatur an. [Kröll & Kast, 1989]

Gesamtverlauf der Trocknung

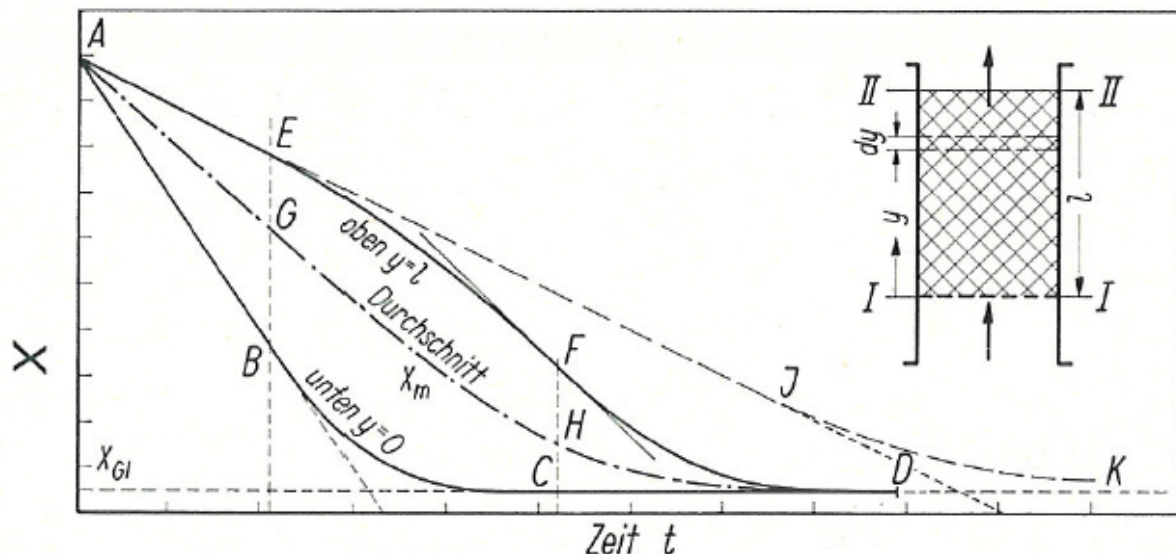


Abbildung 2-5 Theoretischer Verlauf der Gutsfeuchte X in verschiedenen Schichten einer Schüttung

Quelle: [Kneule, 1975]

Wird der Trocknungsverlauf bei der Konvektionstrocknung von Schüttgütern betrachtet, ist die Beobachtung der Trocknungskurve über die gesamte Trocknung nicht mehr möglich. Hier bedarf es einer genaueren Betrachtung einzelner Schichten der Schüttung. In den einzelnen Schichten zeigen sich jedoch wieder die typischen Eigenschaften der einzelnen Trocknungsabschnitte. In Abbildung 2-5 ist der Trocknungsverlauf einer Schüttung dargestellt, wie er aufgrund von theoretischen Überlegungen zu erwarten ist.

Die Linie ABCD stellt die Feuchtigkeitsabnahme über die Zeit am Eingang der Schüttung dar. AEFD stellt hingegen den zu erwartenden Verlauf der Feuchtigkeitsabnahme am Ende der Schüttung dar. Die Linie AGHD stellt den Verlauf der durchschnittlichen Gutsfeuchtigkeit dar. Daher trocknet die Eingangsschicht I-I wesentlich schneller als die sich am Ende der Trocknung befindende Schicht II-II, weil die Luft im Verlauf der Durchströmungen der Schichten kühler und feuchter wird. Die Abschnitte AB, AE sowie der Durchschnitt AG zeigen einen linearen Verlauf und deuten daher den ersten Trocknungsabschnitt an. In der obersten Schicht folgt nach dieser Zeit ein signifikanter Rückgang des Feuchtegehalts der im Punkt F seinen höchsten Wert aufweist. Dieser Rückgang stellt sich jedoch erst ein, wenn die Trocknungsgeschwindigkeit in der unteren Schicht zurückgeht. Der Höchstwert F wird erst erreicht wenn sich die Feuchtigkeit in der unteren Gutsschicht nicht mehr ändert. Jedoch zeigt sich, dass die Schlussphase der oberen Schicht mit Ausnahme des zeitlichen Auftretens, nahezu den gleichen Verlauf (Steigung) aufweist, wie die untere Schicht. [Kneule 1975]

Experimentelle Bestimmung des Trocknungsverlaufs in Schüttungen

Um die theoretisch zu erwartende Trocknungskurve zu überprüfen wurden bereits verschiedene Trocknungsversuche durchgeführt. Nachfolgend sind die Ergebnisse zweier Trocknungsversuche dargestellt. Im ersten Fall wurde mittels einer Messeinrichtung der Trocknungsverlauf von Streichhölzern in vier übereinander liegenden Ebenen aufgezeichnet. Abbildung 2-6 stellt die erhaltenen Ergebnisse dar.

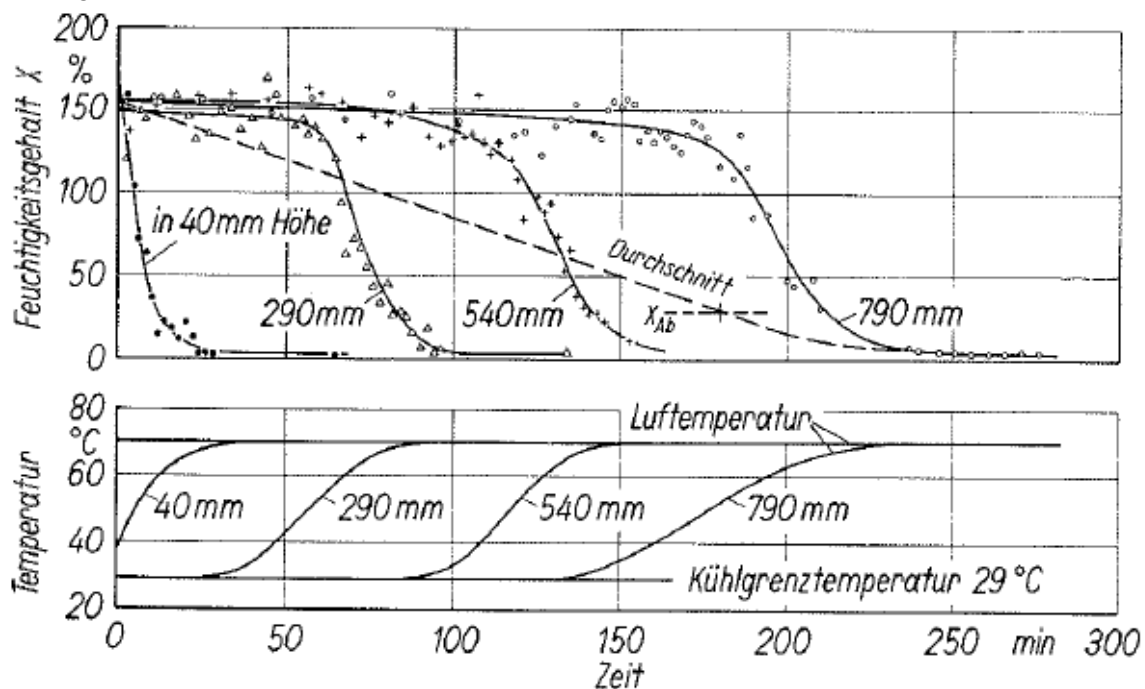


Abbildung 2-6 Feuchtigkeitsgehalt sowie Temperatur über den Trocknungsverlauf in verschiedenen Höhen einer 100 cm hohen Schüttung

Quelle: [Kneule, 1975]

Am Beginn der Trocknung beginnt bereits nach wenigen Minuten der Feuchtigkeitsgehalt in der ersten Schicht (40mm) zu sinken. Die Temperatur beginnt ebenfalls bereits nach einigen Minuten zu steigen. Die Abnahme der Gutsfeuchte verhält sich somit proportional zum Anstieg der Temperatur. Nach etwa 50 Minuten ist die Trocknung der ersten Schicht beendet. Erst danach beginnt die Feuchtigkeitsabnahme in der zweiten Schicht, die nach etwa 100 Minuten beendet ist. Die Trocknung der noch darüber liegenden Ebenen verläuft ebenfalls nach dem gleichen Muster ab. Dies bedeutet, dass sich der Trocknungsvorgang immer nur auf eine bestimmte Zone in der Schüttung begrenzt und dieser Bereich von unten nach oben wandert. Unterhalb dieser Trocknungszone ist die Schüttung bereits trocken, oberhalb noch feucht. Weiters zeigt sich, dass die Dauer des ersten Trocknungsabschnittes, der durch eine lineare Abnahme des Feuchtigkeitsgehaltes gekennzeichnet ist, mit der Dauer des gesamten Trocknungsvorganges zunimmt.

Ein zweiter aus der Literatur bekannter Trocknungsversuch zur Bestimmung des Trocknungsverlaufes wurde anhand der Trocknung von Luzernen (Nutzpflanze aus der Familie der Hülsenfrüchte) durchgeführt [Kneule 1975]. Hierbei wurde vor allem auf das Verhalten der Trocknungszone bei unterschiedlichen Trocknungsluftfeuchten eingegangen. Nachfolgend sind in Abbildung 2-7 die erhaltenen Trocknungsverlaufskurven dargestellt

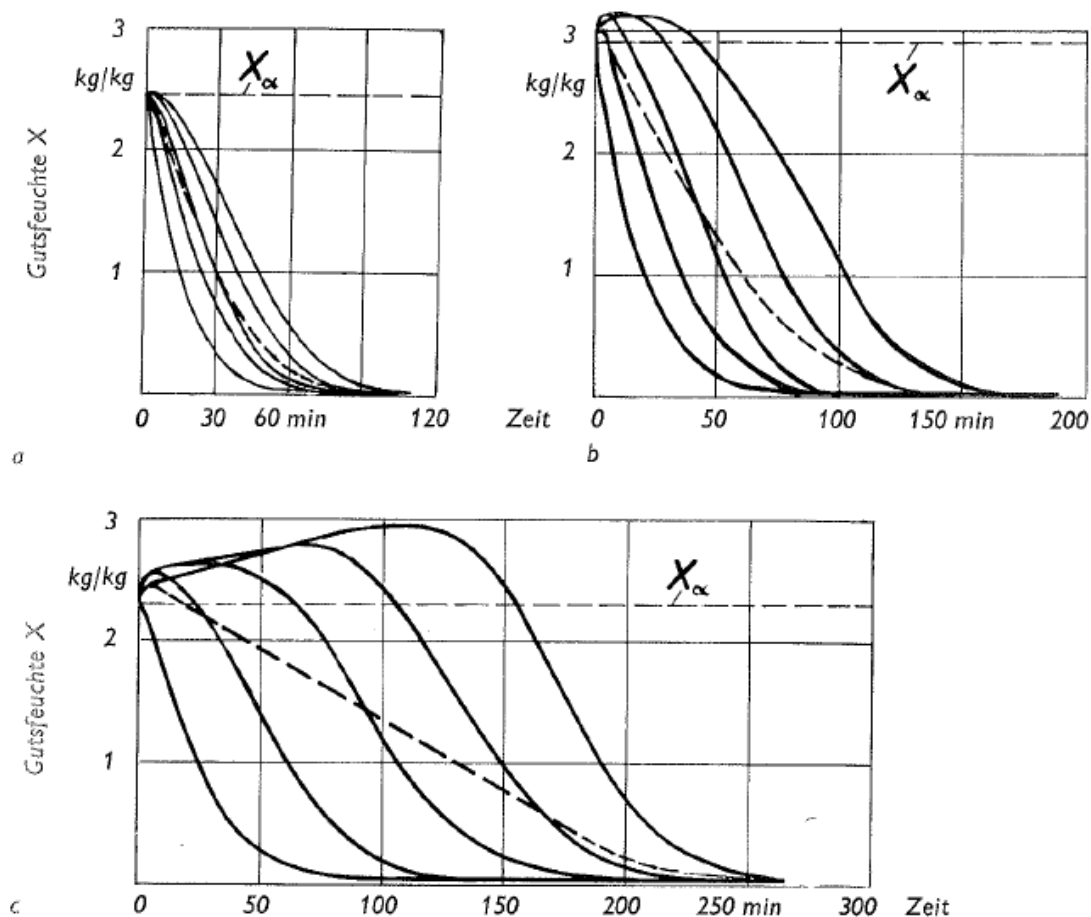


Abbildung 2-7 Trocknungsverlauf von Luzernen in 5 gleichen Schichten einer 15 cm hohen Schicht bei einer Trocknungstemperatur von 80 °C mit verschiedenen relativen Luftfeuchten

Quelle: [Kneule, 1975]

Anmerkung: Relative Luftfeuchten von a: 7 %, b: 24 % und c: 49 %;

Bei einer niedrigen relativen Luftfeuchte von 7 % nimmt die in den verschiedenen Schichten nach gleicher Zeitdauer verdampfte Feuchtigkeitsmenge von unten nach oben ab. Dies ist durch die Abkühlung und Wasserdampfaufnahme der Trocknungsluft zu erklären. Enthält hingegen die Trocknungsluft bereits entsprechend viel Wasserdampf, wodurch es in einer der darüber liegenden Schichten zu einer Sättigung der Trocknungsluft kommt, kann kein Trocknungsfortschritt mehr erzielt werden. Es besteht sogar die Möglichkeit, dass die in den unteren Schichten verdampfte Flüssigkeit aufgrund einer starken Abkühlung und dadurch Sättigung der Trocknungsluft in die oberen Schichten wieder abgegeben wird. Dadurch kann es zu einer deutlichen Verzögerung der Trocknung kommen, da die Feuchtigkeit nicht ausgetragen sondern nur in ihrer Höhe verschoben wird. Mit zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit der Trocknungsluft bilden sich bei gleich bleibender Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit in den einzelnen Schichten immer größerer Unterschiede in der Gutsfeuchte aus. Bei einer Trocknung mit 24 und 49 % relativer Luftfeuchtigkeit ist bei der Durchschnittsfeuchtigkeit am Beginn der Trocknung ein kurzer Anstieg zu beobachten. Dies bedeutet, dass nicht nur Feuchtigkeit aus den unteren Schichten, sondern auch Feuchtigkeit, die bereits in der Trocknungsluft enthalten war, in den oberen Schichten kondensiert. [Kneule 1975]

Diese Trocknungsversuche wurden nicht explizit mit Hackgut durchgeführt, jedoch lassen sich aufgrund der erhaltenen Ergebnisse bereits im Vorfeld Rückschlüsse auf die zu erwartenden Abläufe bei der Hackguttrocknung schließen.

2.2.6 Thermodynamische Bewertungsgrößen

Das Festlegen von thermodynamischen Bewertungsgrößen für Trocknungsanlagen ist von verschiedenen Gesichtspunkten abhängig. Je nach Art und Wassergehalt des Trocknungsgutes und je nach Betriebszustand (vor allem in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte) ergeben sich für den gleichen Trockner bei einer Berechnung immer verschiedene Zahlenwerte. Weiters gilt es zu beachten, dass der Trocknungsprozess nicht nur nach seinen energetischen Gesichtspunkten betrachtet werden kann. Durch die Trocknung wird das Trocknungsgut in einen neuen wertvolleren Zustand gebracht. Daher ist es essentiell die Trocknung auch nach wirtschaftlichen und sozialen Nutzen zu beurteilen. Diese sind jedoch noch stärker von den spezifischen Angaben abhängig und daher ist hier keine allgemein gültige Definition verfügbar.

Bei der thermodynamischen Bewertung kann davon ausgegangen werden, dass der Nutzen der Trocknung durch das Austreiben der Feuchte gegeben ist. Dies bedeutet, dass die Feuchte vom Gut gelöst und danach aus dem Trockner entfernt werden muss. Daher wird der Energiebedarf durch die notwendige Verdampfungsenthalpie des auszutreibenden Wasser berechnet. Hauptsächlich werden für diese Berechnung in der Praxis die gemessenen Wärmemengen, die für den Trocknungsprozess bereitgestellt werden, herangezogen. Nachfolgend ist in Formel 2.1 die Berechnung eines thermischen Wirkungsgrades dargestellt. [Kröll & Kast, 1989]

$$\eta_D = \frac{m_D \cdot \Delta h_v}{Q_\Sigma}$$

Formel 2.1 Thermischer Wirkungsgrad der Trocknung

Quelle: [Kröll & Kast, 1989]

Q_Σ Energiebedarf der Trocknung

2.2.7 Regelung des Trockners

Wenn das Trocknungsgut nach der Trocknung einen einheitlichen Wassergehalt aufweisen soll, ist eine Regelung des Trocknungsprozesses unumgänglich. Des Weiteren ist eine Regelung notwendig

um einen optimalen Betrieb und somit auch einen hohen Wirkungsgrad gewährleisten zu können. Die Regelungstechnik kann sich an den folgenden Punkten orientieren: [Kröll & Kast, 1989]

- Beschaffenheit des Gutes.
- Wirkung und Aufbau des Trockners.
- Auf welche Gutsseigenschaft (Wassergehalt) geregelt werden soll.
- Welche Störgrößen oder Veränderungen (relative Luftfeuchte, Temperatur, Anfangswassergehalt etc.) können auftreten?
- Wie genau soll oder kann geregelt werden?

Die Steuerung des Trocknungsprozesses setzt voraus, dass die einflussnehmenden sowie die resultierenden Parameter gemessen und bekannt sein müssen. Folgende Punkte wirken sich auf den Endwassergehalt aus: [Kröll & Kast, 1989]

- Menge des Trocknungsgutes
- Anfangswassergehalt
- Gutsbeschaffenheit
- Trocknungsluftmenge
- Temperatur und relative Feuchte der Trocknungsluft

Im Allgemeinen ist das Messen des Wassergehaltes einer Hackgutschüttung aufgrund der Inhomogenität des Produktes nur mit viel Aufwand möglich. Die am meisten verwendete Methode zur Messung der Gutsfeuchte von Hackgut stellt die Trockenschrank-Differenzgewichtsmethode dar. Diese Methode ist jedoch aufwändig und das Ergebnis liegt zeitversetzt vor (frühestens nach mehreren Stunden). Daher ist diese Methode für eine kontinuierliche / Online-Messung der Gutsfeuchte nicht geeignet. Für eine kontinuierliche Messung der Gutsfeuchte haben sich vor allem indirekte Verfahren durchgesetzt. In diesem Fall wird nicht der Feuchtegehalt direkt erfasst, sondern andere Größen, von denen über physikalische Zusammenhänge auf die Gutsfeuchte geschlossen werden kann. Nachfolgend sind die für Hackgut in Frage kommenden Messverfahren in Tabelle 2-2 dargestellt. [Kröll & Kast, 1989; Wernecke, 2003]

Tabelle 2-2 Indirekte Verfahren zur Bestimmung der Gutsfeuchte von Hackgut

Quelle: [Wernecke, 2003]

Messverfahren	Messung erfolgt über	Messbereich	Störende Einflussfaktoren
Temperatur-Anstiegs- methode Knickpunkts- methode)	Temperatur- Unterschied zwischen Gut und Trocknungsluft	Bereich unterhalb der Knickpunkts- feuchte	Luftzustand, Flächendichte, spez. Wärmekapazität,
Elektrische Leitfähigkeitsmethode (Widerstandsmethode)	Elektrische Leitfähigkeit des Gutes	Hygroskopischer Bereich des Gutes oberhalb von etwa 3 % Wassergehalt	Innere und äußere Gutseigenschaften, Elektrolytgehalt, Temperatur, Anpressdruck der Elektroden.
Dielektrische Methode	Dielektrizitäts-zahl oder dielektrischer Verlustfaktor	2 bis 70 % Wassergehalts	Stoffliche Zusammensetzung, Dichte, elektrische Leitfähigkeit, Temperatur
Gleichgewichts- feuchtemessung	Wasserein- und -austrag in den Trockner über die relative Luftfeuchte der Zu- und Abluft	-	Volumenstrom, Temperatur, Druck, Leckagen,
Ultraschallmessung	Unterschiedliche Schall-Geschwindig- keiten	-	Dichte, Temperatur

2.3 Trocknungsmethoden

2.3.1 Definition des Trocknens

Trocknung ist das Abtrennen von Feuchtigkeit von einem Trägerstoff. Der Trägerstoff kann fest, flüssig oder gasförmig sein. Die Feuchtigkeit wird entzogen indem sie in Dampf verwandelt und abgeführt wird. Somit ist das Ziel des Trocknens die Herstellung eines trockenen Gutes. Um die Feuchte zu entfernen, muss entweder die Temperatur erhöht werden oder der Partialdruck der feuchten Komponente in der Umgebung abgesenkt werden. [Stichlmair et al., 2005]

Die Trocknungstechnik hat die Aufgabe die Trocknungsmethoden so zu gestalten, dass die Güter mit einem möglichst geringen Aufwand an Energie / Arbeit getrocknet werden, dass die gewünschte Produktqualität erreicht wird. [Kröll & Kast, 1989]

Für einen ersten Überblick der Trocknungsmöglichkeiten kann die in Abbildung 2-8 dargestellte systematische Einteilung herangezogen werden.

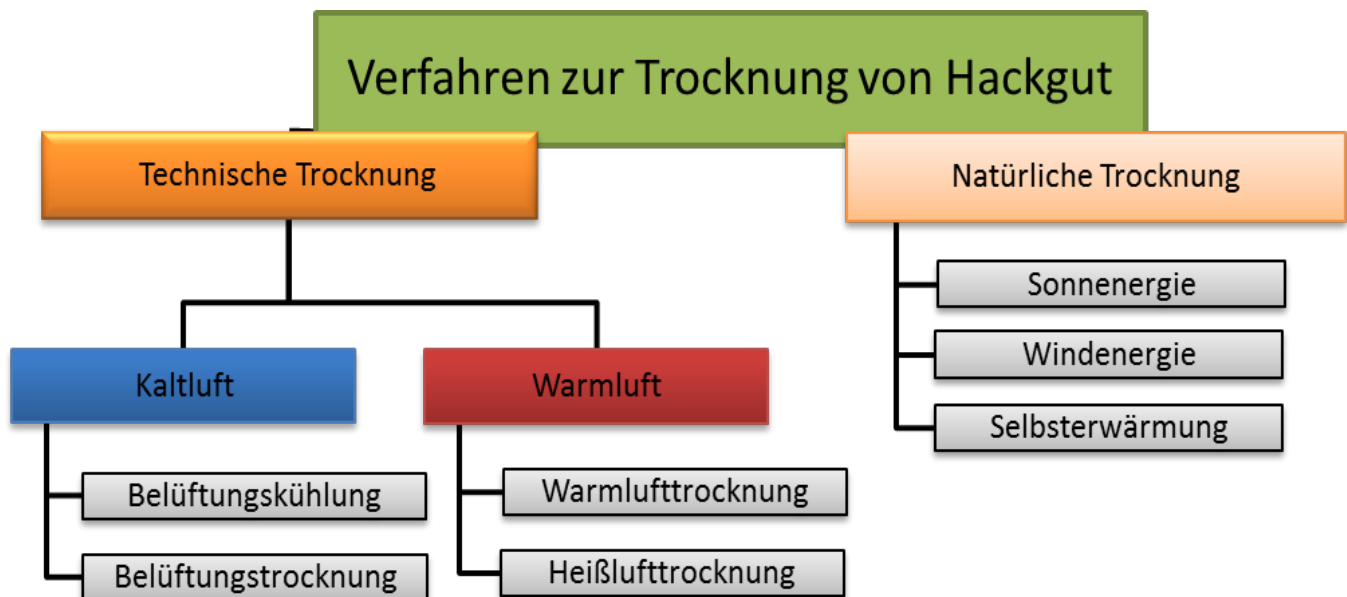


Abbildung 2-8 Verfahren der Hackguttrocknung

Quelle: modifiziert nach [Wild et al., 1999]

2.3.2 Trocknungsverfahren

Die verschiedenen Trocknungsverfahren können anhand der folgenden Merkmale unterschieden werden [Kröll & Kast, 1989]:

- Bewegung der Trocknungsluft
 - o Überstreichen des Hackgutes
 - o Freie Durchströmung
 - o Erzwungene Durchströmung
- Erwärmung der Trocknungsluft
 - o Ohne Erwärmung
 - o Biologische Selbsterwärmung
 - o Sonnenenergie
 - o Sonstige Energiequellen (Abwärme, Zusatzheizungen etc.)
- Wärmezufuhr an das Trockengut
 - o Konvektionstrocknung

- o Kontakttrocknung
 - o Strahlungstrocknung
 - o Elektrische Trocknung
- Entfernen des Dampfes
 - o Lufttrocknung
 - o Vakuumtrocknung
 - o Heißdampftrocknung
- Gutförderung
 - o Mit Gutförderung
 - o Ohne Gutförderung

Als natürliche Trocknungsverfahren werden die Verfahren bezeichnet die ohne technische Einrichtungen für Belüftung und Beheizung auskommen. Trocknungsprozesse mit entsprechenden technischen Hilfsmitteln werden als technische Trocknung bezeichnet.

2.3.3 Stand der Technik: Trocknungsapparate im Allgemeinen

Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, bestehen verschiedene Trocknungsverfahren, die nach ihrer Beschaffenheit, äußeren Form, Menge und geforderten Restfeuchte des Trockengutes ihre spezifischen Vorteile haben. Zu den gebräuchlichsten Trocknertypen gehören die Konvektions- sowie die Kontakttrockner (zu unterscheiden mit oder ohne Gutförderung), welche im Folgenden dargestellt werden. [Christen, 2010]

2.3.3.1 Konvektionstrockner

Beim Konvektionstrockner strömt heißes Gas über oder durch das feuchte Gut, wodurch ein inniger Kontakt zwischen Gut und Gas entsteht. Es gibt drei unterschiedliche Möglichkeiten wie das Gut und das Gas zu einander geführt werden können [Christen, 2010]:

- Gleichstrom
- Gegenstrom
- Kreuzstrom

Bei der Gleichstromtrocknung kommt das feuchte Gut gleich zu Beginn mit dem heißen, trockenen Gas zusammen. Durch die feuchte Oberfläche wird das Gut vor Überhitzung geschützt. Am Ende der Trocknung nähern sich die Temperatur vom getrockneten Gut und dem feuchtebeladenen Gas an. Die Gleichstromtechnologie wird angewandt, wenn

- das trockene Gut gegen hohe Temperatur empfindlich ist,
- das angetrocknete Gut keine hohe Trocknungsgeschwindigkeit verträgt,
- eine gleichmäßige Gutsfeuchte angestrebt wird. [Christen, 2010]

Bei Gegenstromtrocknung trifft das feuchte Gut auf das bereits abgekühlte und befeuchtete Abgas. Der Wärmeübergang an das Gut kann über den gesamten Trocknungsverlauf gleichmäßiger und effizienter erfolgen als bei Gleichstrom. Die Temperatur des Gutes am Ende des Trocknungsweges ist hoch und liegt auf dem Niveau der heißen Frischluft. Diese Variante wird angewandt, wenn

- das Getrocknete nur eine geringe Restfeuchte aufweisen darf,
- das Gut hygroskopisch ist,
- das feuchte Gut nur langsame Trocknungsgeschwindigkeit verträgt,
- das Gut hohe Endtemperaturen aushält. [Christen, 2010]

In Abbildung 2-9 ist der Temperaturverlauf von Luft und Gut bei Gleich- und Gegenstrom zu sehen. Die Temperatur der Luft und des zu trocknenden Gutes nähern sich am Ende des zweiten

Trocknungsabschnittes an. Das Temperaturniveau, bei dem sich beide Temperaturen annähern, ist beim Gegenstrom deutlich höher als beim Gleichstrom.

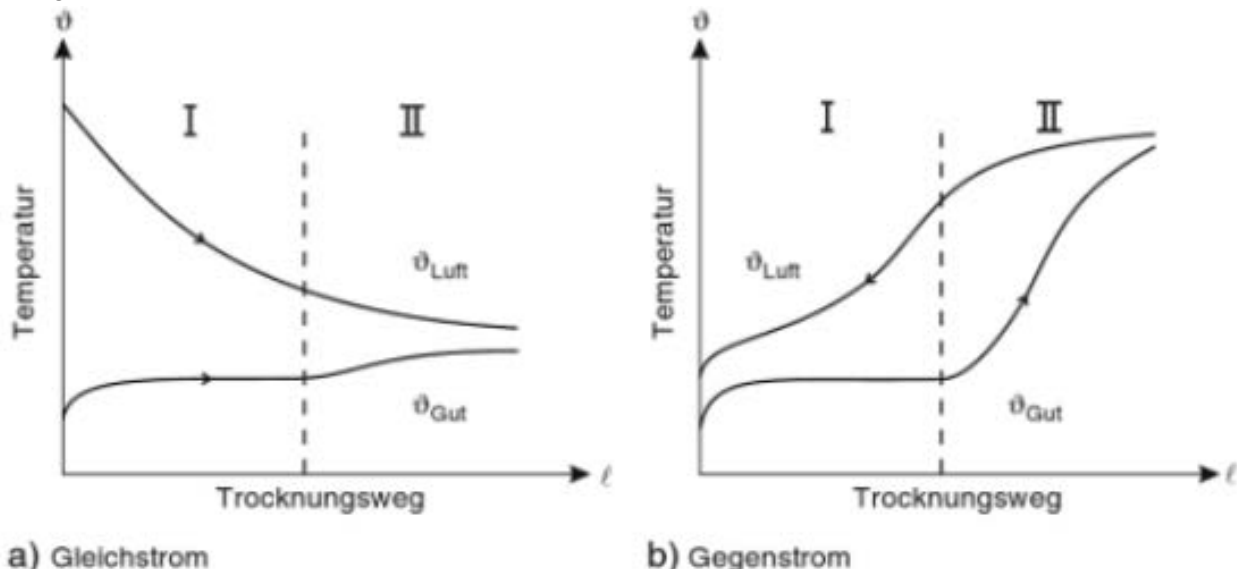


Abbildung 2-9 Temperaturverlauf bei Gleich- und Gegenstrom von Gut und Luft im Konvektionstrockner; I: 1. Trocknungsabschnitt, II: 2. Trocknungsabschnitt

Quelle: [Christen, 2010]

Bei der Kreuzstromtrocknung durchdringt heiße Frischluft das Frischgut senkrecht zu seiner Bewegungsrichtung. Hier kann feuchtes und trockenes Gut direkt mit der heißen, trockenen Luft zusammentreffen. Kreuzstrom wird angewandt, wenn

- das Gut immer eine hohe Trocknungsgeschwindigkeit verträgt,
- das trockene Gut wärmeunempfindlich ist,
- eine hohe Trocknungsgeschwindigkeit wichtig ist. [Christen, 2010]

Folgende Formen von herkömmlichen Konvektionstrocknern bestehen [Christen, 2010]:

- Kammertrockner
- Tellertrockner
- Bandtrockner
- Trommeltrockner
- Wirbelschichttrockner

In kleineren Trocknungsanlagen wird meist der Satzrockner sowie in größeren Trocknungsanlagen der Band- bzw. der Band-Drehrohtrockner eingesetzt. Nachfolgend werden ausgewählte Trocknungsarten näher beschrieben.

Satzrockner

Der Satzrockner ist einer der am meisten eingesetzten Trocknungsanlagen für Biomassebrennstoffe. Das Trocknungsgut befindet sich in Ruhe, während es von unten über einen Belüftungsboden oder über spezielle Luftkanäle belüftet wird. Ideale Luftverhältnisse liegen vor, wenn der gesamte Trocknungsgrund als Lochblech ausgeführt ist. Wird die Luftzufuhr über Schächte realisiert ist darauf zu achten, dass der Kanalabstand nicht größer als die Schütthöhe ist, da es sonst zu unzureichend belüfteten Bereichen in Bodennähe kommen kann. Der Satzrockner kann entweder als Silo, der im Außen- oder Innenbereich aufgestellt werden kann oder als kastenförmiger Einbau bzw. freistehend ausgeführt werden. In der Regel werden verschieden Boxen abgetrennt um

unterschiedliche Chargen unabhängig voneinander trocknen zu können. Aufgrund dessen kann bei Schüttgütern mit hohem Strömungswiderstand die erforderliche Gebläse- und somit die elektrische Anschlussleistung so gering wie möglich gehalten werden. Eine Möglichkeit zur Optimierung des Satzrockners stellt die geregelte Rezirkulation der noch nicht gesättigten Trocknungsluft dar. Vor allem gegen Ende der Trocknung kann dadurch die Ausnutzung der zugeführten Wärme deutlich verbessert werden. Hierfür muss der Trockner jedoch absolut dicht ausgeführt sein, um eine geregelte Zuführung von Abluft zur Trocknungsluft gewährleisten zu können. Satzrockner haben des Weiteren den Vorteil, dass sie leicht be- und entladen werden können. Es sind abhängig von der Bauart praktisch keine Einschränkungen zu erwarten. Für die Erzeugung des Luftstromes kommen Axial- und Radialgebläse zum Einsatz. Radialgebläse werden vor allem bei größerer Trocknungsleistung, wo es auf eine stabile und hohe Druckerzeugung ankommt, eingesetzt. Es gilt jedoch zu beachten, dass Radialgebläse eine höhere Geräuschentwicklung aufweisen. Nachfolgend ist in Abbildung 2-10 ein typischer Satzrockner dargestellt. In diesem Fall wird die Trocknungswärme durch einen gasbefeuchten Kessel bereitgestellt und über ein Radialgebläse in den Trockenbehälter gepresst. In Abbildung 2-11 befindet sich das Schaltbild einer Satzrocknungsanlage. [Kaltschmitt & Hartmann, 2009]

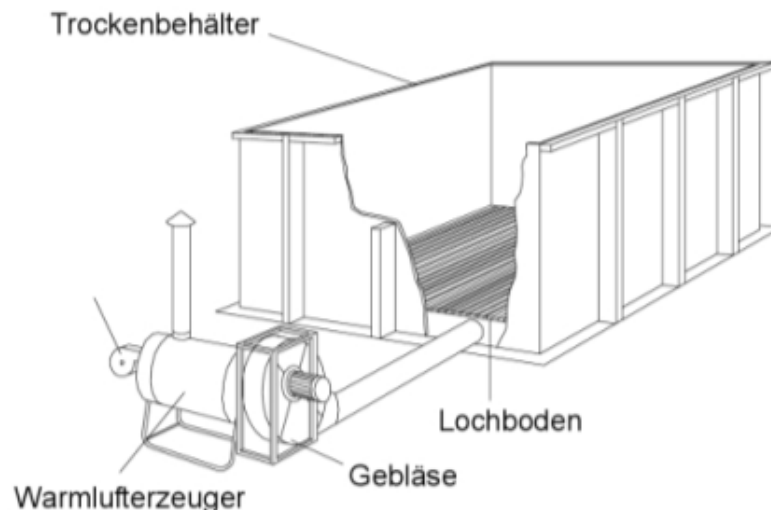


Abbildung 2-10 Grundaufbau eines Satzrockners

Quelle: [Kaltschmitt & Hartmann, 2009]

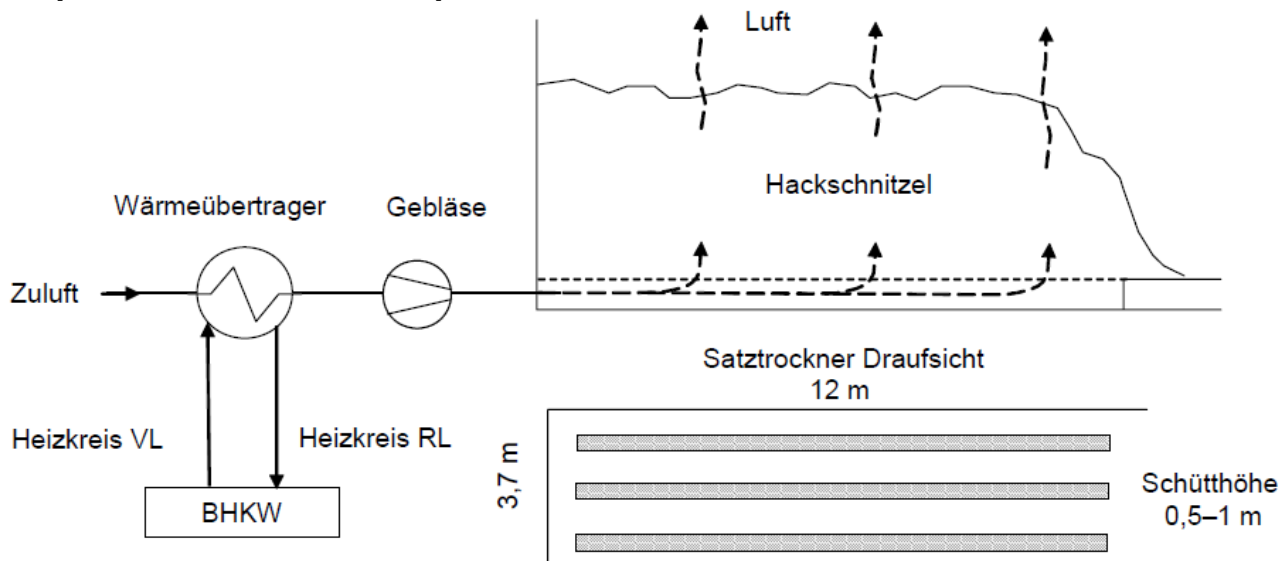


Abbildung 2-11 Schaltbild einer Satzrocknungsanlage

Quelle: [Gaderer et al., 2007]

Bandrockner:

Beim Bandrockner handelt es sich um ein luftdurchlässiges umlaufendes Trocknerband auf welchem das Trocknungsgut transportiert wird. Der Warmluftstrom wird durch das Trocknerband auf das zu trocknende Hackgut geleitet. Das feuchte Gut wird über Förderbänder zugeführt und mittels Schneckenverteiler oder Verteilerrechen gleichmäßig auf dem Band ausgebreitet. Über die Geschwindigkeit des Bandes kann die gewünschte Endfeuchte des Trocknungsgutes bestimmt werden. Um eine kontinuierliche Trocknung zu gewährleisten ist es notwendig, dass das Band in regelmäßigen Abständen mittels Bürsten oder Druckluft gereinigt wird. Bandrockner können als verschiedene Varianten ausgeführt werden. So genannte Einbandrockner bestehen aus einem einzelnen Trocknerband, welches über die gesamte Transportlänge läuft. In Abbildung 2-12 ist die Funktionsweise eines Einbandrockners dargestellt. Beim Mehrbandrockner werden mehrere übereinander arbeitende Trocknungsbänder verwendet. Diese sind serpentinenförmig angeordnet und übergeben das Trockengut auf dem jeweils darunterliegenden Band, wodurch eine zusätzliche Durchmischung des Trocknungsgutes erreicht wird. [Kaltschmitt & Hartmann, 2009]

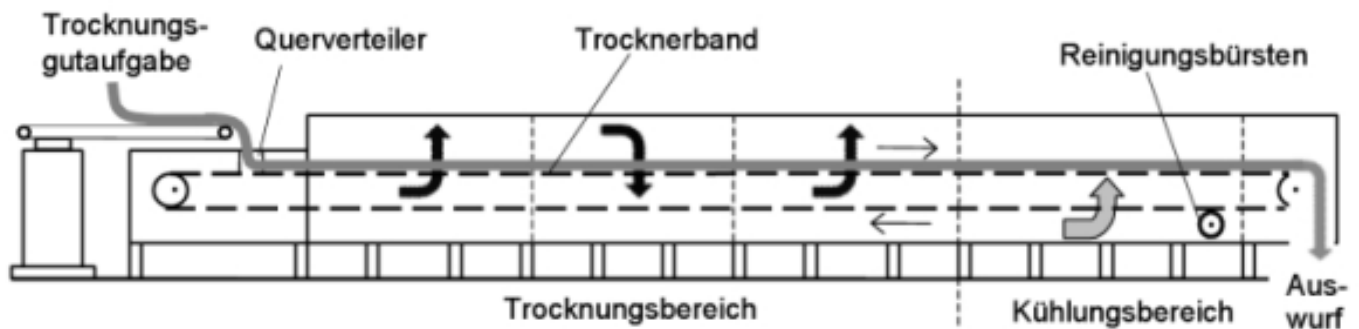


Abbildung 2-12 Funktionsweise eines Einbandrockners

Quelle: [Kaltschmitt & Hartmann, 2009]

Drehrohrrockner:

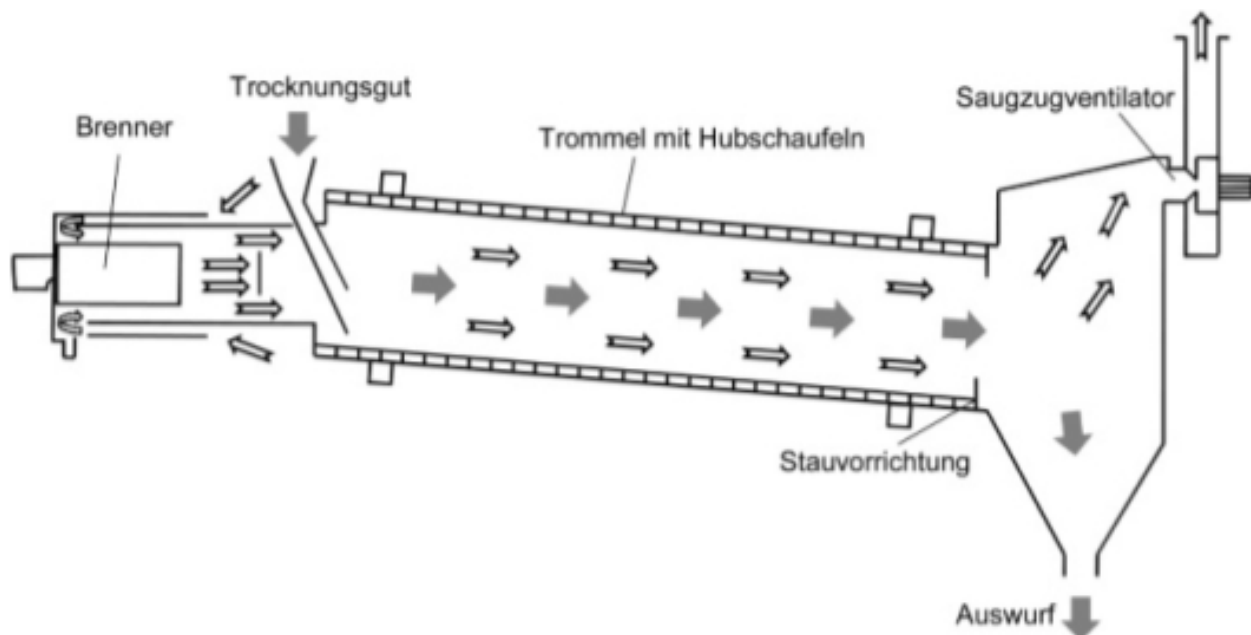


Abbildung 2-13 Funktionsweise Drehrohrrockner

Quelle: [Kaltschmitt & Hartmann, 2009]

Der Drehrohtrockner stellt eine Variante der Durchlauftrockner dar. Das zu trocknende Gut wird hierbei durch das Innere einer leicht geneigten Trommel geleitet, die mit etwa 1 bis 10 Umdrehungen pro Minute rotiert. Durch diese Rotation sowie die im Gleichstrom eingebrachte Trocknungsluft, welche auch eine Mischung aus Abgasen und Luft mit bis zu 600 °C sein kann, wird das Trockengut durch die Trommel bewegt. Die Durchmesser der Trommel betragen zwischen 2,4 und 4 Metern. Das vorteilhafte Durchmesser/Längenverhältnis beträgt 1:5. Um eine gute Durchmischung zu ermöglichen sind im Trommelinneren meist Hubschaufeln angebracht, die das Trockengut anheben und durch den Querschnitt des Drehrohres fallen lassen. Die Verweilzeit im Trockner ist von der Rotation, dem Luftmassenstrom sowie den Anforderungen an den Trocknungsgrad abhängig. Drehrohtrockner stellen aufgrund der hohen Trocknungstemperaturen und des hohen Durchsatzes die leistungsstärkste Trocknungstechnologie dar. Abbildung 2-13 stellt die bereits beschriebene Funktionsweise eines Drehrohtrockners dar. [Kaltschmitt & Hartmann, 2009]

Solare Hackguttrocknung

Eine innovative Form eines Konvektionstrockners stellt die solare Hackguttrocknung dar. Dabei wird das Hackgut von unten her großflächig meist über einen Schrägrost mit erwärmter Luft durchströmt. Diese Luft wird in einem speziellen Solarluftkollektor erwärmt und dann zum Hackgut geleitet. Der Vorteil dieses Systems ist, dass keine zusätzlichen Wärmetauscher notwendig sind und auch keine Gefrier-, Verdampfungs- oder Dichtheitsprobleme bestehen. Ein Vorteil des Systems ist auch die raschere Trocknung, da erwärmte Luft mehr Wasser aufnehmen kann als Luft mit Umgebungstemperatur. Daneben ist der schräge Trocknungsboden ein Vorteil. Zum einen ist das trockene Hackgut von diesem leicht zu entnehmen. Zum anderen kann das Hackgut durch den schrägen Siebboden großflächig durchströmt werden. Dadurch ist ein geringerer Druckaufbau notwendig, was den Einsatz von energiesparenden Axial-Ventilatoren ermöglicht und die Energiekosten gering bleiben. Abbildung 2-14 zeigt dieses Trocknungsschema. [CONA, 2011]

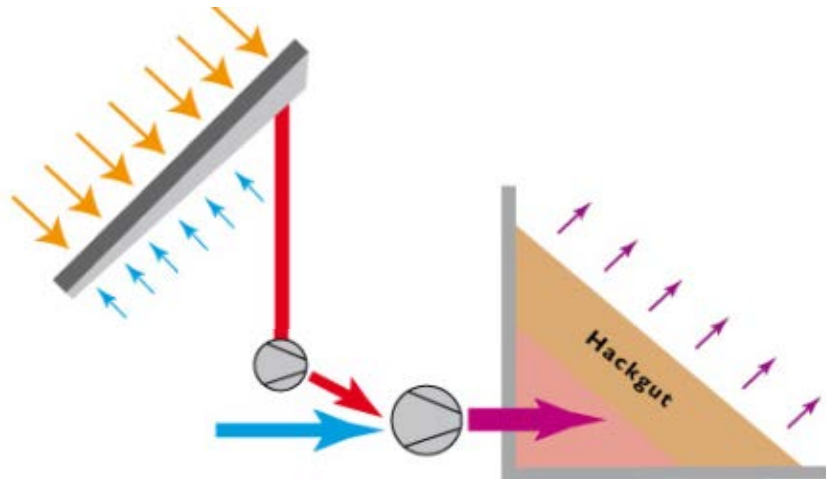


Abbildung 2-14 Schema der solaren Hackguttrocknung

Quelle: [CONA, 2011]

2.3.3.2 Kontakttrockner

Der Kontakttrockner spielt eine untergeordnete Rolle in der Hackguttrocknung. Beim Kontakttrockner steht das feuchte Gut direkt in Kontakt mit einer beheizten Fläche. Das Lochblech wird von warmer Luft durchströmt und erwärmt die darüber liegende Hackgutschicht. Um die Verdampfung bei der Trocknung zu begünstigen wird häufig Vakuum eingesetzt. [Christen, 2010]

2.3.4 Gegenüberstellung ausgewählter Hackguttrocknungssysteme

Nachfolgend werden ausgewählte Anlagen zur Trocknung von Hackgut hinsichtlich Funktion, Vor- und Nachteilen näher beschrieben, welche aktuell am Markt erhältlich sind und dem Stand der Technik entsprechen. Der Fokus liegt auf Anlagen, die für die Hackguttrocknung an einem Heizwerk, sinnvoll eingesetzt werden können. Diese werden in zwei Kategorien eingeteilt:

- Konvektionstrocknung ohne Güterförderung
- Konvektionstrocknung mit Güterförderung

2.3.4.1 Konvektionstrockner ohne Güterförderung

Beim Konvektionstrockner ohne Güterförderung erfolgt die Trocknung durch die Durchströmung mit warmer Luft, welche das Hackgut erwärmt und diesem die Feuchtigkeit entzieht. Der Wärmeübergang basiert auf der Konvektion. Das zu trocknende Gut wird nicht befördert, sondern ruht während der Trocknung. Der Prozess erfolgt in einzelnen Chargen (Batchbetrieb).

2.3.4.1.1 Anlage 1: Trocknungscontainer

Bei Anlage 1 handelt es sich um einen Trocknungscontainer. Dieser wird nicht nur für die Trocknung verwendet, sondern dient auch der Lagerung und dem Transport des Hackgutes, wodurch die Hackgutlogistik und – manipulation erleichtert wird. [Enercont, 2011(a)]

Funktionsweise: Bei diesem System (Abbildung 2-15) handelt es sich um einen Container, welcher mit Hackschnitzel gefüllt wird. Durch einen Lochboden (Abbildung 2-16) wird überschüssige warme Luft durch den Container geblasen. Dadurch wird das Hackgut getrocknet. Es handelt sich um einen Konvektionstrockner ohne Durchlaufsystem. Die Energie wird aktuell meist von Biogasanlagen durch Überschusswärme zur Verfügung gestellt. Das System kann auch im Niedertemperaturbereich von 40 bis 45°C betrieben werden, wobei die Luft bei diesem Niveau trocken sein muss und ein dementsprechender Luftaustausch erfolgen muss. [Enercont, 2011(b)]



Abbildung 2-15 Container

Quelle: [Enercont, 2011 (b)]

Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 2-16 Innenraum von Container mit Lochboden

Quelle: [Enercont, 2011(b)]

2.3.4.1.2 Anlage 2: Trocknungsbox

Das System der Trocknungsbox ist ein ähnliches System, wie Anlage 1, wobei eine Trocknungsbox fix an einem Ort installiert ist und nicht flexibel transportierbar ist.

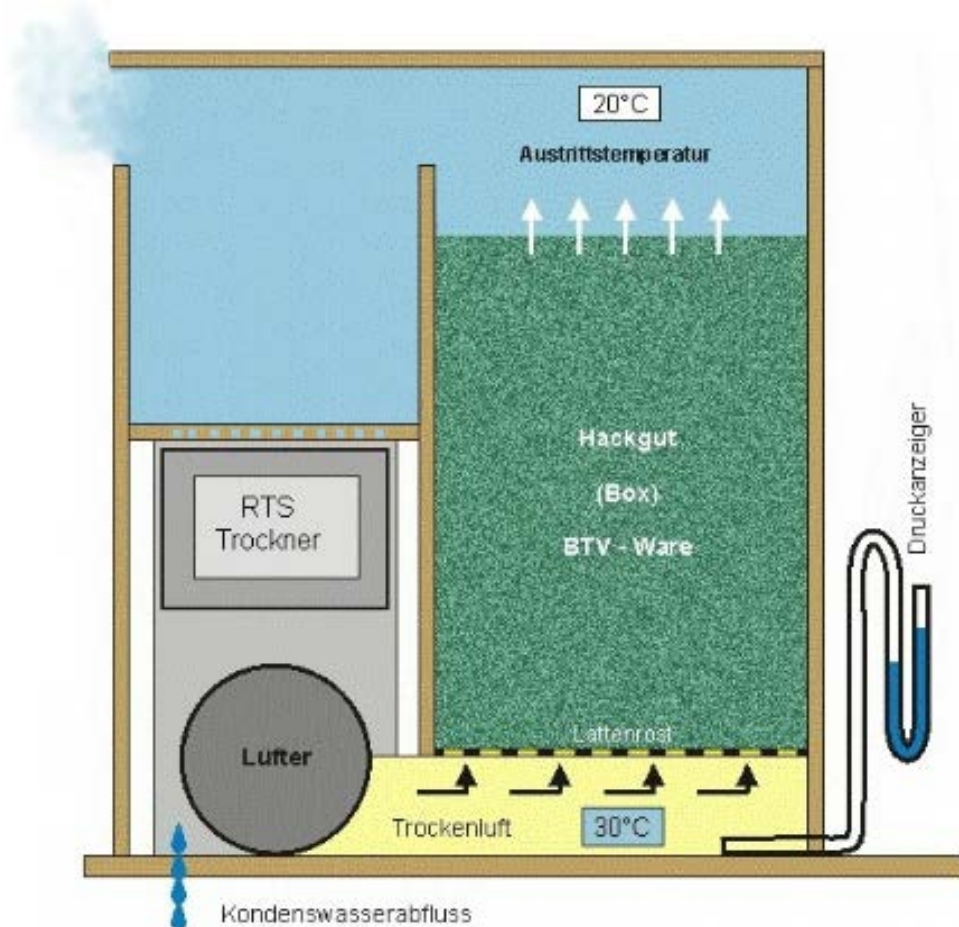


Abbildung 2-17 Trocknungsbox Schema

Quelle: [RTS, 2011(a)]

Funktionsweise: Die Trocknungsboxen (Abbildung 2-17) bestehen aus einem Rostboden oder einem Luft-Schlitzboden. Unter diesem Boden wird Trockenluft eingeblasen, die den feuchten Hackschnitzeln beim Durchströmen die Feuchte entzieht. Das System eignet sich für die Trocknung von äußerst feuchtem Hackgut, welches beispielsweise aus der Baumtotalverwertung (BTV: Neben dem Stammholz werden auch Äste, Zweige, Blätter und Nadeln verhackt) entsteht. [RTS, 2011(a)] Eine Besonderheit dieses Systems ist die hocheffiziente Wärmepumpe, welche explizit auf die Hackguttrocknung abgestimmt wurde und dadurch einen höheren COP als konventionelle Fabrikate erreicht. Laut [RTS, 2011(b)] bringt der Einsatz dieser speziellen Wärmepumpe eine wesentliche Reduktion der Trocknungskosten.

2.3.4.2 Konvektionstrockner mit Güterförderung

Die nachfolgenden Konvektionstrocknungsanlagen befördern das Gut während der Trocknung (Durch- bzw. Umlaufsysteme), welches konvektiv über die durchströmende Luft getrocknet wird.

2.3.4.2.1 Anlage 3: Bandtrockner

Bei Anlage 3 handelt es sich um einen Bandtrockner, welcher meist in einem Temperaturbereich von 80 bis 95°C arbeitet, aber auch im Niedertemperaturbereich zwischen 40 bis 45°C betrieben werden kann. Die spezifische Verdampfungsleistung nimmt jedoch im niedrigeren Temperaturbereich ab und der elektrische Verbrauch überdimensional zu. [Stela, 2011]

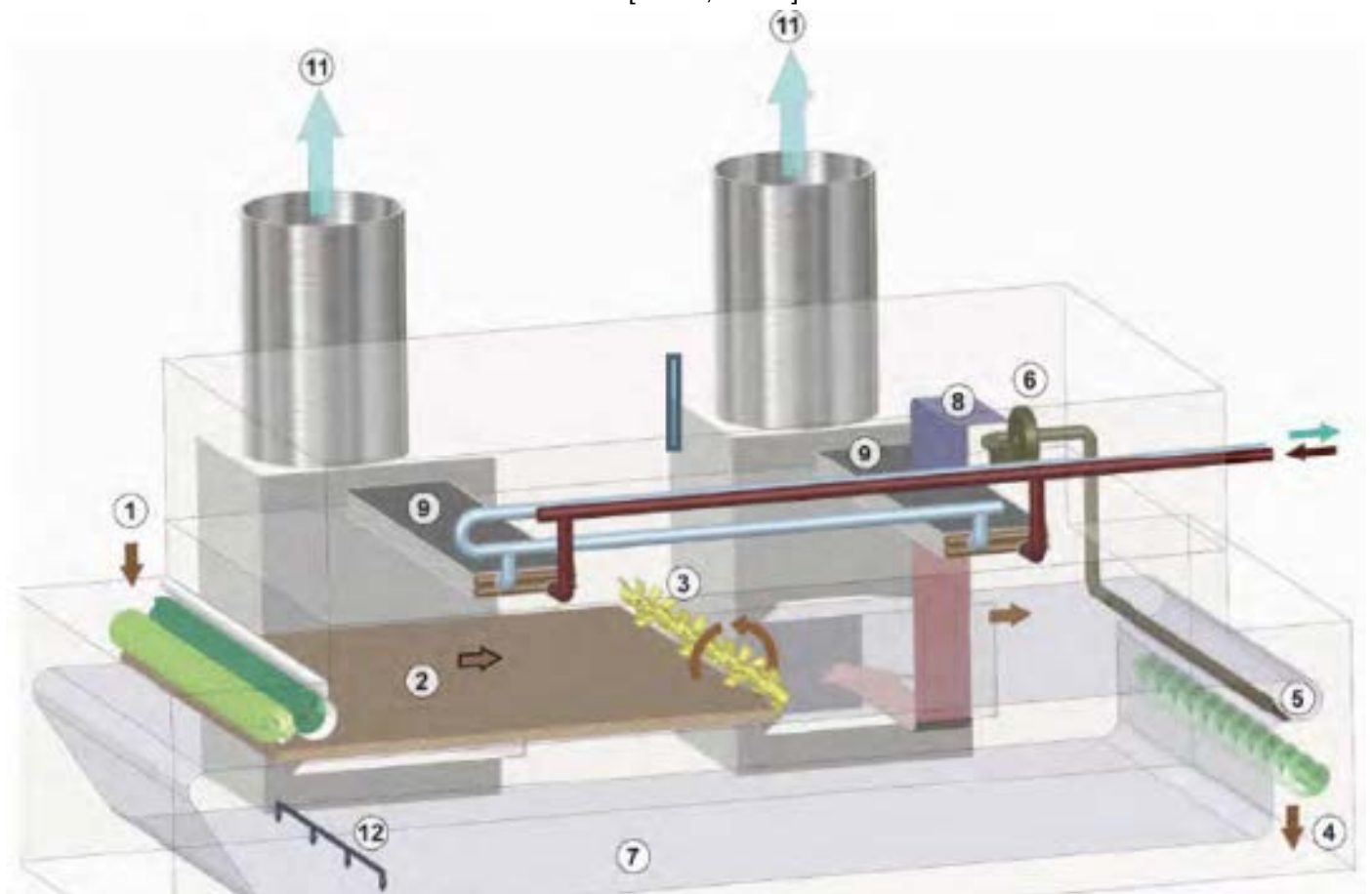


Abbildung 2-18 Funktionsschema des Bandtrockners

Quelle: [Stela, 2011]

Anmerkungen: 1...Aufgabestation, 2...Produkt, 3...Wendeeinrichtung, 4...Austragungsschnecke, 5...Bandreinigung (trocken), 6...Ventilator für Bandreinigung, 7...Gewebeband, 8...Frischlufteinlass, 9...Wärmetauscher, 10...Wärmeversorgung, 11...Abluft, 12...Nassreinigung

Funktionsweise: In Abbildung 2-18 ist das Funktionsschema des Bandrockners dargestellt. Von der Aufgabestation (1) wird das zu trocknende Gut in den Trockner gebracht und über (2) anschließend auf dem Fließband weiter transportiert. In (3) wird das Gut zur besseren Durchmischung gewendet. Diese Durchmischung garantiert auch eine gleichmäßigere Endfeuchte sowie eine bessere Durchlüftung des Produktes. Über das Fließband wird das Gut weiter zur Austragsschnecke (4) transportiert, wo es aus dem Trockner befördert wird. In (5) wird das Band mit Hilfe eines Ventilators getrocknet und anschließend gereinigt (6). (7) stellt das Gewebepband dar, auf dem das zu trocknende Gut transportiert wird. Über (8) wird die Frischluft über zwei Wärmetauscher (9) in den Trockner geleitet. Über (11) wird die Abluft aus dem Trocknersystem befördert. Unter (12) ist die Vorrichtung für die Nassreinigung des Bandes zu sehen. Mit Durchsatzleistungen von ungefähr 1 bis 50 t/h werden diese Großanlagen im industriellen Bereich verwendet. Die Verweilzeit des Materials im Trockner liegt zwischen 8 und 15 Minuten. [Stela, 2011]

2.3.4.2.2 Anlage 4: Trommeltrockner

Diese Anlage arbeitet mit einem Trommeltrockner, in dem das Hackgut getrocknet wird. Es können sowohl große als auch kleinere Trommeltrockner (von 0,25 bis 2 m³/h) eingesetzt werden.

Funktionsweise: Der Trommeltrockner arbeitet im Durchlaufbetrieb mit einem Heizmedium im Temperaturbereich von 80 – 95°C. Als Heizmedium kann Warmwasser, Dampf, Thermoöl oder direkt eingeleitete Warmluft verwendet werden. [Eberl GmbH, 2011(a)] In Abbildung 2-19 ist das Funktionsschema dargestellt. Die Hackschnitzel werden aus einem Behälter mit einer Schnecke in die Trommel befördert und durchlaufen diese dann. Von der gegenüberliegenden Seite wird warme, trockene Luft eingeblasen, welche zunehmend abkühlt. Diese gibt Wärme an das Hackgut ab und nimmt die Feuchtigkeit aus dem Hackgut auf. [Eberl GmbH, 2011(b)]

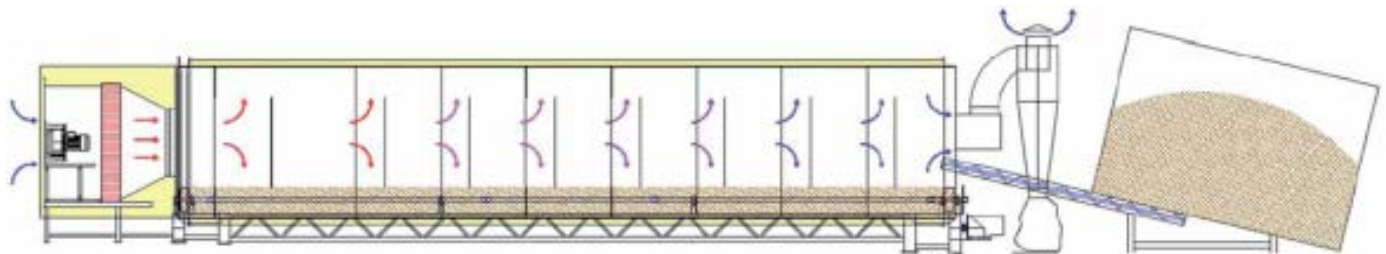


Abbildung 2-19 Funktionsschema des Trommeltrockners

Quelle: [Eberl GmbH, 2011(b)]

2.3.4.3 Vergleich der ausgewählten Trocknungsanlagen

In diesem Kapitel werden die dargestellten ausgewählten Trocknungsanlagen nach der Hackgutmanipulation und Betriebsweise, ihren Vor- und Nachteilen sowie den Kosten verglichen.

2.3.4.3.1 Vergleich der Hackgutmanipulation und Betriebsweise

In der Tabelle 2-3 werden die Trocknungstechnologien hinsichtlich Hackgutmanipulation und Betriebsweise gegenüber gestellt. Bei Anlage 1 wird die Hackgutmanipulation durch die Benützung der Container erleichtert. Dadurch kann das Hackgut gleich bei der Produktion in die Container gefüllt werden. In diesen kann es dann transportiert, gelagert und getrocknet werden, wodurch die Hackgutmanipulation erleichtert wird. Die Trocknungsboxen (Anlage 2) benötigen eine etwas aufwendigere Hackgutmanipulation. Hier muss die Box immer wieder neu befüllt und entleert werden. Dies kann mittels Radladern oder Kränen geschehen. Dazu ist stets ein eigenes Personal nötig (manueller Betrieb). Systeme mit Güterförderung (Anlagen 3 und 4) werden meistens automatisch über bestimmte Fördereinrichtungen (z. B. Förderbänder oder Förderschnecken)

bestückt und entleert. Ist dies nicht der Fall muss auch hier eigenes Personal für die Befüllung und Entleerung eingesetzt werden.

Hinsichtlich der Gegenüberstellung der Betriebsweise arbeiten die ausgewählten Systeme zu mindest semi-automatisch. Dies bedeutet, dass die Befüllung teilweise manuell erfolgen muss, jedoch der Trocknungsvorgang (meist ungeregelt) automatisch von Statten geht.

Tabelle 2-3 Vergleich der Hackgutmanipulation und der Betriebsweise

Quelle: [eigene Darstellung]

Anlage	Hackgutmanipulation	Betriebsweise
1-Trocknungscontainer	Container kann für Transport, Trocknung und Lagerung verwendet werden	semi-automatisch
2-Trocknungsbox	Trocknungsbox muss mittels Kran oder Radlader befüllt und entleert werden	semi-automatisch
3-Bandtrockner	Trockner wird automatisch bestückt und entleert	vollautomatisch
4-Trommeltrockner	Trockner wird automatisch über eine Schnecke beschickt und entleert	vollautomatisch

2.3.4.3.2 Vergleich nach Vor- und Nachteilen

In Tabelle 2-4 sind die Vor- und Nachteile der ausgewählten Trocknungsanlagen aufgelistet. Systeme mit Güterförderung sind signifikant komplexer hinsichtlich Errichtung und optimalen Betrieb. Diese Systeme benötigen einen höheren Wartungsaufwand, sind störanfälliger und benötigen mehr Platz. Bei Systemen mit Güterförderung wird das zu trocknende Gut während der Trocknung stets durchmischt und dadurch entsteht keine Kondensationszone (gleichmäßiger Trocknungsverlauf). Auch können diese Systeme vollautomatisch betrieben werden. Bei den Anlagen ohne Güterförderung liegt die Trocknungsdauer meist im Bereich von Tagen oder Wochen, wohingegen können die Konvektionstrockner mit Güterförderung meist schneller trocknen.

Tabelle 2-4 Vor- und Nachteile der einzelnen Trocknungsanlagen

Quelle: [eigene Darstellung]

Anlage	Vorteile	Nachteile
1-Trocknungs-container	+ Platzersparnis durch die mehrfache Nutzung des Containers + einfache Handhabung und Wartung des Systems + geringe notwendige Bauarbeiten zur Errichtung des Systems + kostengünstige Errichtung des Systems + geringere Personalkosten für Hackgutmanipulation	– keine Durchmischung des Hackgutes während der Trocknung (Kondensationszone)
2-Trocknungs-box	+ wenige bauliche Maßnahmen notwendig + einfache Handhabung und Wartung des Systems + einfache Nachrüstung / Integration möglich + einfache Steuerung des Systems	
3-Bandtrockner	+ gute Durchmischung des Hackgutes während der Trocknung + Beschickung und Abfuhr automatisch geregelt	– Komplexeres / aufwendigeres System → höherer Errichtungsaufwand, -kosten, höhere Anfälligkeit auf Störungen und Ausfälle – mehr Platzbedarf
4-Trommeltrockner	+ gute Durchmischung des Hackgutes während der Trocknung + automatische Beschickung mit Hackgut	

2.3.4.3.3 Vergleich der Kosten

In diesem Abschnitt werden die Kosten der ausgewählten Anlagen verglichen. Der Vergleich kann jedoch nur qualitativ und sehr grob erfolgen, da allgemeine Aussagen über die Kosten nicht möglich sind. Jede Anlage muss auf das jeweilige Einsatzgebiet und die Rahmenbedingungen abgestimmt werden, wodurch die Kosten stark differieren können. In Tabelle 2-5 werden die Investitions- und Betriebskosten der unterschiedlichen Anlagen verglichen und qualitativ bewertet.

Tabelle 2-5 Vergleich der Investitions- und Betriebskosten

Quelle: [eigene Darstellung]

Anmerkungen: + ...im Vergleich höhere Kosten; +-...mittlere Kosten; -...geringe Kosten

	Investitionskosten	Betriebskosten
Anlage 1	-	+
Anlage 2	-	+-
Anlage 3	+-	+-
Anlage 4	++	--

Anlagen, die mit einer Güterförderung arbeiten, sind tendenziell teurer in der Anschaffung, da es sich um komplexere (und größere) Systeme handelt.

Für den Vergleich der Betriebskosten müssen unterschiedliche Faktoren berücksichtigt werden. Wichtige Faktoren sind die Kosten für die Hackgutmanipulation und den Energieverbrauch (Strom und Wärme). Anlagen 1 weist aufgrund der tendenziell geringeren Trocknungsmengen höhere spezifische Betriebskosten auf. Da das Hackgut während der gesamten Logistikkette in dem Container bleiben kann, sind jedoch geringe Personalkosten für die Befüllung und Entleerung der Trocknungsanlage, Umschichtungen oder Umlagerungen nötig. Anlage 2 arbeitet mit einer Trocknungsbox. Hier sind die spezifischen Stromkosten durch mittlere Trocknungsmengen im mittleren Bereich anzusiedeln. Die Kosten für die Hackgutmanipulation liegen im oberen Bereich, da die Trocknungsbox manuell befüllt und entleert werden muss. Die Anlagen 3 und 4 sind im mittleren bzw. unteren Bereich der Betriebskosten anzusiedeln. Durch die automatische Befüllung und Entleerung des Trockners treten geringe Personalkosten auf. Jedoch sind diese Systeme zur automatischen Befüllung und Entleerung aufwendiger in der Wartung.

Durch Betrachtung der oben stehenden Argumente kann festgehalten werden, dass die Feststellung des optimalen Systems stets im Einzelfall geprüft werden muss.

2.4 Hackgutlogistik im Kontext der Hackguttrocknung

Hackgutlogistik im Kontext der Hackguttrocknung bezieht sich auf den Transport und die Logistik, welche nachfolgend näher beschrieben werden.

2.4.1 Transport

Ziel beim Transport des Hackgutes ist die zeitliche und räumliche Distanz zwischen dem Anfallsort der Biomasse und dem Ort der Weiterbehandlung möglichst effizient und verlustfrei zu überbrücken. Der Transport erfolgt meist mit Fahrzeugen. Dabei wird das Hackgut vom Anfallsort zum Trocknungsort transportieren und nach der Trocknung zum Kunden bzw. für die Weiterverwendung befördert. Es bestehen unterschiedliche Möglichkeiten des Fahrzeugtransportes. Diese Formen unterscheiden sich durch den Transport mit verschiedenen Fahrzeugarten bzw. Aufbauten. Beispielsweise ist für die Containertrocknung der Hackguttransport in Containern oder in

unterschiedlichen Kippen vom Anfallsort von Bedeutung. Der Transport zum Kunden erfolgt meist mit einem Pumpwagen. [Kaltschmitt & Hartmann, 2001]

2.4.2 Hackgutmanipulation

Der Fokus der Hackgutmanipulation im Kontext der Trocknung zielt auf die Prozesse ab, welche vor- und nachgelagert sowie während der Trocknung notwendig sind. Die Hackgutmanipulation erfolgt mittels automatischen Förder- bzw. Austragungseinrichtungen, wobei das Hackgut innerhalb verschiedener Bearbeitungsschritte transportiert wird (inkl. Ein- und Auslagerung). Für diese Zwecke gibt es unterschiedliche Techniken. Man unterscheidet Lagerein- und -austragssysteme sowie Fördersysteme.

Die Lagerein- und -austragssysteme dienen der automatisierten Beschickung bzw. Entnahme von Brennstoffen aus einem Lager in die Trockenboxen oder -kammern. Die Trocknungsboxen können auch mit Radladern befüllt und entleert werden. Auch die Umschichtung vom Hackgut erfolgt meist unter zur Hilfenahme von Radladern.

Bei den Fördersystemen von Hackgut kann zwischen pneumatischen und mechanischen Systemen unterschieden werden. Bei den pneumatischen Systemen wird als Transportmedium ein Luftstrom (mittels Gebläsen) eingesetzt, bei mechanischen Systemen wird das Fördergut entweder durch Berührung mitgerissen (z. B. Elevatoren, Schnecken od. Schieber) oder ohne Schlupf und ohne Reibung transportiert (z. B. Förderband) bzw. durch Schwingungen der Transportebene einem Vorwärtsimpuls ausgesetzt (z. B. Schwingförderer). Es bestehen auch Kombinationen. Die Wahl der Technik hängt von der Größe, Lagerart, Form und vom Brennstoff ab. [Kaltschmitt & Hartmann, 2001]

3 Auswertungs- und Analyseergebnisse der Labormessungen

3.1 Darstellung der allgemeinen Trocknungscharakteristik

Um die allgemeinen Trocknungsvorgänge bei der Hackguttrocknung darstellen zu können werden in weiterer Folge die Ergebnisse von zwei unterschiedlichen Trocknungen dargestellt. Hierbei handelt es sich um Versuchsserien mit dem gleichen Material (ungesiebt) und den in Tabelle 3-1 dargestellten Trocknungslufttemperaturen und Luftmassenströmen.

Tabelle 3-1 Messungen zur Bestimmung der allgemeinen Trocknungscharakteristik

Messung	Trocknungslufttemperatur [°C]	Trocknungsluftmassenstrom [m ³ /h]
Test 1	20	500
Test 2	40	1.000

Für die Messungen wurden die in Tabelle 3-2 dargestellten Parameter eingestellt bzw. aufgezeichnet. Bei den Trocknungsparametern handelt es sich um Durchschnittswerte über die gesamte Trocknung, wobei vor allem die Außentemperatur sowie die Außenluftfeuchte bei längeren Trocknungsversuchen leichten Schwankungen unterworfen sind.

Tabelle 3-2 Trocknungsparameter zur Darstellung der allgemeinen Trocknungscharakteristik

Aufgezeichnete Parameter	Test 1	Test 2
Trocknungsparameter		
Trocknungstemperatur [°C]	20,00	39,61
Trocknungsluftfeuchte [%]	28,27	5,69
Luftmassenstrom [m ³ /h]	571,41	997,59
Außentemperatur [°C]	3,98	-2,51
Außenluftfeuchte [°C]	81,39	79,53
Trocknungsdauer		
Trocknungsdauer [min]	2.759,00	441,00
Trocknungsdauer [h]	45,98	7,35
Auswertung		
Startgewicht [kg]	126,82	121,17
Gewichtsverlust Wägezelle [kg]	51,51	47,32
Wassergehalt [Trocknungssofen]		
Start [%]	44,40	43,20
Ende Höchstwert [%]	19,17	37,00
Ende Tiefstwert [%]	6,64	3,90
Wassergehalt [Wägezelle]		
Endwassergehalt Gesamt [%]	6,37	6,81
Wirkungsgrad		
Energiemenge_eingebracht_th [kWh]	145,87	99,09
Wirkungsgrad_th [%]	24,13	37,46
Energiemenge_th je kg Wasserverlust [kWh/kg]	2,83	2,09

Die Darstellung der allgemeinen Trocknungscharakteristik für beide Versuche erfolgt anhand der Aufzeichnung folgender Verläufe:

- Verlauf der Temperatur und der relativen Luftfeuchte
- Verlauf der Wasseraufnahme
- Verlauf der mittleren, relativen Luftfeuchte und des Hackgutwassergehalts
- Verlauf des Wirkungsgrades der Trocknung

Die nachfolgend dargestellten Verläufe und Zusammenhänge sind repräsentativ für die voreingestellten Trocknungsparameter. Dies konnte durch mehrfache Messungen mit gleichen Parametern bestätigt werden.

3.2 Verlauf der Temperatur und der relativen Luftfeuchte

Beispiel 1: Trocknungsversuch: 20 °C Trocknungslufttemperatur und 500 m³/h Luftmassenstrom

Nachfolgend ist in Abbildung 3-1 der Verlauf der Temperaturen und der relativen Luftfeuchte für den Versuch 1 dargestellt.

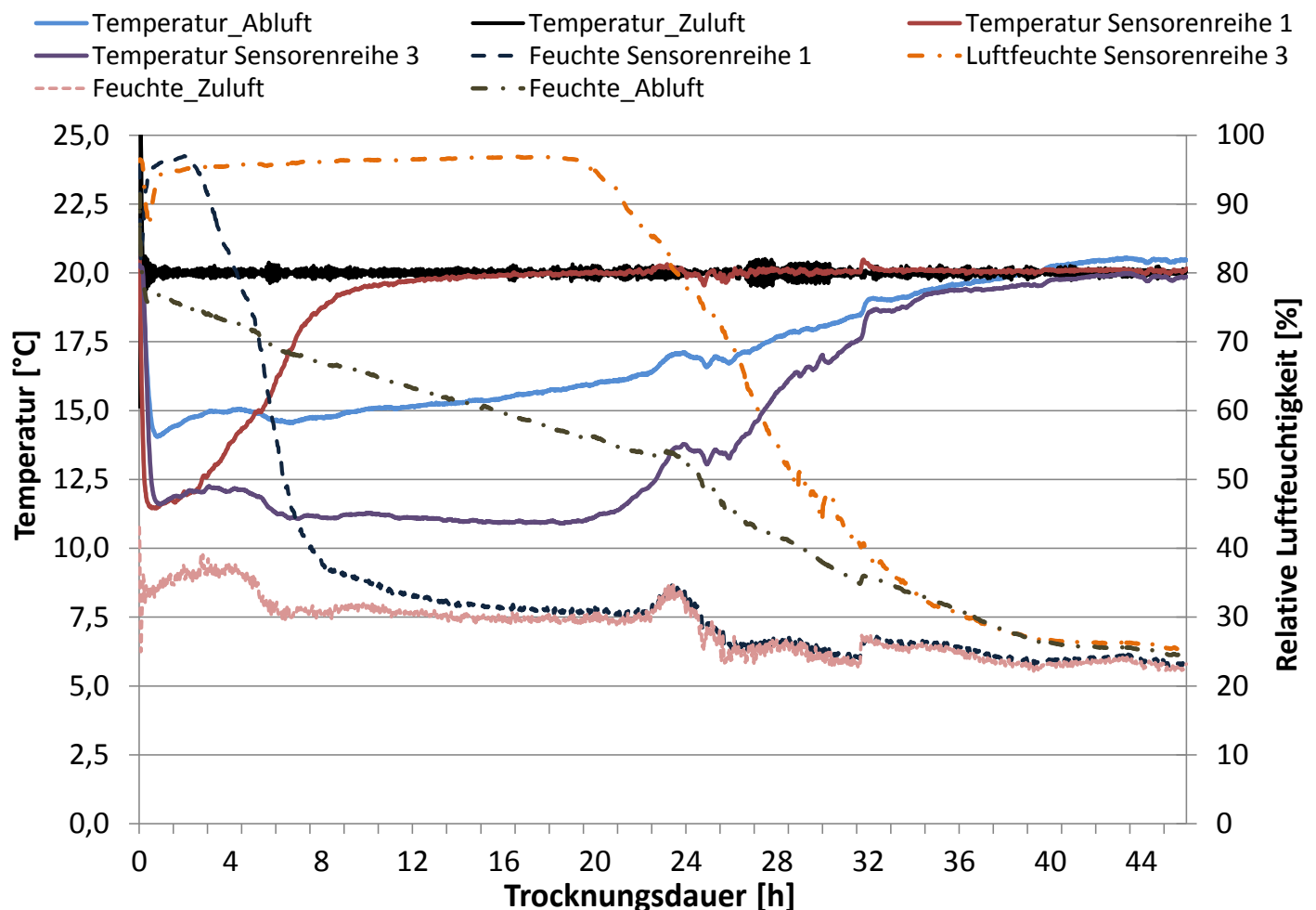


Abbildung 3-1 Verlauf der Temperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit bei einer Trocknungstemperatur von 20 °C und einem Luftmassenstrom von 570 m³/h

Anmerkung: Trocknungsluft strömt von unten (Sensorreihe 1) nach oben (Sensorreihe 3)

Der Verlauf zeigt, dass sich nach einer kurzen Startzeit, die wenige Minuten beträgt, ein Gleichgewicht einstellt und sämtliche eingestellten Trocknungsparameter eine trägere Veränderung erfahren. Die Trocknungslufttemperatur und die relative Trocknungsluftfeuchtigkeit erreichen nach wenigen Minuten den eingestellten Wert von 20 °C und die sich durch die Erwärmung einstellende relative Luftfeuchtigkeit erreicht ein Niveau zwischen 6 und 9 %.

bleibt auf einem stabilen Bereich, während die relative Trocknungsluftfeuchte abhängig von der Temperatur und der Luftfeuchte der Außenluft leichten Schwankungen unterworfen ist. Die Ablufttemperatur pendelt sich hingegen am Anfang der Versuchsdurchführung zwischen 14 und 15 °C ein und steigt danach kontinuierlich von ca. 15 °C auf knapp 20 °C an. Die relative Luftfeuchtigkeit der Abluft sinkt von knapp 80 % auf etwa 25 % am Ende der Trocknung. Die Lufttemperaturen im Trocknungsbehälter pendeln sich auch nach einer kurzen Zeit auf einen Anfangswert von etwa 12 °C ein. Nach drei Stunden beginnt die Temperatur der untersten Sensorreihe signifikant zu steigen und nähert sich nach zwölf Stunden der Zulufttemperatur an und bleibt dann für den restlichen Verlauf auf einem relativ gleichmäßigen Niveau. Die Temperatur der Sensorreihe 3 (oberste Reihe) beginnt erst nach ca. 20 Stunden langsam zu steigen und erreicht am Ende der Versuchsdurchführung ebenfalls die Trocknungslufttemperatur von 20 °C. Daraus lässt sich schließen, dass sich der unterste Schüttgutbereich relativ rasch erwärmt, wobei der oberste Bereich verhältnismäßig spät erwärmt wird. Der Verlauf der relativen Luftfeuchte zeigt eine ähnliche Charakteristik, wobei sich die Verläufe umkehren. Nach der kurzen Startphase und einer Trocknungsdauer von etwa 3 Stunden sinkt die relative Luftfeuchtigkeit der ersten (untersten) Sensorreihe von über 95 % schnell ab und unterschreitet nach ca. 8 Stunden Trocknung eine relative Luftfeuchtigkeit von 10 %. Im weiteren Trocknungsverlauf sinkt diese noch weiter ab, wobei nach etwa 20 Stunden die relative Luftfeuchtigkeit der Zuluft erreicht wird. Die relative Luftfeuchtigkeit an der dritten Sensorreihe nimmt auch hier erst nach ca. 20 Stunden langsam ab und nähert sich der relativen Luftfeuchtigkeit der Abluft an, ohne diese jedoch in vollem Umfang zu erreichen. Anhand der Gegenüberstellung der Verläufe der Temperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit zeigt sich daher ein umgekehrter Zusammenhang. Steigt die jeweilige Temperatur, sinkt die korrespondierende relative Luftfeuchtigkeit.

Beispiel 2: Trocknungsversuch: 40 °C Trocknungslufttemperatur und 1.000 m³/h Luftmassenstrom

Der Verlauf in Abbildung 3-2 zeigt, dass sich auch hier nach einer kurzen Startzeit, die wenige Minuten beträgt, ein Gleichgewicht einstellt und sämtliche Trocknungsparameter in eine stationäre Phase gelangen. Die Trocknungslufttemperatur und die relative Trocknungsluftfeuchtigkeit erreichen nach wenigen Minuten den eingestellten Wert von 40 °C und die sich durch die Erwärmung einstellende relative Luftfeuchtigkeit einen Betrag von 3 %. Die Ablufttemperatur steigt konstant von ca. 15 °C auf etwa 28 °C an. Die relative Luftfeuchtigkeit der Abluft sinkt von knapp 95 % am Anfang auf etwa 25 % am Ende der Trocknung ab. Bereits nach 10 Minuten beginnt die Temperatur der untersten Sensorreihe zu steigen und nähert sich nach vier Stunden der Zulufttemperatur auf etwa 2 °C an und bleibt dann für den restlichen Verlauf auf einem relativ gleichmäßigen Niveau. Die Temperatur der Sensorreihe 3 (oberste Reihe) schwankt nach einer kurzen instationären Startphase bei etwa 16 °C und beginnt erst nach etwa 5 Stunden und 40 Minuten stark zu steigen und erreicht am Ende der Versuchsdurchführung knapp über 30 °C. Daraus lässt sich schließen, dass sich der unterste Schüttgutbereich relativ rasch erwärmt, wobei der oberste Bereich verhältnismäßig spät erwärmt wird. Der Verlauf der relativen Luftfeuchte zeigt eine ähnliche Charakteristik, wobei sich die Verläufe umkehren. Nach der kurzen Startphase und einer Trocknungsdauer von etwa 50 Minuten sinkt die relative Luftfeuchtigkeit der ersten (untersten) Sensorreihe von über 95 % stark ab und unterschreitet nach ca. 1,5 Stunden Trocknung eine relative Luftfeuchtigkeit von 10 %. Im weiteren Trocknungsverlauf sinkt diese noch weiter ab und nähert sich bereits nach 3 Stunden der relativen Luftfeuchtigkeit der Zuluft an. Die relative Luftfeuchtigkeit an der dritten Sensorreihe nimmt auch hier erst nach 5 Stunden und 40 Minuten langsam bis etwa 20 % ab. Anhand der Gegenüberstellung der Verläufe der Temperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit zeigt sich daher ein umgekehrter

Zusammenhang. Steigt die jeweilige Temperatur, sinkt die korrespondierende relative Luftfeuchtigkeit.

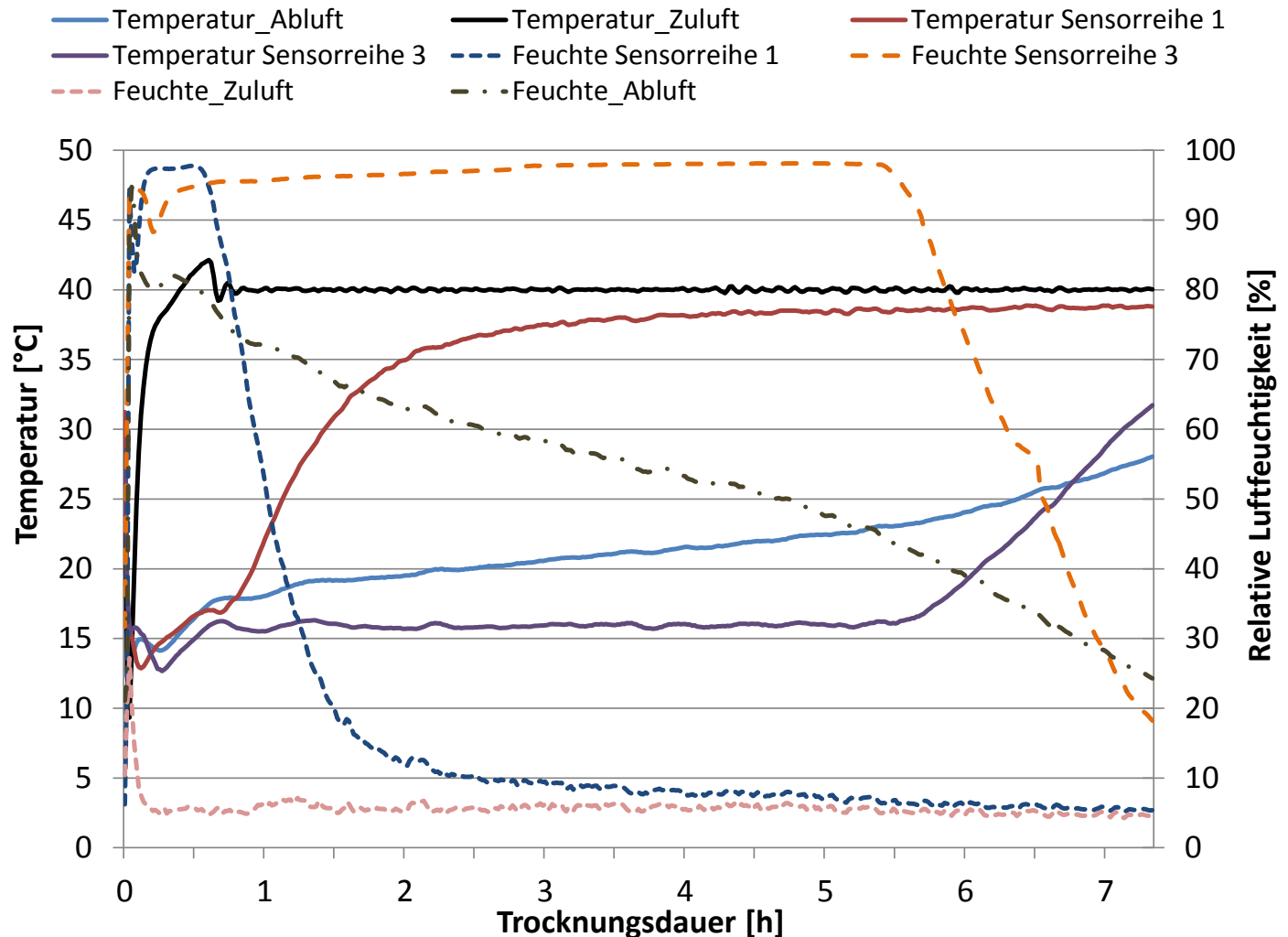


Abbildung 3-2 Verlauf der Temperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit bei einer Trocknungstemperatur von 40 °C und einem Luftmassenstrom von 1.000 m³/h

Anmerkung: Trocknungsluft strömt von unten (Sensorreihe 1) nach oben (Sensorreihe 3)

Zusammenfassung

Es zeigt sich, dass der Verlauf der Temperaturen und der relativen Luftfeuchte unabhängig von der Trocknungslufttemperatur sowie dem Trocknungsluftmassenstrom den gleichen Gesetzmäßigkeiten folgen. Ein Unterschied liegt in der Dauer der verschiedenen Phasen und ist von der Höhe der Trocknungstemperatur sowie dem Ausmaß des Luftmassenstroms abhängig. Je höher diese Parameter sind, desto kürzer sind die einzelnen Phasen ausgebildet. Die verschiedenen aufgezeichneten vertikalen Phasen des Temperaturanstieges sowie der korrespondierende Abnahmeverlauf der Luftfeuchte entsprechen der in Kapitel 2.2 dargestellten Theorie der Hackguttrocknung und sind bei allen Messung im gleichen Ausmaß zu beobachten.

3.3 Verlauf der Wasseraufnahme

Beispiel 1: Trocknungsversuch: 20 °C Trocknungslufttemperatur und 500 m³/h Luftmassenstrom

Wie in Abbildung 3-3 dargestellt, wurde auch der Verlauf der Wasseraufnahme durch die Luft in [g/m³] erhoben, wodurch das jeweilige Trocknungsvermögen charakterisiert werden kann. Das

Wasseraufnahmevermögen der Trocknungsluft gibt an, wie viel Masse an Wasser in g je m³ Trocknungsluft aus dem Hackgut durch die Trocknungsluft aufgenommen wird. Es kann eine tendenzielle Abnahme des Trocknungsvermögens bzw. eine geringere Wasseraufnahme der Trocknungsluft im Versuchsverlauf beobachtet werden. Zu Beginn werden knapp 3,5 g/m³ aufgenommen und am Ende des Versuchs sinkt dieser Wert auf etwa 0,4 g/m³ ab. Dies begründet sich dadurch, da das Hackgut im Zuge des Trocknungsprozesses stetig trockener wird und das im Hackgut gebundene Wasser aufgrund der in Kapitel 2.2 beschriebenen stärker werdenden Bindungskräfte schwerer zu entfernen ist.

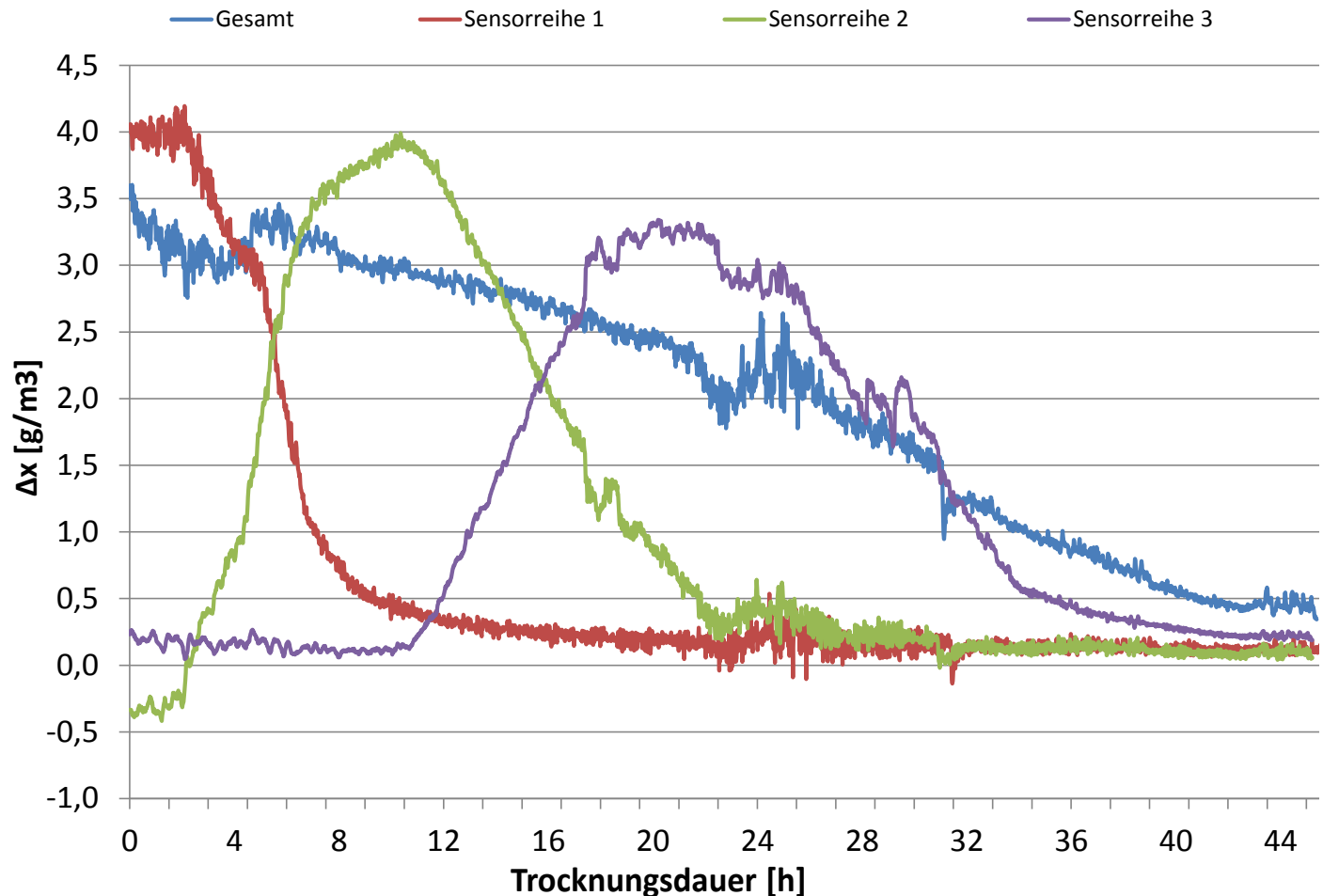


Abbildung 3-3 Verlauf der Wasseraufnahme der Luft bei einer Trocknungstemperatur von 20 °C und einem Luftmassenstrom von 500m³/h

Anmerkung: Δx bezeichnet die aufgenommene Wassermenge in g je m³ Trocknungsluft; Trocknungsluft strömt von unten (Sensorreihe 1) nach oben (Sensorreihe 3)

Weiters ist die Wasseraufnahme in den unterschiedlichen Sensorreihen zu erkennen. Zu Beginn des Trocknungsprozesses nimmt die Trocknungsluft im Bereich der untersten Sensorreihe signifikant mehr Wasser auf. Aufgrund der Abkühlung der Trocknungsluft wird das Wasser in der darüber liegenden Hackgutschicht wieder an diese abgegeben. Dies wird durch den negativen Verlauf der Sensorreihe 2 in den ersten zwei Stunden dargestellt (negative Aufnahme = Abgabe). Daher bilden sich im oberen Hackgutbereich Kondensationszonen aus. Erst wenn das Trocknungsvermögen der Sensorreihe 1 ab einem Maximum von ca. 4 g/m³ zu sinken beginnt, kann die darüber liegende Hackgutschicht (Sensorreihe 2) Wasser abgeben. Die Sensorreihe 2 geht nach etwa 2 Stunden in einen positiven Bereich über. Die Wasseraufnahme im Bereich der Sensorreihe 1 sinkt im Zuge des Trocknungsprozesses auf annähernd Null ab. Die Wasseraufnahme durch die Luft im Sensorbereich

2 steigt jedoch signifikant an und erreicht ein Maximum bei knapp unter 4 g/m³. Auch hier ist erkennbar, dass die darüber liegende Hackgutschicht erst Wasser abgibt, wenn die Wasseraufnahme der darunter liegenden Schicht nach etwa 12 Stunden zu sinken beginnt. Die Wasseraufnahme im Bereich des 2. Sensors sinkt wiederum langsam auf das Niveau der untersten Schicht bzw. auf annähernd Null. Auch die oberste Schicht weist einen ähnlichen Verlauf auf. Das Aufnahmemaximum, das bei etwa 3,2 g/m³ liegt wird nach 20 Stunden erreicht und die Aufnahme sinkt anschließend allmählich ab.

Beispiel 2: Trocknungsversuch: 40 °C Trocknungslufttemperatur und 1.000 m³/h Luftmassenstrom

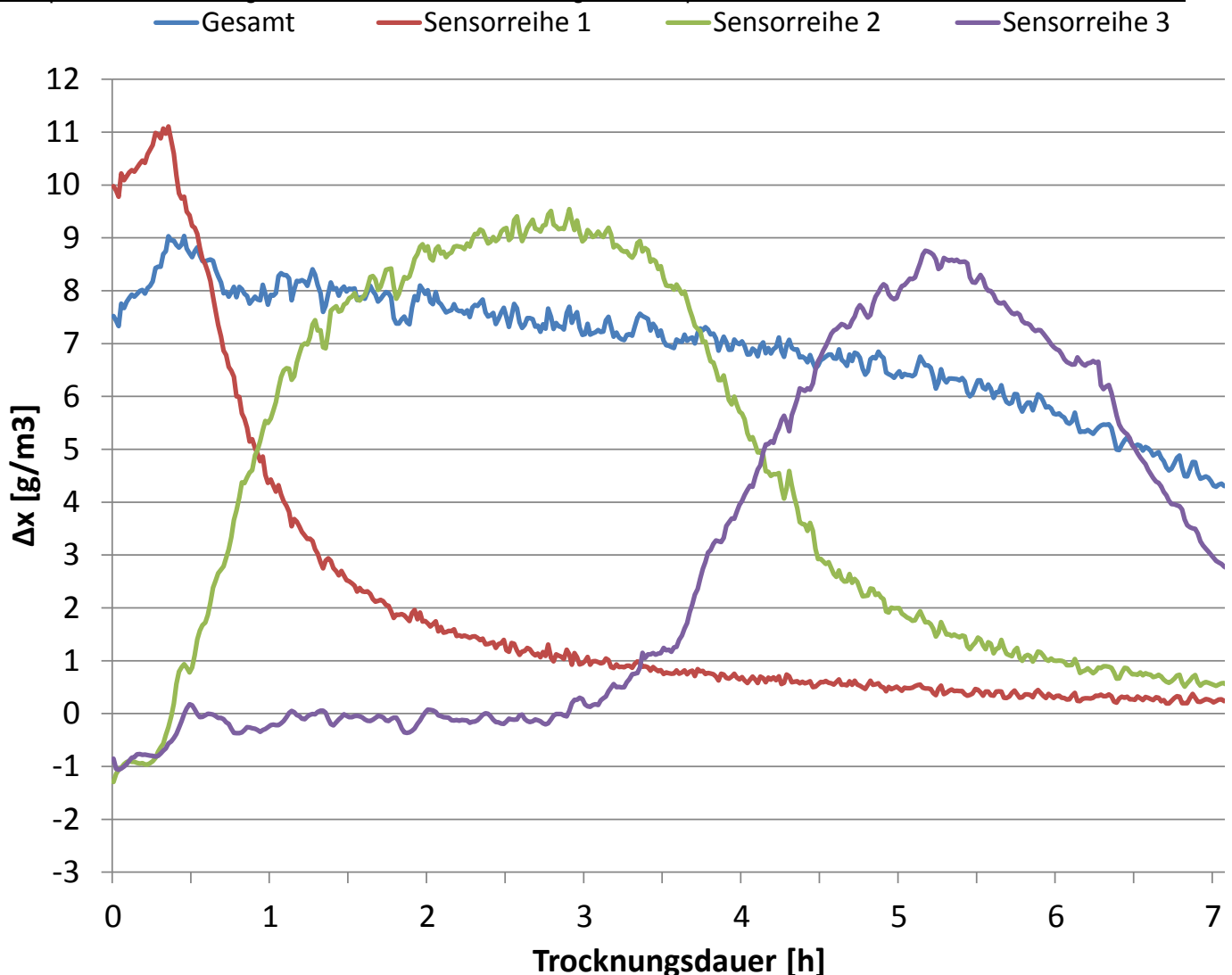


Abbildung 3-4 Verlauf der Wasseraufnahme der Luft bei einer Trocknungstemperatur von 40 °C und einem Luftmassenstrom von 1.000 m³/h

Anmerkung: Trocknungsluft strömt von unten (Sensorreihe 1) nach oben (Sensorreihe 3)

Abbildung 3-4 stellt den Verlauf der Wasseraufnahme durch die Luft in [g/m³] dar, wodurch das Trocknungsvermögen charakterisiert werden kann. Zu Beginn werden knapp 7,5 g/m³ aufgenommen. Nach einem kurzen Anstieg auf knapp 9 g/m³ innerhalb einer halben Stunde sinkt dieser Wert auf ca. 4,2 g/m³ ab. Weiters kann man die Wasseraufnahme in den unterschiedlichen Sensorreihen erkennen. Auch bei hohen Trocknungstemperaturen kommt es bereits zu einer Abgabe von enthaltenen Wassers in der Trocknungsluft der oberen Schichten. Dies wird durch den negativen Verlauf der Sensorreihen 2 und 3 in den ersten drei Stunden dargestellt. Erst wenn das

Trocknungsvermögen der Sensorreihe 1 ab einem Maximum von ca. 11 g/m^3 zu sinken beginnt, kann die darüber liegende Hackgutschicht (Sensorreihe 2) Wasser abgeben. Die Sensorreihe 2 geht nach etwa 30 Minuten in einen positiven Bereich über. Die Wasseraufnahme im Bereich der Sensorreihe 1 sinkt im Zuge des Trocknungsprozesses auf annähernd Null ab. Die Wasseraufnahme durch die Luft im Sensorbereich 2 steigt jedoch signifikant an und erreicht ein Maximum bei knapp über 9 g/m^3 . Auch hier ist erkennbar, dass die darüber liegende Hackgutschicht erst Wasser abgibt, wenn die Wasseraufnahme der darunter liegenden Schicht nach etwa 3,5 Stunden zu sinken beginnt. Die Wasseraufnahme im Bereich des 2. Sensors sinkt ebenfalls langsam auf das Niveau der untersten Schicht. Auch die oberste Schicht weist einen ähnlichen Verlauf auf. Das Aufnahmemaximum, das bei etwa 9 g/m^3 liegt, wird nach etwa 5 Stunden erreicht und die Aufnahme sinkt anschließend allmählich ab.

Zusammenfassung

Der Verlauf der Wasseraufnahme bei unterschiedlichen Trocknungstemperaturen zeigt eine ähnliche Charakteristik, wie jener der Lufttemperaturen und -feuchte. Die Wasseraufnahme aus dem Hackgut erfolgt in Schichten, wobei die obere Schicht erst getrocknet wird, nachdem die Wasseraufnahme durch die Trocknungsluft in der unteren Schicht sinkt. Die oberste Schicht bleibt demnach feuchter und es würde signifikant länger dauern diese auf ein gleiches Niveau zu trocknen. Auch zeigt sich bei Betrachtung der abnehmenden Verläufe der Sensorreihen, dass die Wasseraufnahme mit zunehmender Schütthöhe langsamer sinkt. Zusätzlich werden die Aufnahmemaxima zunehmend geringer. Dadurch kann festgestellt werden, dass die Trocknung mit zunehmender Schütthöhe langsamer vor sich geht, zumal die oberen Hackgutschichten am Beginn des Versuches Wasser aufnehmen und daher der Wassergehalt dieses Hackguts steigt. Es wird also Feuchtigkeit über die Schütthöhe nach oben verschoben. Diese Trocknungseigenschaften zeigen sich bei allen durchgeführten Trocknungsversuchen und entsprechen auch den in Kapitel 2.2 erwähnten Vorgängen bei der Konvektionstrocknung.

3.4 Verlauf der mittleren relativen Luftfeuchte und des Hackgutwassergehaltes

Auf Basis des Verlaufs der Temperaturen und der Luftfeuchte sowie der Wasseraufnahme kann abgeleitet werden, dass zwischen dem Aufnahmevermögen der Luft und dem Hackgutwassergehalt ein Zusammenhang besteht. Da das Aufnahmevermögen stark von der Temperatur abhängig ist und diese Abhängigkeit über die relative Luftfeuchtigkeit visualisiert werden kann.

Beispiel 1: Trocknungsversuch 20°C Trocknungslufttemperatur und $500 \text{ m}^3/\text{h}$ Luftmassenstrom

Abbildung 3-5 stellt den Verlauf des Hackgutwassergehaltes des gesamten Versuches im Trocknungsbehälter dar. Die Abnahme ist durch einen annähernd linearen Verlauf gekennzeichnet, da die Trocknung in verschiedenen Schichten nacheinander vorangetrieben wird und daher der Verlauf über den gesamten Versuch weitgehend linear ist. Ab der 30. Trocknungsstunde nimmt die Reduktion des Wassergehaltes ab. Dies bedeutet, dass die Trocknungsluft und das Hackgut langsam in einen Gleichgewichtszustand übergehen in dem nur mehr eine geringe Trocknung möglich ist.

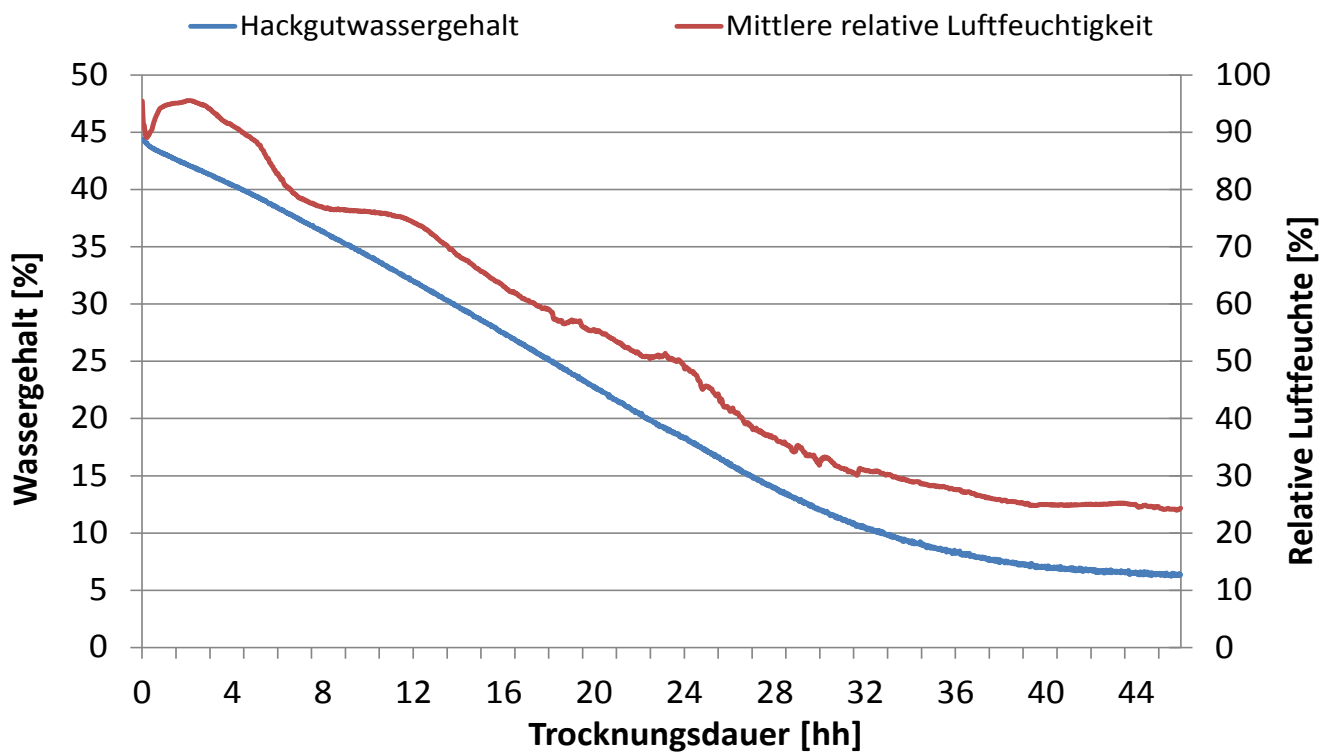


Abbildung 3-5 Verlauf der mittleren relativen Luftfeuchtigkeit und des Hackgutwassergehaltes bei einer Trocknungstemperatur von 20 °C und einem Luftmassenstrom von 500 m³/h

Beispiel 2: Trocknungsversuch: 40 °C Trocknungslufttemperatur und 1.000 m³/h Luftmassenstrom

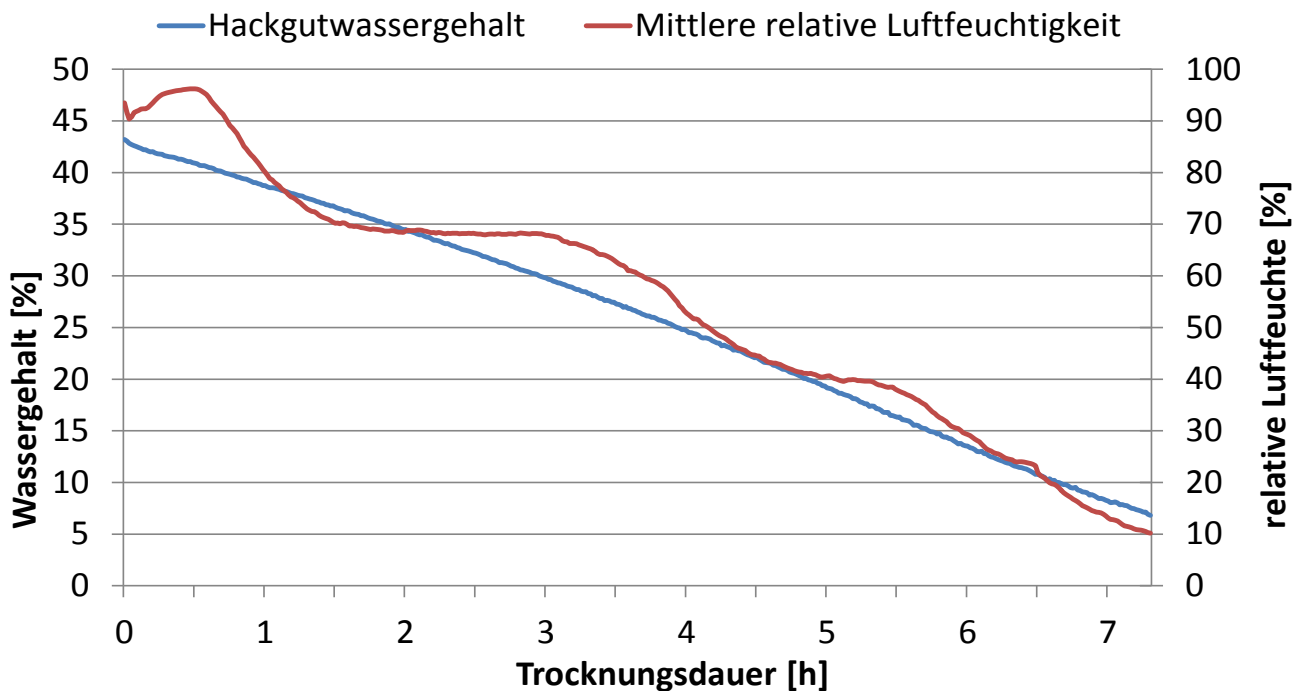


Abbildung 3-6 Verlauf der mittleren relativen Luftfeuchtigkeit und des Hackgutwassergehaltes bei einer Trocknungstemperatur von 40 °C und einem Luftmassenstrom von 1.000 m³/h

In Abbildung 3-6 ist der Verlauf der Wassergehaltsabnahme für den Versuch mit 40 °C und 1.000 m³/h dargestellt. Der Verlauf ist auch hier relativ linear. Des Weiteren ist keine Abnahme der Linearität zu beobachten, da aufgrund der sehr warmen und trockenen Trocknungsluft sich noch kein

Gleichgewicht eingestellt hat. Dies bedeutet, dass der Wassergehalt mit diesen Trocknungsparametern noch weiter reduziert werden könnte.

Zusammenfassung

Der Verlauf der mittleren relativen Luftfeuchte und des Hackgutwassergehaltes zeigt für alle durchgeführten Versuch sehr ähnliche Ergebnisse. Die Abnahme des Wassergehaltes weist einen linearen Verlauf auf. Bei der Trocknung mit 20 °C und 500 m³/h ist ab der 30. Trocknungsstunde eine Reduktion der linearen Abnahme des Wassergehaltes zu bemerken. Dies ist darauf zurück zu führen, dass mit der eingestellten Trocknungslufttemperatur unwesentlich mehr getrocknet werden kann, da das hygroskopische Gleichgewicht zwischen Trocknungsluft und Trocknungsmaterial erreicht ist. Dies ist nur bei Versuchen mit niedriger Trocknungstemperatur (20° C) zu beobachten. Aufgrund dieser Tatsache könnte die gemessene relative Luftfeuchte einen geeigneten Bezugspunkt als Regelparameter der Hackguttrocknung darstellen.

3.5 Verlauf des Wirkungsgrades der Trocknung

Der Wirkungsgrad der Trocknung stellt eine wichtige Benchmark für die verschiedenen Trocknungsversuche dar. Auch wenn die Trocknungsenergie aus günstiger Abwärme bezogen wird, ist darauf zu achten, dass der Wirkungsgrad der Trocknung in einem vertretbaren Rahmen bleibt. Nachfolgend ist daher der thermische Wirkungsgrad über die Dauer der Trocknung dargestellt.

Beispiel 1: Trocknungsversuch: 20 °C Trocknungslufttemperatur und 500 m³/h Luftmassenstrom

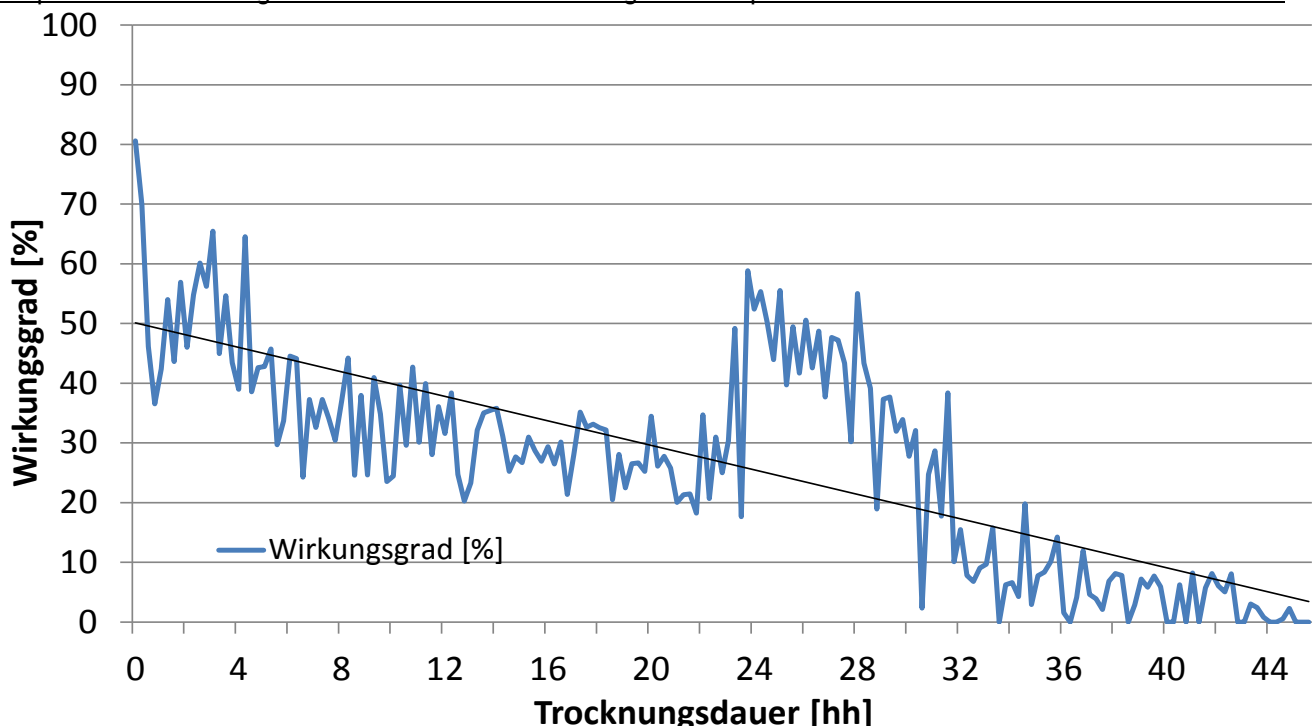


Abbildung 3-7 Charakteristischer Verlauf des Wirkungsgrades bei einer Trocknung mit 20 °C Trocknungslufttemperatur und 500 m³/h Luftmassenstrom

Anmerkung: Der Anstieg des Wirkungsgrades ab der 24. Trocknungsstunde ist auf einen kurzen Ausfall der Regelungsanlage zurückzuführen.

Abbildung 3-7 zeigt den Verlauf des Wirkungsgrades bei einer Trocknung mit 20 °C Trocknungslufttemperatur und 500 m³/h Luftmassenstrom. Es ist ein kontinuierlicher Abfall des Wirkungsgrades zu beobachten, da die zugeführte Energiemenge über die Trocknungsluft konstant bleibt, jedoch der Wasseraustrag mit Fortdauer der Trocknung geringer wird und der Output bei

gleich bleibendem Input sinkt. Am Ende der Trocknung ist der Wirkungsgrad mehrere Stunden unter 10 % und nähert sich dem Wert 0 an. Dies bedeutet, dass kein / kaum Wasser aus dem Trockengut entfernt wird.

Beispiel 2: Trocknungsversuch: 40 °C Trocknungslufttemperatur und 1.000 m³/h Luftmassenstrom

In Abbildung 3-8 ist der Verlauf des Wirkungsgrades bei einer Trocknung mit 40 °C Trocknungslufttemperatur und 1.000 m³/h Luftmassenstrom dargestellt. Auch hier nimmt der Wirkungsgrad über die Dauer der Trocknung ab. Die Abnahme weist jedoch eine geringere Ausprägung auf wie bei Beispiel 1 und der Wirkungsgrad fällt auch am Ende nicht unter 10 %.

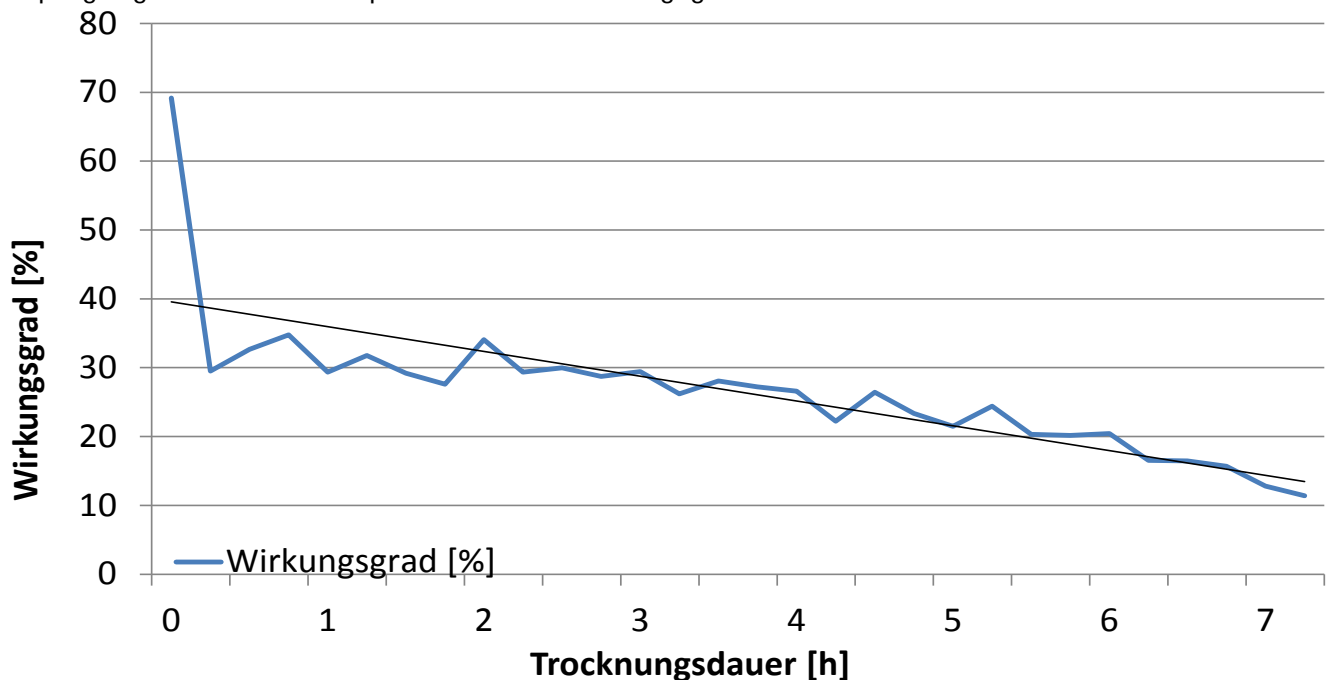


Abbildung 3-8 Charakteristischer Verlauf des Wirkungsgrades bei der Trocknung mit 40 °C Trocknungslufttemperatur und 1.000 m³/h Luftmassenstrom

Zusammenfassung

Es zeigt sich, dass der Wirkungsgrad unabhängig von der Trocknungslufttemperatur sowie dem Trocknungsluftmassenstrom über die Dauer der Trocknung sinkt. Aufgrund der Abnahme des Wirkungsgrades ist es nicht sinnvoll Hackgut bis zu einem wesentlich niedrigen Wassergehalt zu trocknen. Bei einem Endhackgutwassergehalt von 20 % liegen die Wirkungsgrade in den Beispielen bei ca. 20 % (Trocknungslufttemperatur: 40 °C; Luftmassenstrom: 1.000 m³/h) sowie 18 % (Trocknungslufttemperatur: 20 °C; Luftmassenstrom: 500 m³/h). Dies bedeutet, dass eine Trocknung unter 20 % Wassergehalt im Hinblick auf den Wirkungsgrad nicht zu empfehlen ist.

3.6 Vertikaler Trocknungsverlauf im Schüttgut

Ein Nachteil der Konvektionstrocknung stellt der inhomogene vertikale Trocknungsverlauf im Schüttgut dar. Wie bereits erwähnt wurde, wandert die Trocknung in Schichten von unten nach oben und daher ist das Material am Boden signifikant schneller trocken als das Material am oberen Ende. So kann das untere Material bereits übertrocknet sein, während das obere Material noch den Ausgangswassergehalt aufweist. Eine gleichmäßige Durchtrocknung der gesamten Schicht ist daher kaum bzw. mit unverhältnismäßig hohem Energieeinsatz möglich. Dies wird nachfolgend untermauert. Nachfolgend ist in Tabelle 3-3 der Anfangs-, der End- sowie der Wassergehalt in den einzelnen vertikalen Trocknungsschichten für zwei repräsentative Testreihen dargestellt. Die

Trocknung wurde beendet, sobald ein Gesamtwassergehalt von 21 % erreicht wurde. Der Wassergehalt wurde in drei Schichten, jeweils auf der Höhe der Sensoren bestimmt. Die erste Messung wurde mit 40 °C Trocknungslufttemperatur und 1.000 m³/h Luftmassenstrom durchgeführt, die zweite Messung mit 20 °C und 500 m³/h.

Tabelle 3-3 Anfangs- und Endwassergehalt in den einzelnen Schichten

	Messung 1	Messung 2
Anfangswassergehalt [%]	46,77	43,01
Endwassergehalt Gesamt [%]	21,00	21,00
Wassergehalt Schicht 1 (unterste Schicht) [%]	5,05	6,35
Wassergehalt Schicht 2 (mittlere Schicht) [%]	11,23	13,40
Wassergehalt Schicht 3 (oberste Schicht) [%]	39,88	31,10

Abbildung 3-9 zeigt den Unterschied des Wassergehaltes in den einzelnen Schichten. Auch wenn der Gesamtwassergehalt bereits auf 21 % gesunken ist, gibt es ein erhebliches Gefälle innerhalb der Schüttung. Bei der ersten Messung schwanken die Werte bei einem Ausgangswassergehalt von 46,77 % zwischen 5,05 % in der untersten Schicht und 39,88 % in der obersten Schicht. Dies bedeutet, dass der untere Bereich bereits überdriedet ist und im oberen Bereich eine geringe Reduktion des Wassergehaltes stattgefunden hat. Selbiges gilt für die zweite Messung, bei welcher bei einem Gesamtwassergehalt von 21 % in der untersten Schicht ein Wassergehalt von 6,35 % sowie von 31,10 % in der oberen Schicht gemessen wurde.

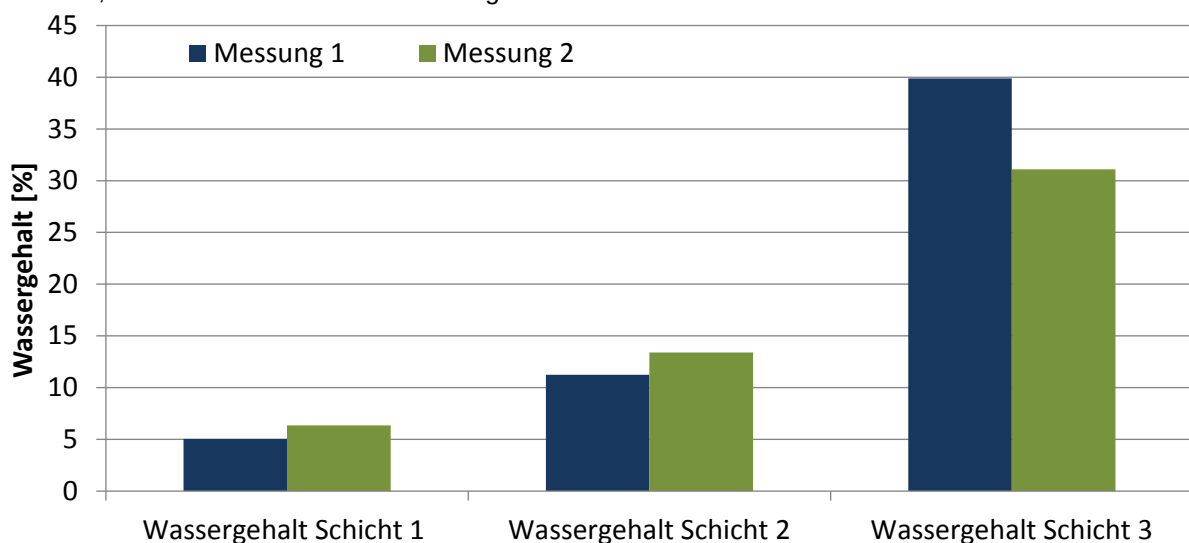


Abbildung 3-9 Verteilung des Wassergehalts in den einzelnen Schichten bei einem Gesamtwassergehalt von 21 %

Der unterschiedliche vertikale Trocknungsverlauf im Schüttgut ist nachteilig, wenn eine gewisse Produktqualität gefordert wird. Eine gleichmäßige Durchdriedung der gesamten Schichten ist aufgrund des beobachteten Rückgangs des Wirkungsgrades mit Fortdauer der Trocknung mit einem signifikanten Energieeinsatz und geringerer Wirtschaftlichkeit verbunden. Eine Möglichkeit besteht darin, dass das getrocknete Material nach dem Trocknungsvorgang durchmischt wird, um einen einheitlichen Wassergehalt zu gewährleisten. Jedoch gilt es hier zu beachten, dass es bei einer ungenügenden Durchmischung zu Feuchtenestern kommen kann sowie dieser Vorgang einen hohen Personaleinsatz für eine nachträgliche Hackgutmanipulation erfordert.

3.7 Auswertung der normierten Trocknungsversuche

Wie bereits in Kapitel 3.1 anhand der zwei Messungen gezeigt wurde, variieren einzelne Parameter leicht und daher können die Messungen nur durch eine Normierung gegenübergestellt werden. Um Vergleichswerte zu schaffen, wurden Kennwerte auf die Trockensubstanz (TS) bezogen und spezifisch dargestellt. Um die Aussagekraft der Labormessungen zu erhöhen wurden 3 Hackgutzusammensetzungen (Material 1, Material 2 sowie Material 3) einer eingehenden Analyse unterzogen. Es wurde darauf geachtet, dass die Zusammensetzung des Trocknungsmaterials eine repräsentative Mischung aus Hart und Weichholz darstellt, sowie das der Anlieferungswassergehalt bei allen Proben in einem ähnlichen Bereich (40 bis 35 %) liegt. Die verschiedenen Materialien unterscheiden sich hinsichtlich der Korngrößen durch die am Heizwerk vorgeschaltete Siebung wie folgt:

- Material 1: ungesiebt, inklusive Feinanteil
- Material 2: gesiebt, Feinhackgut bis zu einer Korngröße G30 ohne Feinanteil
- Material 3: gesiebt, Grobhackgut mit einer Korngröße zwischen G30 und G50

Alle Trocknungsversuche wurden in einem Wassergehaltsbereich zwischen 40 und 20 % (Material 1) sowie 35 bis 20 % (Material 2 und 3) betrachtet. Nachfolgend sind die Auswertungen und der Vergleich der durchgeführten Messungen laut dem in Kapitel 1.4.2.2 gezeigten Messplan dargestellt.

3.7.1 Auswertung der Trocknungsversuche des Materials 1

3.7.1.1 Trocknungsparameter

Für die Messungen des Materials 1 wurden die in Tabelle 3-4 dargestellten Messungen mit zugehörigen Trocknungsparametern durchgeführt. Die Trocknungslufttemperatur und der Luftmassenstrom wurden über die Dauer der Trocknung auf konstanter Temperatur gehalten.

Tabelle 3-4 Trocknungsparameter der Trocknungsserie mit Material 1

Versuch Nr.	Trocknungsluft-Temperatur [°C]	Trocknungsluft-Feuchte [%]	Luftmassen-Strom je kg TS [m ³ /h/kg]	Außen-Temperatur [°C]	Außen-Luftfeuchte [%]
1.1.1	20,0	30,5	8,0	2,8	92,7
1.1.2	20,0	19,7	7,5	-1,5	78,7
1.1.3	20,0	13,9	8,5	-6,7	79,0
1.2.1	20,0	31,8	14,9	3,7	89,9
1.3.1	40,0	3,4	8,1	-7,2	70,5
1.3.2	40,0	8,4	9,2	3,5	81,9
1.4.1	40,0	5,1	14,9	-2,3	73,8
1.4.2	40,0	5,8	14,5	-1,3	77,9
1.4.3	40,0	6,9	15,3	-0,2	85,7
1.4.4	40,0	8,7	17,3	4,7	78,0
1.5.1	60,0	2,1	15,8	2,2	91,0
1.5.2	56,6	2,4	15,4	0,4	84,2

3.7.1.2 Trocknungsdauer

Die Trocknungsdauer der einzelnen Versuche wird in Segmente mit einem Abstand von 5 % in einem Bereich zwischen 40 und 20 % Wassergehalt dargestellt um eine Ab- bzw. Zunahme der Trocknungsgeschwindigkeit über den Trocknungsverlauf feststellen zu können. Abbildung 3-10 stellt

die Trocknungsdauer in Minuten je kg Trockensubstanz dar. Es ist erkennen, dass es bereits bei gleichen Versuchsserien unterschiedliche Trocknungsdauern gibt. Dies ist vor allem bei der Versuchsserie eins besonders stark ausgeprägt. Dieser Abweichungen sind durch die niedrige Temperaturerhöhung und somit den großen Einfluss der Außenluftfeuchte auf die Trocknungsluftfeuchte zu erklären.

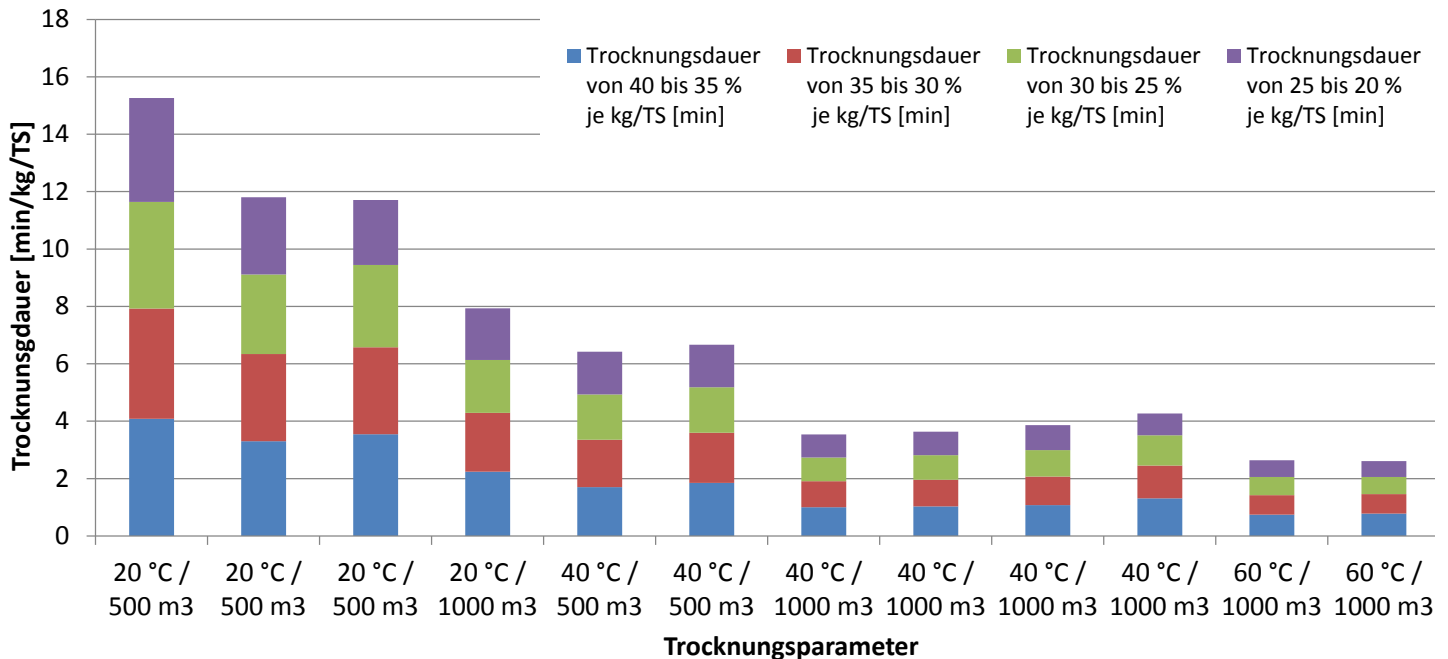


Abbildung 3-10 Trocknungsdauer unterschiedlicher Versuche mit Material 1

Nachfolgend ist in Abbildung 3-11 die Trocknungszeit der einzelnen Bereiche in Prozent der absoluten Trocknungsdauer dargestellt.

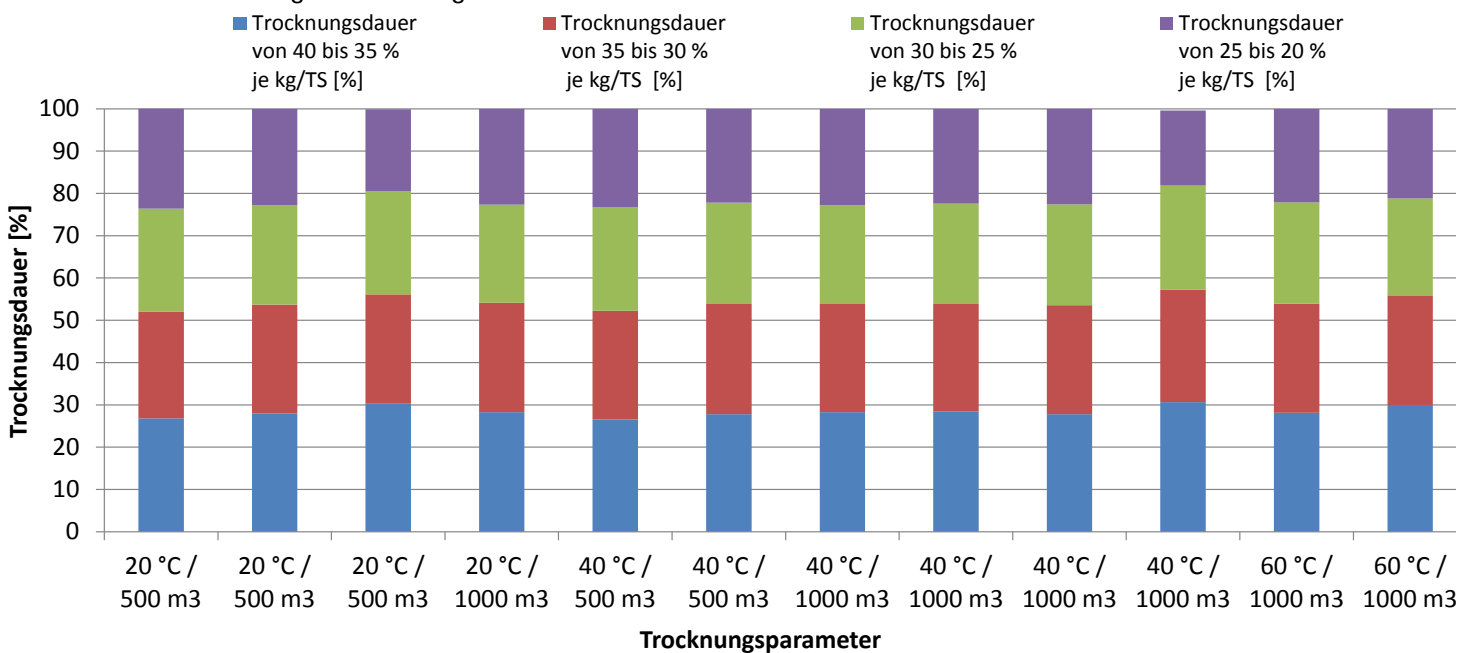


Abbildung 3-11 Sektorale Trocknungsdauer in % der Gesamttrocknungsdauer von Material 1

Die verschiedenen Trocknungsabschnitte zeigen unabhängig von den Trocknungsparametern einen ähnlichen relativen Anteil an der gesamten Trocknungsdauer. Diese sind als Mittelwerte der Versuche in Tabelle 3-5 dargestellt.

Tabelle 3-5 Anteil der Trocknungsabschnitte an der Gesamtdauer der Trocknung von Material 1

Abschnitt	Anteil an der gesamten Trocknungsdauer [%]
Trocknungsdauer von 40 bis 35 % je kg _{TS} [%]	28,41
Trocknungsdauer von 35 bis 30 % je kg _{TS} [%]	25,82
Trocknungsdauer von 30 bis 25 % je kg _{TS} [%]	23,83
Trocknungsdauer von 25 bis 20 % je kg _{TS} [%]	21,90

Es zeigt sich, dass die Trocknungsdauer mit steigender Trocknungsluftmenge und Trocknungslufttemperatur sinkt. In Tabelle 3-6 sind die Mittelwerte über die einzelnen Versuchsserien dargestellt.

Tabelle 3-6 Mittlere Trocknungsdauer und mittlerer Luftmassenstrom der Versuchsserien des Materials 1

Versuchsserien	Trocknungslufttemperatur [°C]	Luftmassenstrom je kg TS [m³/h/kg _{TS}]	Trocknungsdauer [min/kg _{TS}]
1.1	20,0	8,0	12,93
1.2	20,0	14,9	7,93
1.3	40,0	8,7	6,54
1.4	40,0	15,5	3,83
1.5	58,3	15,6	2,63

Durch eine Erhöhung des Luftmassenstroms von 8,0 auf 14,9 m³/h/kg_{TS} bei gleich bleibender Trocknungslufttemperatur von 20 °C ist eine Reduktion der Trocknungsdauer von 12,93 auf 7,93 min/kg_{TS} zu erzielen. Wird die Trocknungslufttemperatur hingegen von 20 auf 40 °C bei annähernd gleich bleibendem Luftmassenstrom (8 und 8,7 m³/h/kg_{TS}) erhöht, reduziert sich die Trocknungsdauer von 12,93 auf 6,54 min/kg_{TS}. Vergleicht man die zweite und vierte Messung, zeigt sich, dass auch bei höheren Luftmassenströmen (14,9 und 15,5 m³/h/kg_{TS}) die Trocknungsdauer von 7,93 auf 3,83 min/kg_{TS} reduziert wird. Wird die Trocknungslufttemperatur auf nahezu 60 °C erhöht reduziert sich die Trocknungsdauer weiter von 3,83 auf 2,63 min/kg_{TS}. Dies bedeutet, dass eine Erhöhung der Trocknungslufttemperatur sowie des Luftmassenstroms zu einer wesentlichen Reduktion der Trocknungsdauer führen. Durch eine Verdoppelung der Trocknungslufttemperatur wird die Trocknungsdauer um annähernd die Hälfte reduziert. Bei Betrachtung des Luftmassenstroms verhält es sich ähnlich. Auch hier führt eine Verdoppelung der Luftmenge zu einer annähernden Halbierung der Trocknungsdauer. Es besteht also ein indirekter linearer Zusammenhang.

3.7.1.3 Trocknungsvermögen

Das Trocknungsvermögen gibt an, wie viel Wasser in g je m³ Trocknungsluft aus dem Trocknungsgut entfernt wird. Die Berechnung erfolgt über die Differenz des Wassergehaltes am Eingang und am Ausgang der Trocknungsbox. Nachfolgend ist in Tabelle 3-7 das Trocknungsvermögen der einzelnen Versuche dargestellt.

Tabelle 3-7 Trocknungsvermögen der Versuchsserien von Material 1

Versuch	Trocknungsvermögen ($\bar{\theta}$) [g/m ³]
1.1.1	2,8
1.1.2	3,7
1.1.3	3,8
1.2.1	2,9
1.3.1	7,3
1.3.2	7,1
1.4.1	7,5
1.4.2	7,5
1.4.3	7,2
1.4.5	6,8
1.5.1	12,4
1.5.2	11,6

Das Trocknungsvermögen nimmt mit steigender Trocknungstemperatur zu, da die Luft trockener wird und daher mehr Wasser bis zur Sättigung aufnehmen kann. Eine Steigerung des Luftmassenstroms führt zu keiner signifikanten Steigerung des spezifischen Trocknungsvermögens. Jedoch wird aufgrund des höheren Luftmassenstromes mehr Wasser entfernt, da mit der größeren Luftmenge mehr Feuchtigkeit abgeführt werden kann. Anhand der Versuchsserie 1 zeigt sich, dass es bei niedrigen Trocknungstemperaturen aufgrund der variierenden Parameter der Außenluft zu Unterschieden kommen kann. Nachfolgend ist in Abbildung 3-12 das Trocknungsvermögen für die einzelnen Versuche von Material 1 dargestellt.

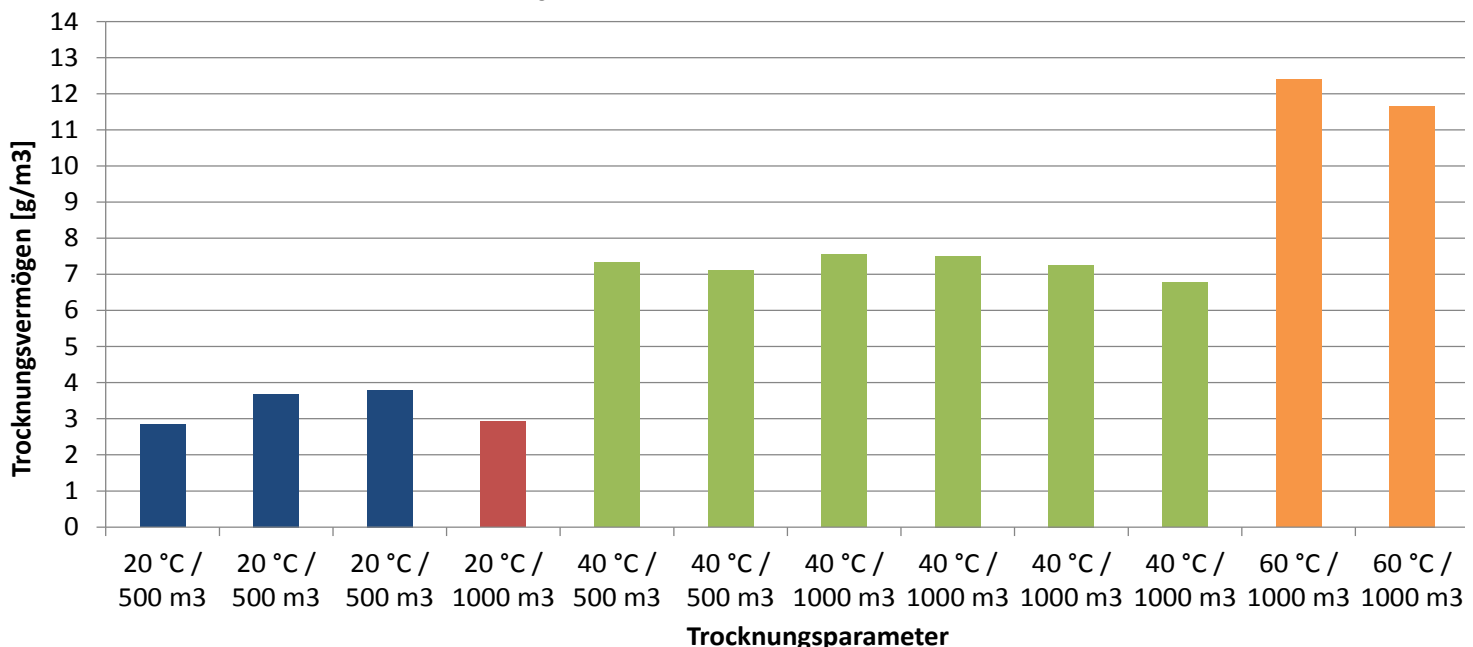


Abbildung 3-12 Trocknungsvermögen der Versuchsserien von Material 1

3.7.1.4 Wirkungsgrad

Der Input der Trocknung basiert auf den normierten / spezifischen thermischen Energieeinsatz (bezogen auf die Trockenmasse des Gutes). Notwendige Energiemengen, die z. B. für Ventilatoren oder andere Hilfsmittel aufgewandt werden müssen, werden in diesem Fall nicht berücksichtigt, da dies auf anlagen- und komponentenspezifische Unterschiede zurück zu führen ist. Die Berechnung

des Outputs erfolgt über die normierte / spezifische Differenz (bezogen auf die Trockenmasse des Gutes) der Enthalpie der Außenluft zur Enthalpie der Trocknungsluft. Für die theoretisch notwendige Energiemenge wird die Menge des entfernten Wasser mit einer Verdampfungsenthalpie von 2.460 kJ/kg angenommen [Schmidt & Grigull, 1989]. Tabelle 3-8 stellt den thermischen Energieeinsatz, den Wirkungsgrad sowie die notwendige Energiemenge zum Verdampfen von 1 kg Wasser dar.

Tabelle 3-8 Eingebachte Energiemengen und Wirkungsgrade der Versuchsserien von Material 1

Versuch	Eingebachte Energiemenge [kWh]	Wirkungsgrad [%]	Energiemenge [kWh/kg_H2O]
1.1.1	61,17	32,82	2,08
1.1.2	62,70	34,36	1,99
1.1.3	67,57	26,63	2,57
1.2.1	51,42	37,02	1,85
1.3.1	64,03	30,96	2,21
1.3.2	48,85	37,47	1,82
1.4.1	53,34	35,73	1,91
1.4.2	39,89	35,60	1,90
1.4.3	54,13	34,10	2,00
1.4.5	46,20	33,02	2,07
1.5.1	45,57	39,47	1,73
1.5.2	46,72	39,76	1,72

Es ist zu erkennen, dass die eingebrachte Energiemenge bei niedrigen Temperaturen (Versuchsserien 1.1, 1.2 und 1.3) sowie bei einem Versuch mit 40 °C und niedrigem Luftmassenstrom (3.1) am höchsten sind und bei über 60 kWh liegen. Der niedrigste Energieeintrag konnte bei Versuch 4.2 festgestellt werden und liegt bei 39,89 kWh. Weiters ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad nicht von der Menge des Energieeintrages abhängig ist. Der thermische Wirkungsgrad liegt zwischen 26,63 % (Versuch 1.3) sowie 39,76 % (Versuch 5.2). In Abbildung 3-13 sind die eingebrachten Energiemengen sowie die Wirkungsgrade dargestellt.

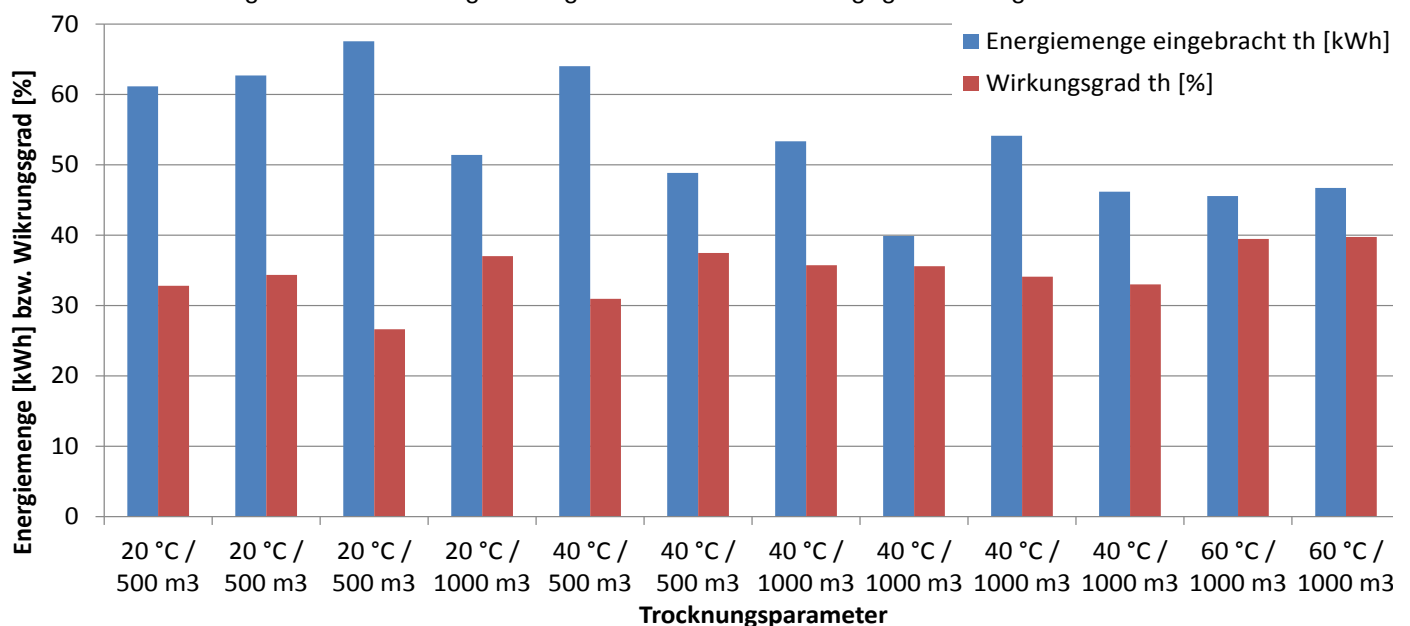


Abbildung 3-13 Eingebachte Energiemenge und Wirkungsgrade der Versuchsserien von Material 1

Des Weiteren kann die eingebrachte Energiemenge spezifisch auf den Wasseraustrag bezogen werden. Dies bedeutet, dass angegeben werden kann, wie viel Energie notwendig ist um ein kg Wasser zu verdampfen. Dieser Wert kann als Benchmark für die Güte der Trocknung herangezogen werden und ist in Abbildung 3-14 dargestellt. Die Energiemenge je kg entferntes Wasser verhält sich indirekt proportional zum Wirkungsgrad. Je kleiner die Energiemenge ist um ein kg Wasser zu entfernen, desto höher ist der Wirkungsgrad.

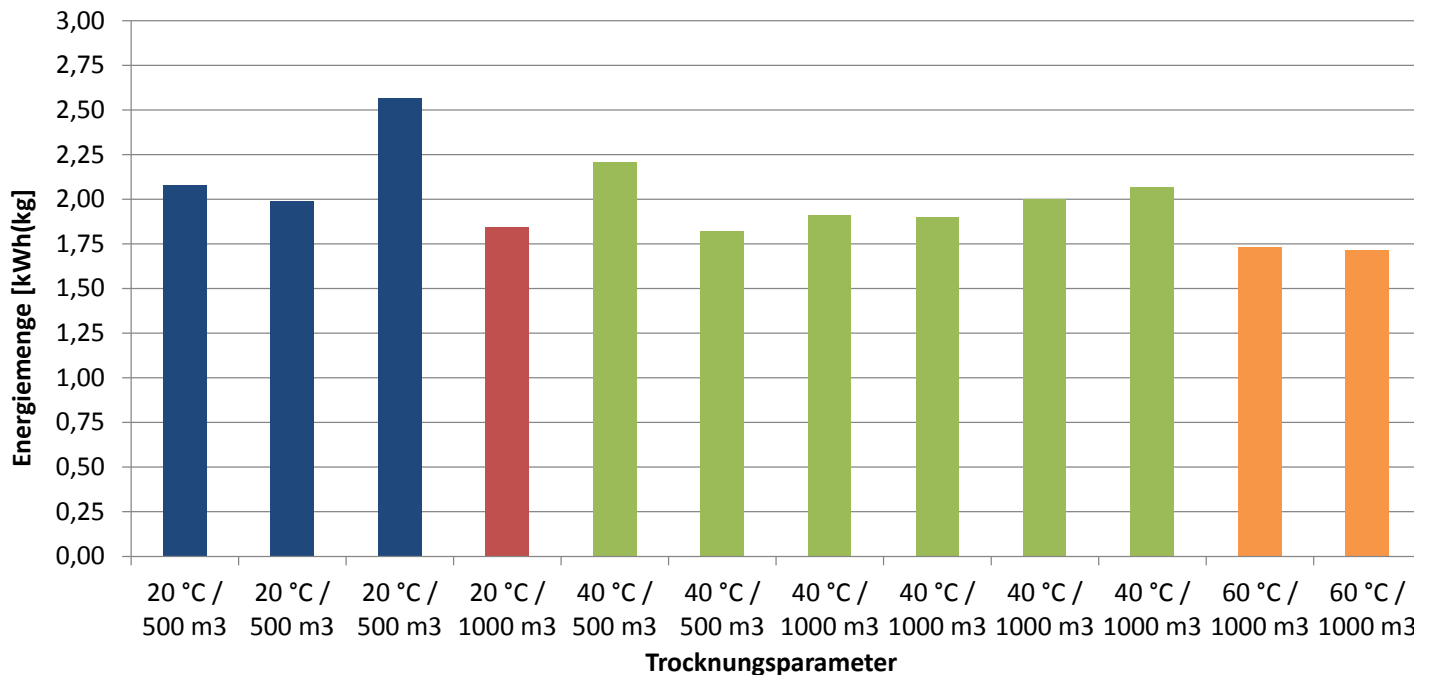


Abbildung 3-14 Eingebrachte Wärmemenge je kg Wasseraustrag der Versuchsserien von Material 1

3.7.1.5 Zusammenfassung der Versuchsserien von Material 1

Anhand der durchgeführten Messungen mit dem Material 1 konnten die ersten Zusammenhänge der Trocknungsparameter festgestellt werden. Die Trocknungsdauer wird vor allem von der Luftmenge und der Trocknungslufttemperatur beeinflusst. Das Trocknungsvermögen ist ebenfalls von der Trocknungslufttemperatur abhängig und steigt mit höherer Temperatur an. Der thermische Wirkungsgrad der Trocknung liegt in einem Bereich zwischen 26 und 39 % und ist bei höheren Trocknungstemperaturen tendenziell höher. Wird auch noch der elektrische Anteil auf den Wirkungsgrad bezogen, wird der Wirkungsgrad schlechter. Daher ist im Sinne einer effizienten Energienutzung ein hoher thermischer Wirkungsgrad anzustreben. Es konnten auch bereits die ersten Zusammenhänge auf die Trocknungsdauer aufgezeigt werden. Weitere Analysen hinsichtlich der Zusammenhänge erfolgen im Kapitel 3.9.

3.7.2 Auswertung der Trocknungsversuche des Materials 2

3.7.2.1 Trocknungsparameter

Die in Tabelle 3-9 dargestellten Messungen mit den korrespondierenden Trocknungsparametern wurden mit dem Material 2 durchgeführt. Die Trocknungslufttemperatur wurde über die Dauer der Trocknung auf konstanter Temperatur gehalten. Auch der Luftmassenstrom wurde über die Dauer der Trocknung auf einem konstanten Niveau gehalten.

Tabelle 3-9 Trocknungsparameter der Trocknungsserie mit Material 2

Versuch Nr.	Trocknungs-Temperatur [°C]	Trocknungsluft-Feuchte [%]	Luftmassen-Strom je kg TS [m³/h/kg]	Außen-Temperatur [°C]	Außen-Luftfeuchte [°C]
2.1.1	20,00	25,11	10,26	6,93	58,70
2.2.1	20,09	24,61	14,72	3,56	71,08
2.3.1	29,99	11,21	11,56	10,50	38,97
2.3.2	29,93	9,72	8,25	-0,41	66,98
2.4.1	29,98	11,84	12,21	0,15	77,05
2.5.1	38,56	5,81	8,37	-0,17	67,81
2.6.1	39,35	5,12	12,25	-1,10	64,93
2.6.2	39,57	6,79	14,24	9,46	44,62

3.7.2.2 Trocknungsdauer

Die Trocknungsdauer der einzelnen Versuche wird wiederum in 5 % Segmenten in einem Bereich zwischen 35 und 20 % Wassergehalt dargestellt um eine Ab- bzw. Zunahme der Trocknungsgeschwindigkeit über den Trocknungsverlauf feststellen zu können. Abbildung 3-15 stellt die Trocknungsdauer in Minuten je kg Trockensubstanz dar.

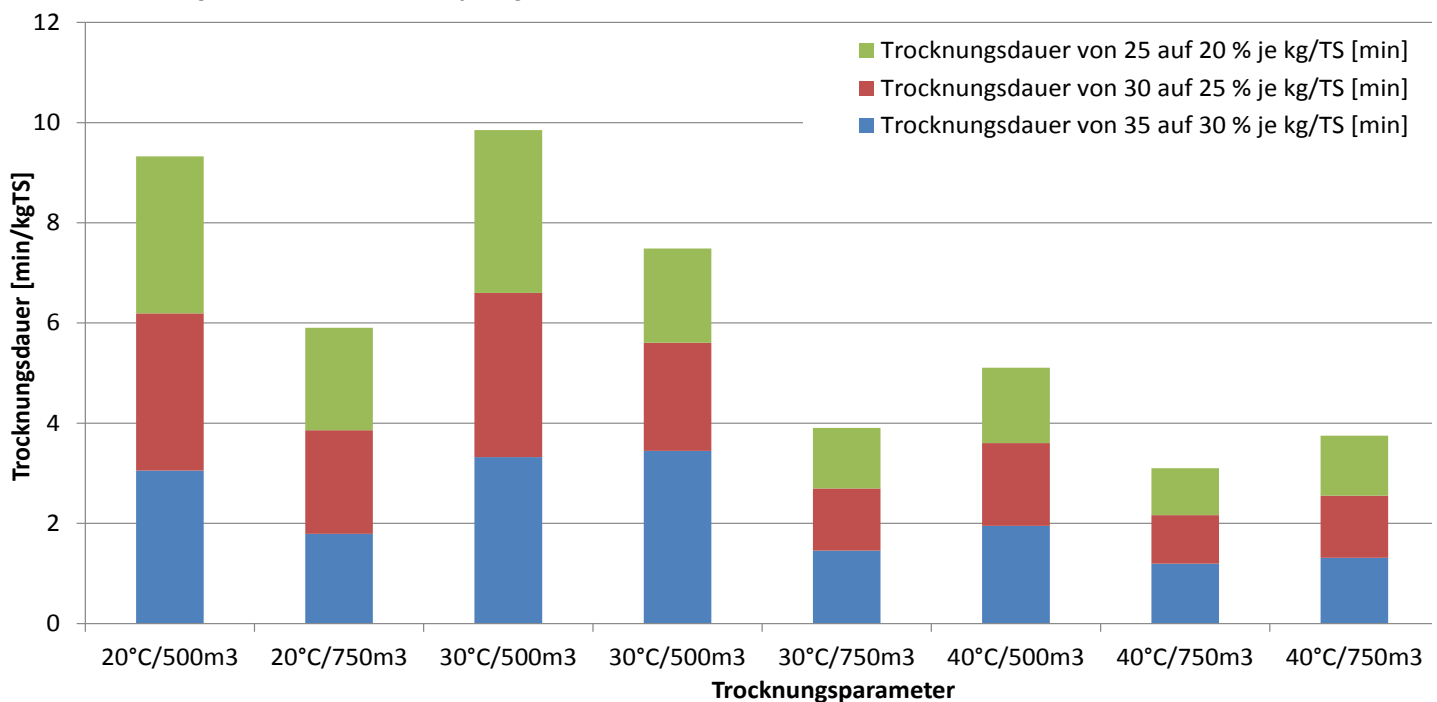


Abbildung 3-15 Trocknungsdauer unterschiedlicher Versuche mit Material 2

Es zeigt sich, dass zwischen Versuchen mit gleich eingestellten Trocknungsparametern (2.3.1 und 2.3.2) Trocknungszeiten auftreten, die um 24 % abweichen. Diese Abweichungen sind durch die niedrige Temperaturerhöhung und den großen Einfluss der Außenluftfeuchte auf die Trocknungsluftfeuchte zu erklären. Die höhere Trocknungsdauer bei Versuch 2.3.1 ergibt sich daher, dass dieser Versuch mit einem Material mit genau 35 % Wassergehalt gestartet wurde. Daher ist bei diesem trockenen Ausgangsmaterial die Wasseraufnahme durch die Trocknungsluft schlechter und durch die spezifische Darstellung steigt auch die spezifische Trocknungsdauer. Nachfolgend ist in Abbildung 3-16 die anteilige sektorale Trocknungszeit dargestellt.

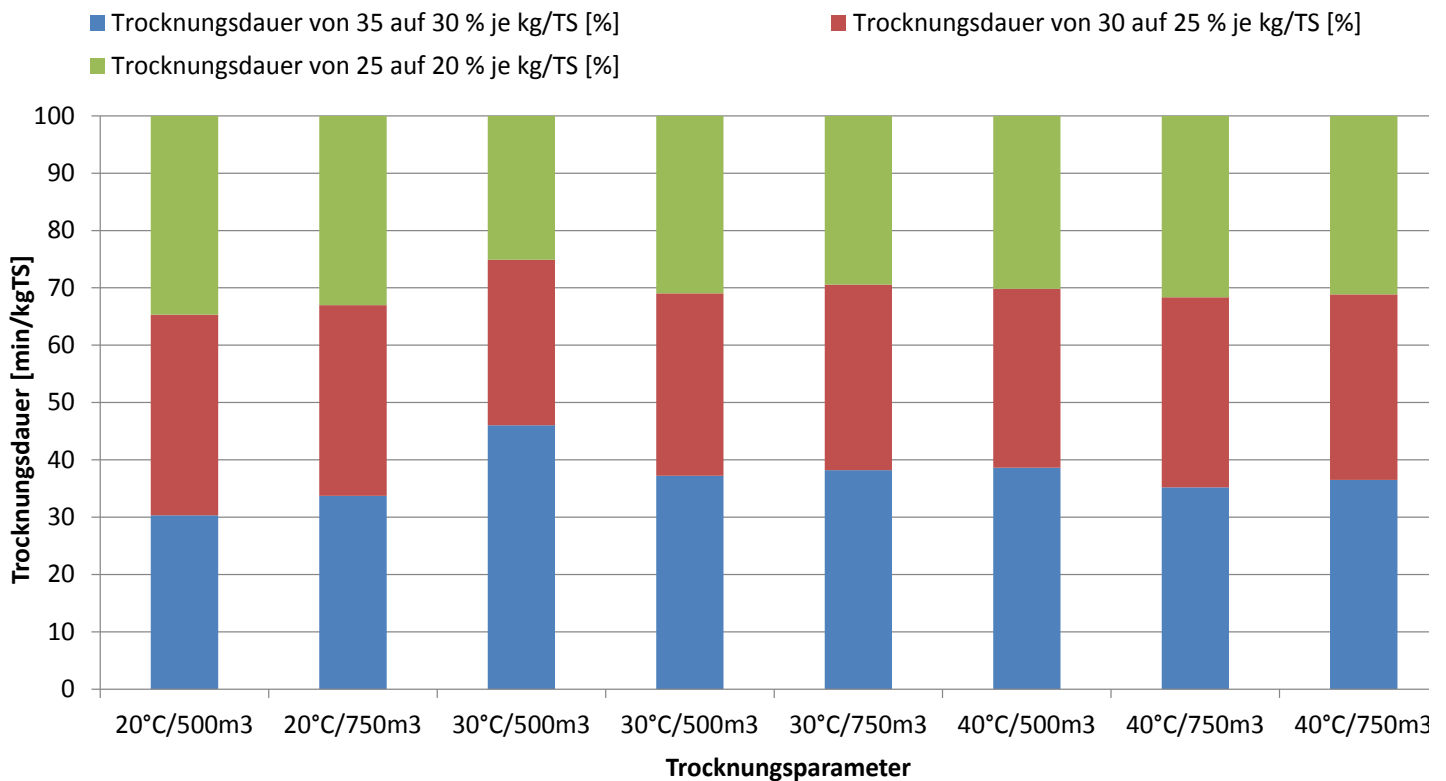


Abbildung 3-16 Sektorale Trocknungsdauer in % der Gesamttrocknungsdauer von Material 2

Mit Ausnahme von Versuch 2.3.2 weisen alle Versuche eine ähnliche Verteilung der Trocknungsdauer in den einzelnen Wassergehaltsbereichen unabhängig von den Trocknungsparametern auf. In Tabelle 3-10 sind die Mittelwerte der sektoralen Trocknungsdauer dargestellt.

Tabelle 3-10 Anteil der Trocknungsabschnitte an der Gesamtdauer der Trocknung von Material 2

Abschnitt	Anteil an der gesamten Trocknungsdauer [%]
Trocknungsdauer von 35 auf 30 % je kg _{TS} [%]	36,49
Trocknungsdauer von 30 auf 25 % je kg _{TS} [%]	32,38
Trocknungsdauer von 25 auf 20 % je kg _{TS} [%]	31,11

In Tabelle 3-11 ist die Trocknungsdauer abhängig von der Trocknungstemperatur und dem Luftmassenstrom dargestellt.

Tabelle 3-11 Mittlere Trocknungsdauer und mittlerer Luftmassenstrom der Versuchsserien des Materials 2

Versuch Nr.	Trocknungsdauer [min/kg _{TS}]	Trocknungstemperatur [°C]	Luftmassenstrom je kg _{TS} [m ³ /h/kg]
2.1	9,38	20,00	10,26
2.2	5,91	20,09	14,72
2.3	8,67	29,96	9,90
2.4	3,91	29,98	12,21
2.5	5,11	38,56	8,37
2.6	3,42	39,46	13,24

Durch eine Erhöhung des Luftmassenstroms von 10,26 auf 14,72 m³/h/kg_{TS} bei gleich bleibender Trocknungslufttemperatur von 20 °C ist eine Reduktion der Trocknungsdauer von 9,38 auf 5,91 min/kg_{TS} zu erzielen. Wird die Trocknungstemperatur von 20 auf 40 °C erhöht und der Luftmassenstrom auf annähernd gleichem Niveau belassen reduziert sich die Trocknungsdauer von 9,38 auf 5,11 min/kg_{TS}. Wird der Luftmassenstrom bei 40 °C noch weiter auf 13,24 m³/h/kg_{TS} erhöht, kann die Trocknungsdauer weiter auf 3,42 min/kg_{TS} reduziert werden. Auch hier zeigt sich, dass die Trocknungsdauer durch eine Verdoppelung der Trocknungstemperatur um die Hälfte reduziert werden kann. Eine Verdoppelung des Luftmassenstroms wurde bei diesen Versuchen nicht durchgeführt.

3.7.2.3 Trocknungsvermögen

Nachfolgend ist in Tabelle 3-12 das Trocknungsvermögen der einzelnen Versuche dargestellt.

Tabelle 3-12 Trocknungsvermögen der Versuchsserien von Material 2

Versuch	Trocknungsvermögen [g/m ³]
2.1.1	3,93
2.2.1	4,13
2.3.1	6,30
2.3.2	6,28
2.4.1	6,26
2.5.1	7,77
2.6.1	8,63
2.6.2	8,61

Das Trocknungsvermögen nimmt mit steigender Trocknungstemperatur zu, da die Luft trockener wird und daher mehr Wasser bis zur Sättigung aufnehmen kann. In Abbildung 3-17 ist das Trocknungsvermögen der einzelnen Versuche dargestellt.

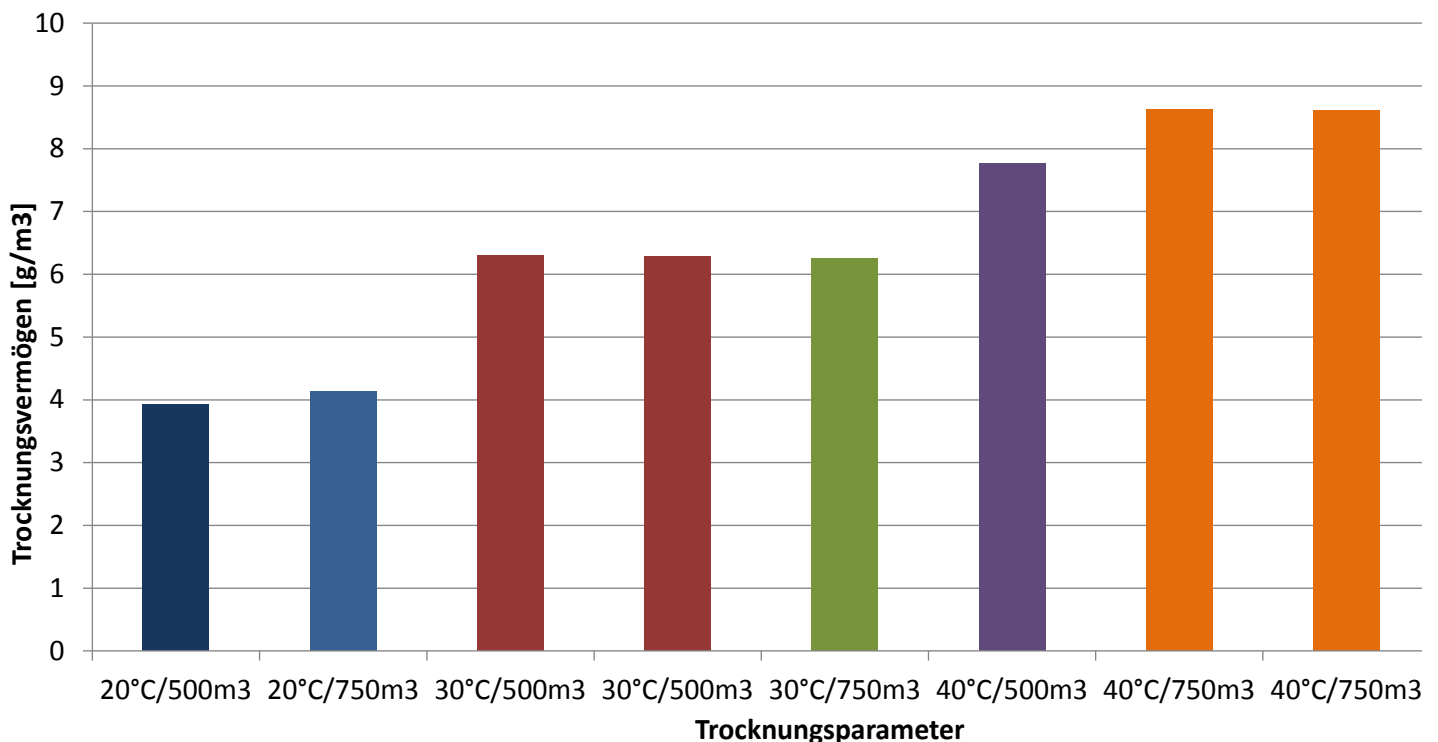


Abbildung 3-17 Trocknungsvermögen der Versuchsserien von Material 2

3.7.2.4 Wirkungsgrad

Die Wirkungsgradberechnung wurde analog zur Berechnung des Materials 1 durchgeführt. Tabelle 3-13 stellt den thermischen Energieeinsatz, den Wirkungsgrad sowie die notwendige Energiemenge für das Verdampfen von 1 kg Wasser dar.

Tabelle 3-13 Eingebraachte Energiemengen und Wirkungsgrade der Versuchsserien von Material 2

Versuch	Eingebraachte Wärmemenge [kWh]	Wirkungsgrad th [%]	Wärmemenge je kg Wasser [kWh/kg]
2.1.1	18,98	51,73	1,32
2.2.1	21,71	46,76	1,46
2.3.1	23,49	36,75	1,86
2.3.2	38,35	29,92	2,28
2.4.1	29,93	43,35	1,58
2.5.1	31,77	37,85	1,81
2.6.1	30,51	41,71	1,64
2.6.2	23,20	45,68	1,50

Die eingebraachte Energiemenge war bei den Versuchen 2.3.2 und 2.5.1 mit Werten von 38,35 und 31,77 kWh am höchsten. Die Wirkungsgrade waren in diesen Fällen mit Werten von 29,92 und 37,85 % niedriger als bei den anderen Versuchen. Der höchste Wirkungsgrad bei diesem Material wurde mit 51,73 % bei der Messung 1.1 erreicht. In diesem Fall zeigt sich ein Zusammenhang zwischen der eingebraachten Energiemenge und dem Wirkungsgrad. Je kleiner die eingebraachte Energiemenge ist, desto höhere Wirkungsgrade wurden erreicht. Daher sind in Abbildung 3-18 die Wirkungsgrade und die eingebraachten Energiemengen dargestellt.

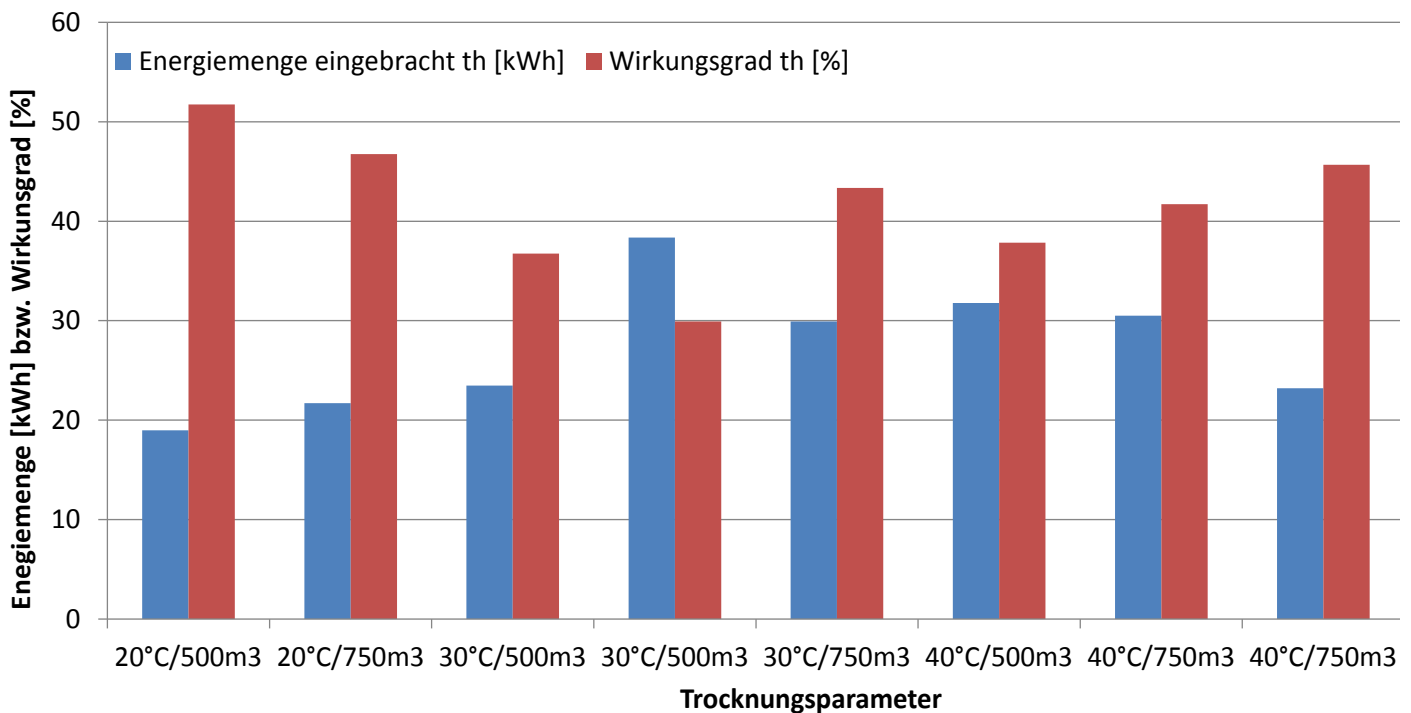


Abbildung 3-18 Eingebraachte Energiemenge und Wirkungsgrade der Versuchsserien von Material 2

Die eingebrachte Energiemenge bezogen auf den Wasseraustrag kann als Benchmark für die Güte der Trocknung herangezogen werden und ist in Abbildung 3-19 dargestellt. Die Energiemenge je kg entferntes Wasser verhält sich auch bei dieser Versuchsserie indirekt proportional zum Wirkungsgrad. Je kleiner die Energiemenge ist um ein kg Wasser zu entfernen, desto höher ist der Wirkungsgrad.

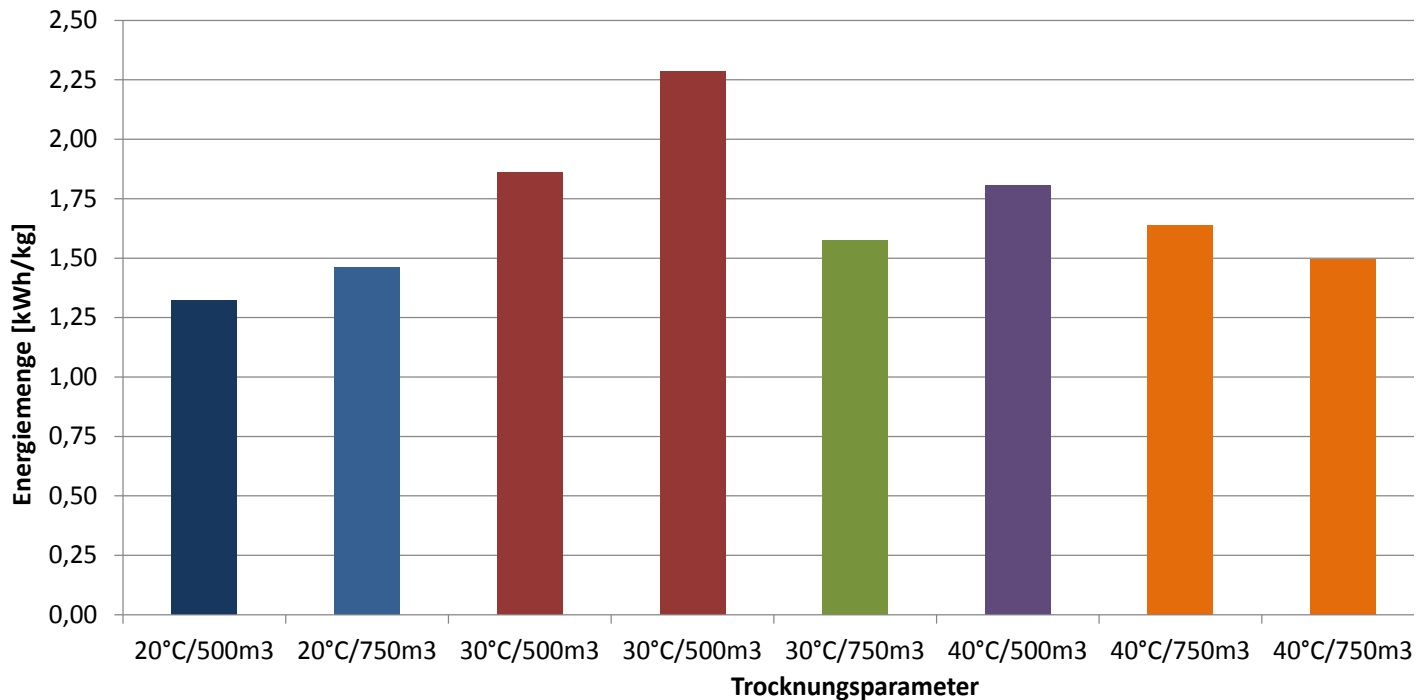


Abbildung 3-19 Eingebrachte Wärmemenge je kg Wasseraustrag der Versuchsserien von Material 2

3.7.2.5 Zusammenfassung der Versuchsserie mit Material 2

Anhand der mit dem Material 2 durchgeführten Messungen konnten die Zusammenhänge, die bei den ersten Versuchsserien festgestellt wurden, bestätigt werden. Die Trocknungsdauer wird auch hier vor allem von der Luftmenge und der Trocknungslufttemperatur beeinflusst. Das Trocknungsvermögen ist auch von der Trocknungslufttemperatur abhängig und steigt mit höherer Temperatur an. Der thermische Wirkungsgrad der Trocknung liegt beim Material 2 in einem Bereich zwischen 29 und 51 %. Der beste Wirkungsgrad konnte in diesem Fall bei einer Trocknung mit niedriger Temperatur und niedrigem Luftmassenstrom erreicht werden. Die bei diesen Trocknungsversuchen erreichten Wirkungsgrade liegen somit höher als bei Material 1.

3.7.3 Auswertung der Trocknungsversuche des Materials 3

3.7.3.1 Trocknungsparameter

Für die Messungen des Materials 3 wurden die in Tabelle 3-14 dargestellten Messungen mit zugehörigen Trocknungsparametern durchgeführt. Die Werte beziehen sich auf die Durchschnittswerte über die gesamte Trocknung. Die Trocknungslufttemperatur und der Luftmassenstrom wurden über die Dauer der Trocknung auf konstantem Niveau gehalten.

Tabelle 3-14 Trocknungsparameter der Trocknungsserie mit Material 3

Versuch Nr.	Trocknungsluft-Temperatur [°C]	Trocknungsluft-Feuchte [%]	Luftmassen-Strom je kg _{TS} [m³/h/kg _{TS}]	Außen-Temperatur [°C]	Außen-Luftfeuchte [°C]
3.1.1	20,00	11,02	19,33	0,81	38,19
3.2.1	20,06	16,59	24,03	-0,82	63,43
3.2.2	20,02	10,85	12,55	4,28	31,71
3.2.3	20,21	17,37	25,21	-1,73	70,38
3.3.1	29,99	15,18	10,52	3,68	76,92
3.4.1	30,05	10,87	12,31	2,39	61,22
3.5.1	39,03	8,27	10,45	4,65	67,71
3.5.2	39,28	4,40	11,41	5,63	36,74
3.6.1	38,47	7,11	12,44	2,75	63,76
3.6.2	39,62	7,23	12,20	11,65	41,31

3.7.3.2 Trocknungsdauer

Die Trocknungsdauer ist für die durchgeführten Versuche wiederum in 5 %-Segmenten in einem Bereich zwischen 35 und 20 % Wassergehalt dargestellt um eine Ab- bzw. Zunahme der Trocknungsgeschwindigkeit über den Trocknungsverlauf feststellen zu können. Abbildung 3-20 stellt die Trocknungsdauer in Minuten je kg Trockensubstanz dar.

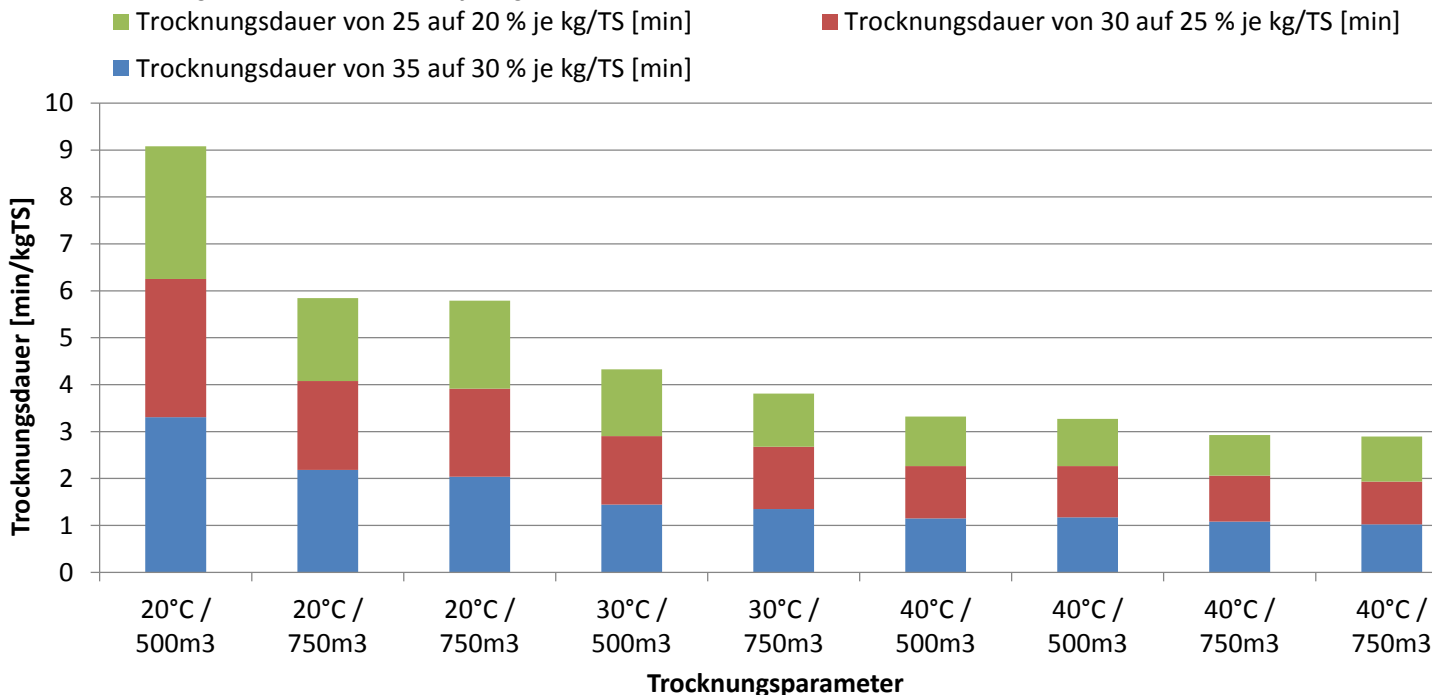


Abbildung 3-20 Trocknungsdauer unterschiedlicher Versuche mit Material 3

Auch bei der Versuchsserie 3 gibt es bei niedrigen Trocknungstemperaturen bei gleichen Versuchen unterschiedliche Trocknungsdauern. Dies ist vor allem bei den Versuchsserien (3.2.1, 3.2.2 und 3.2.3) zu beobachten. Bei höheren Trocknungstemperaturen sind diese Abweichungen nicht zu beobachten. Nachfolgend ist in Abbildung 3-21 die Trocknungszeit der einzelnen Bereiche in Prozent der absoluten Trocknungsdauer dargestellt.

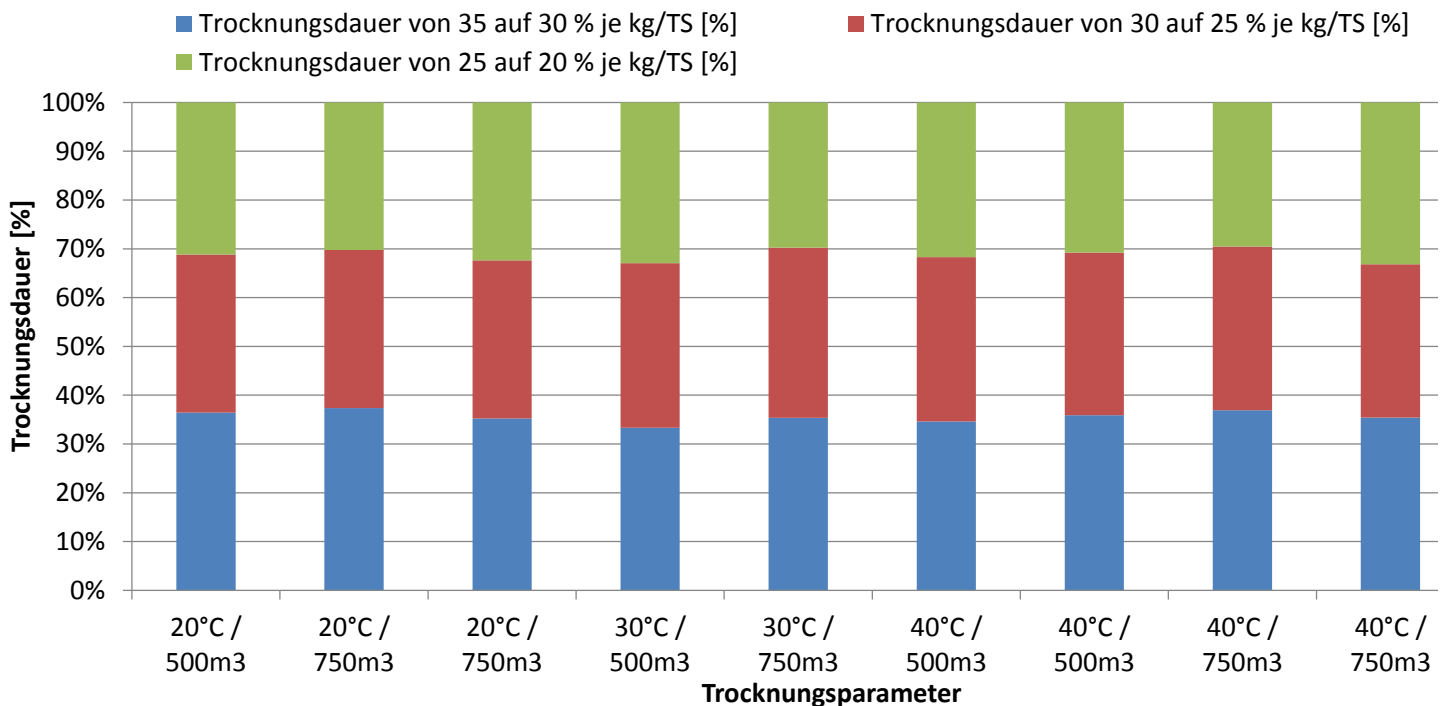


Abbildung 3-21 Sektorale Trocknungsdauer in % der Gesamttrocknungsdauer von Material 3

Die verschiedenen Trocknungsabschnitte zeigen unabhängig von den Trocknungsparametern eine relativ gleichmäßige Verteilung in Prozent der gesamten Trocknungsdauer. Diese sind als Mittelwerte der Versuche in Tabelle 3-15 dargestellt.

Tabelle 3-15 Anteil der Trocknungsabschnitte an der Gesamtdauer der Trocknung von Material 3

Abschnitt	Anteil an der gesamten Trocknungsdauer [%]
Trocknungsdauer von 35 auf 30 % je kg _{TS} [%]	35,62
Trocknungsdauer von 30 auf 25 % je kg _{TS} [%]	33,21
Trocknungsdauer von 25 auf 20 % je kg _{TS} [%]	31,11

Es ist zu erkennen, dass die Trocknungsdauer mit steigender Trocknungsluftmenge und Trocknungslufttemperatur sinkt. In Abbildung 3-16 sind die Mittelwerte über die einzelnen Versuchsserien dargestellt.

Tabelle 3-16 Mittlere Trocknungsdauer und mittlerer Luftmassenstrom der Versuchsserien des Materials 3

Versuch Nr.	Trocknungsdauer [min/kg _{TS}]	Trocknungstemperatur [°C]	Luftmassenstrom je kg _{TS} [m³/h/kg]
3.1	9,08	20,00	19,33
3.2	5,85	20,13	24,62
3.3	4,33	29,99	10,52
3.4	3,81	30,05	12,31
3.5	3,29	39,15	10,93
3.6	2,90	39,04	12,32

Auch bei der Trocknung des Materials 3 zeigen sich die gleichen Zusammenhänge wie bei den vorangegangenen Trocknungsversuchen. Durch eine Steigerung des Luftmassenstromes von 19,33 auf 24,62 m³/h/kg_{TS} konnte eine Reduktion der Trocknungszeit von 9,08 auf 5,85 min/kg_{TS} erzielt werden. Bei einer Trocknung mit 30 °C und einem Luftmassenstrom von 10,52 m³/h/kg_{TS} konnte die Trocknungsgeschwindigkeit nochmals gegenüber dem Versuch 2 gesenkt werden, obwohl der Luftmassenstrom nur von 24,62 auf 10,52 m³/h/kg_{TS} reduziert wurde. Mit einer weiteren Steigerung der Trocknungslufttemperatur auf 40 °C bei gleich bleibender Trocknungslufttemperatur konnte eine weitere Reduktion der Trocknungsdauer auf 3,29 bzw. 2,90 min/kg_{TS} erzielt werden. Auch hier zeigt sich, dass die Trocknungsdauer durch eine Erhöhung der Trocknungstemperatur bzw. des Luftmassenstromes reduziert werden kann.

3.7.3.3 Trocknungsvermögen

Nachfolgend ist in Tabelle 3-17 das Trocknungsvermögen der einzelnen Versuche dargestellt.

Tabelle 3-17 Trocknungsvermögen der Versuchsserien von Material 3

Versuch	Trocknungsvermögen [g/m ³]
3.1.1	4,37
3.2.1	3,95
3.2.2	4,91
3.2.3	4,00
3.3.1	5,99
3.4.1	5,81
3.5.1	8,27
3.5.2	8,16
3.6.1	7,98
3.6.2	8,04

Es ist zu erkennen, dass das Trocknungsvermögen mit der Höhe der Trocknungslufttemperatur zunimmt, wodurch es zu einer Beschleunigung der Trocknungsgeschwindigkeit kommt. In Abbildung 3-22 ist das Trocknungsvermögen der einzelnen Versuche dargestellt.

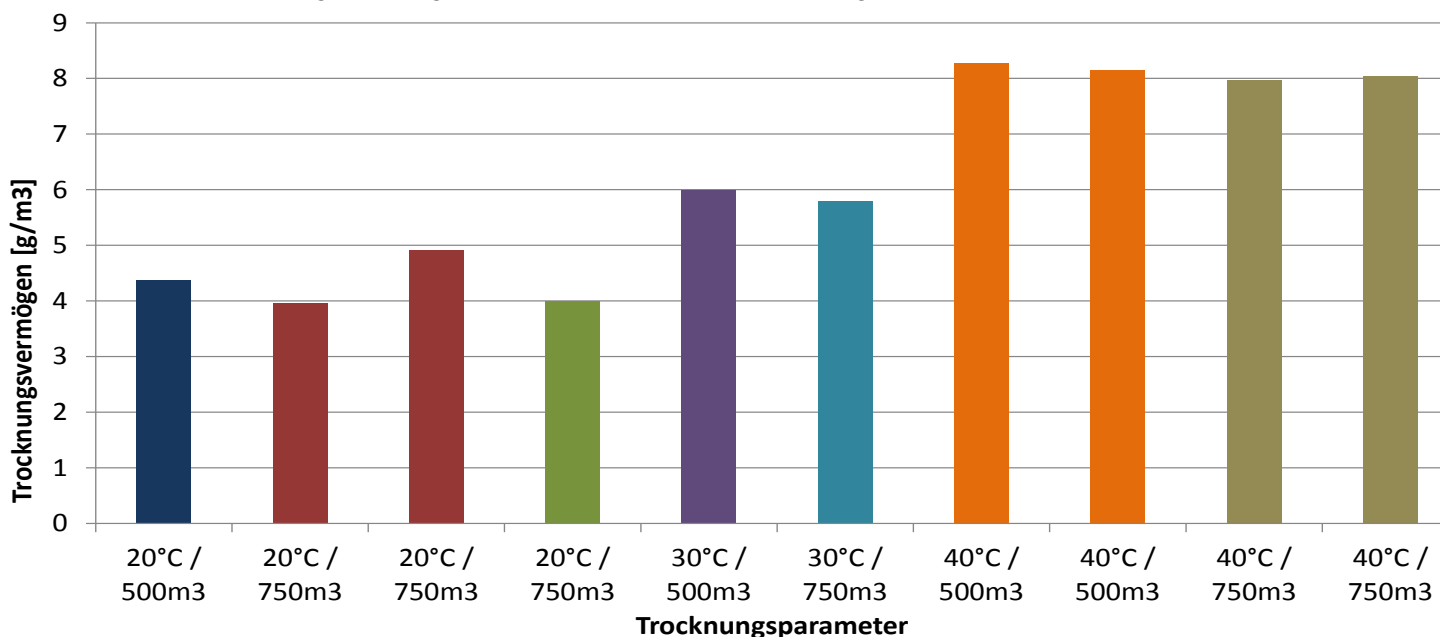


Abbildung 3-22 Trocknungsvermögen der Versuchsserien von Material 3

3.7.3.4 Wirkungsgrad

Tabelle 3-18 stellt für die Versuchsserie mit dem Material 3 den thermischen Energieeinsatz, den Wirkungsgrad sowie die notwendige Energiemenge dar, um 1 kg Wasser zu verdampfen.

Tabelle 3-18 Eingebraachte Energiemengen und Wirkungsgrade der Versuchsserien von Material 3

Versuch Nr.	Eingebraachte Wärmemenge [kWh]	Wirkungsgrad th [%]	Wärmemenge je kg Wasser [kWh/kg]
3.1.1	24,63	28,76	2,38
3.2.1	16,58	38,24	1,79
3.2.2	18,37	65,87	1,04
3.2.3	17,25	36,49	1,87
3.3.1	25,21	47,21	1,45
3.4.1	26,89	44,40	1,54
3.5.1	24,44	50,46	1,35
3.5.2	23,61	50,09	1,36
3.6.1	25,23	48,28	1,42
3.6.2	19,54	61,57	1,11

Die eingebrachte Energiemenge schwankt bei diesen Versuchen zwischen 16,58 und 26,89 kWh, wobei der niedrigste Wert beim Trocknungsversuch 3.2.1 und der Höchstwert beim Versuch 3.4.1 erreicht wurde. Jedoch lag der Wirkungsgrad bei Versuch 3.2.1 mit 38,24 % leicht unter dem in Versuch 3.4.1 erreichten Wirkungsgrad mit 44,4 %. Daher zeigt sich auch kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der eingebrachten Energiemenge und dem Wirkungsgrad. Die Wirkungsgrade dieser Trocknungsversuche lagen in einem Bereich zwischen 28,87 und 61,57 %. Dies bedeutet, dass bei diesen Trocknungsversuchen Wirkungsgrade über 60 % erreicht wurden. Nachfolgend sind in Abbildung 3-23 die eingebrachten Energiemengen sowie der Wirkungsgrad der einzelnen Trocknungsversuche dargestellt.

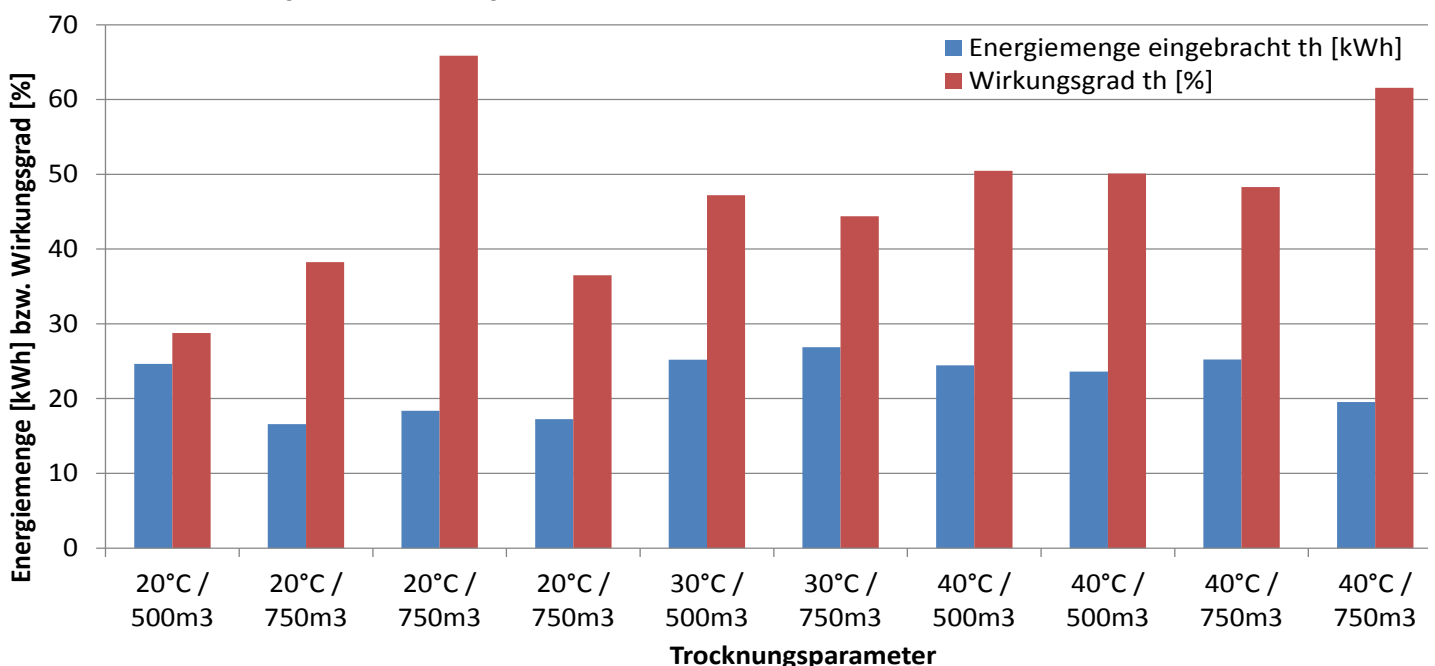


Abbildung 3-23 Eingebraachte Energiemenge und Wirkungsgrade der Versuchsserien von Material 3

Es ist zu erkennen, dass die eingebrachte Energiemenge bei allen Versuchen in einem ähnlichen Bereich liegt. Der Wirkungsgrad der Trocknung steigt mit zunehmender Trocknungslufttemperatur leicht an. Die Energiemenge je kg entferntes Wasser verhält sich auch bei der Versuchsserie 3 wie in Abbildung 3-24 dargestellt indirekt proportional zum Wirkungsgrad. Je kleiner die Energiemenge ist um eine kg Wasser zu entfernen, desto höher ist der Wirkungsgrad.

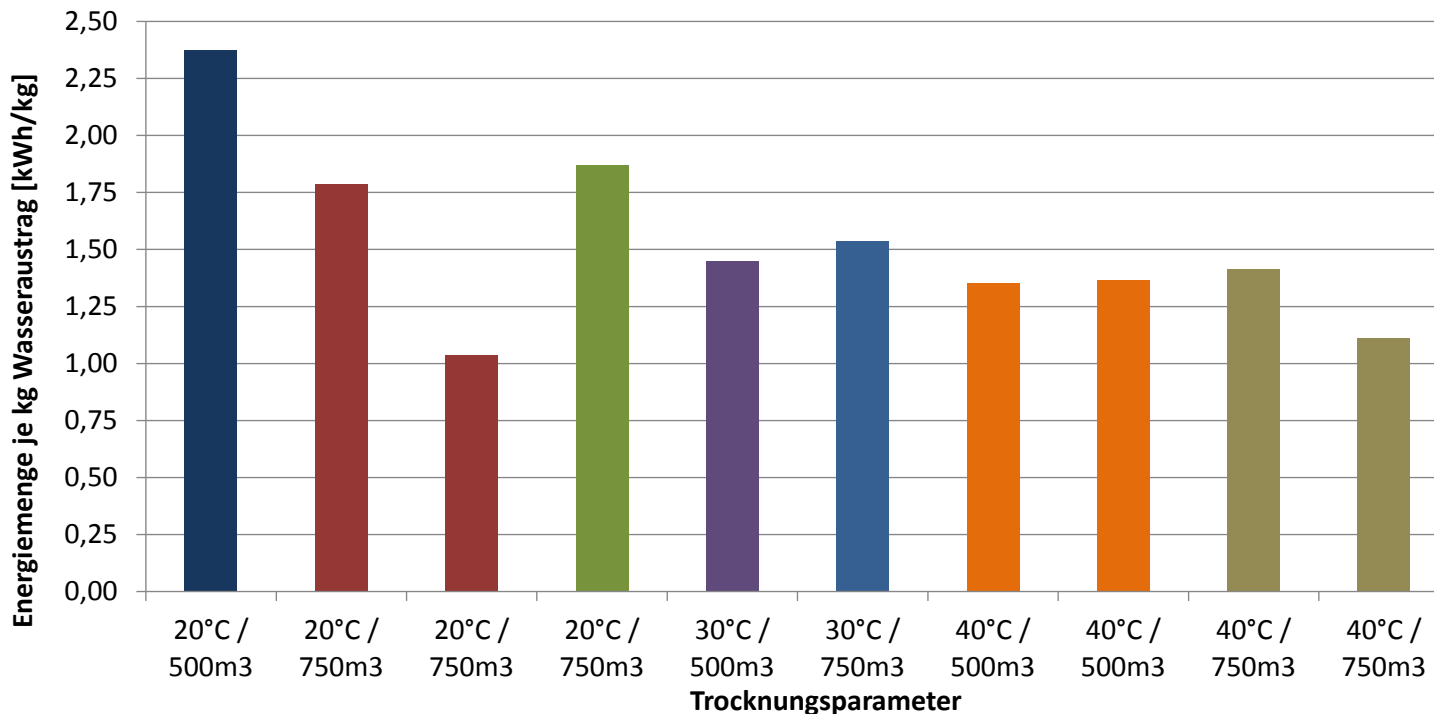


Abbildung 3-24 Eingebrachte Wärmemenge je kg Wasseraustrag der Versuchsserien von Material 3

3.7.3.5 Zusammenfassung der Versuchsserie mit Material 3

Auch anhand der durchgeführten Trocknungsversuche mit dem Material 3 konnten die vorangegangenen Zusammenhängen der Trocknung bestätigt werden. Die Wirkungsgrade dieser Trocknungsversuche lagen in einem Bereich zwischen 28,87 und 61,57 %. Der höchste Wirkungsgrad konnte bei der Trocknung mit niedriger Temperatur (20 °C) und niedrigem Luftmassenstrom erzielt werden. Die erreichten Wirkungsgrade dieser Versuchsserie liegen höher, als bei den Trocknungsserien 1 und 2.

3.8 Vergleich der normierten Trocknungsversuche

Um die Unterschiede der verschiedenen Materialien, der Trocknungsdauer und der Wirkungsgrade zu vergleichen, werden hierfür die Werte des Materials 1 auf einen Bereich zwischen einem Wassergehalt von 35 und 20 % bezogen. Bei diesen Vergleichen bestehen gleiche Trocknungstemperaturen und Luftmassenströme. Weiters werden die Trocknungsversuche in Gruppen gleicher Trocknungstemperatur und in Bereiche ähnlicher Luftmassenströme eingeteilt, welche bezogen auf die Trockenmasse spezifisch dargestellt werden. Daher ergibt sich der nachfolgend dargestellte Vergleich für Trocknungstemperaturen von 20 °C und 40 °C.

3.8.1 Vergleich der Trocknungsversuche bei 20 °C Trocknungslufttemperatur

Für einen Vergleich der Trocknungsversuche mit einer Trocknungslufttemperatur von 20 °C ergeben sich aufgrund des Luftmassenstromes zwei zu vergleichende Gruppen. Diese sind in Tabelle 3-19 dargestellt.

Tabelle 3-19 Vergleich normierter Trocknungsversuche bei 20 °C Trocknungslufttemperatur

Versuch Nr.	Luftmassenstrom je kg_{TS} [$\text{m}^3/\text{h}/\text{kg}$]	Trocknungsdauer [$\text{min}/\text{kg}_{\text{TS}}$]	Wirkungsgrad η [%]	Energiemenge Wasser [kWh/kg]
1.1.1	8,04	11,16	31,91	2,14
1.1.2	7,51	8,50	33,07	2,07
1.1.3	8,48	8,18	28,08	2,43
2.1.1	10,26	9,38	51,73	1,32
1.2.1	14,86	5,69	35,36	1,93
2.2.1	14,72	5,91	46,76	1,46
3.2.2	12,55	4,57	65,87	1,04

Für die erste Vergleichsgruppe, in der das Material 1 sowie das Material 2 verglichen werden, beträgt der Luftmassenstrom zwischen 7,51 und 10,26 $\text{m}^3/\text{h}/\text{kg}$. Es zeigt sich, dass die Trocknungsdauer in einem annähernd gleichen Bereich liegt. Der größte Unterschied zwischen den einzelnen Versuchen tritt bei der Betrachtung des Wirkungsgrads auf. Während bei der Trocknung des Materials 1 Wirkungsgrade zwischen 28,08 und 33,07 % erreicht wurden, erzielte die Trocknung des Materials 2 einen Wirkungsgrad von 51,73 %. Da die Trocknungsparameter gleich waren, wurde der hohe Wirkungsgrad durch das unterschiedliche Material sowie durch die Umgebungsbedingungen beeinflusst. In Tabelle 3-20 sind die Außentemperatur sowie die Außenluftfeuchte dargestellt.

Tabelle 3-20 Außenbedingungen der Versuchsserie mit einer Trocknungslufttemperatur von 20 °C und einem Luftmassenstrom zwischen 7 und 10 $\text{m}^3/\text{h}/\text{kg}$

Versuch Nr.	Außentemperatur [°C]	Außenluftfeuchte [%]
1.1.1	2,80	92,71
1.1.2	-1,51	78,71
1.1.3	-6,72	79,01
2.1.1	6,93	58,70

Es ist zu erkennen, dass sich der Trocknungsversuch 2.1.1, der auch den höchsten Wirkungsgrad aufweist, bei den Außenbedingungen von den anderen Versuchen deutlich unterscheidet. Die Außenluft war signifikant wärmer und die relative Luftfeuchte war niedriger. Durch die geringere Aufwärmspanne auf 20 °C ist der Energieeintrag geringer. Daraus resultiert auch der höhere Wirkungsgrad. Ob sich diese Annahme bestätigt zeigt sich in Kapitel 3.9.

Bei der Trocknung mit höheren Massenströmen zwischen 12,55 und 14,86 $\text{m}^3/\text{h}/\text{kg}$ können alle drei Materialien verglichen werden. Auch hier zeigt sich, dass der Wirkungsgrad für die Trocknung des ersten Materials mit 35,36 % am niedrigsten ist. An zweiter Stelle liegt mit 46,76 % das Trocknungsmaterial 2. Der beste Wirkungsgrad mit 65,87 % wurde, wie in der ersten Versuchsgruppe, mit dem Trocknungsmaterial 3 erreicht. Auch hier können wieder Einflüsse der

Umgebungsbedingungen eine wichtige Rolle spielen. Daher sind in Tabelle 3-21 die Außenbedingungen für diese Versuche dargestellt.

Tabelle 3-21 Außenbedingungen der Versuchsserie mit einer Trocknungslufttemperatur von 20 °C und einem Luftmassenstrom zwischen 12 und 14 m³/h/kg

Versuch Nr.	Außentemperatur [°C]	Außenluftfeuchte [%]
1.2.1	3,65	89,88
2.2.1	3,56	71,08
3.2.2	4,28	31,71

Auch hier zeigt sich, dass der Versuch 3.2.2. mit dem höchsten Wirkungsgrad die höchste Außentemperatur und die niedrigste relative Luftfeuchte aufweist. Jedoch ist der Unterschied geringer wie beim ersten Vergleich. Es wird die Annahme unterstützt, dass durch eine geringe Aufwärmspanne bei gleichzeitiger niedriger relativer Luftfeuchte der Wirkungsgrad am höchsten ist.

3.8.2 Vergleich der Trocknungsversuche bei 40 °C Trocknungslufttemperatur

Für einen Vergleich der Trocknungsversuche mit einer Trocknungslufttemperatur von 40 °C ergeben sich aufgrund des Luftmassenstromes drei zu vergleichende Gruppen. Diese sind in Tabelle 3-22 dargestellt.

Tabelle 3-22 Vergleich normierter Trocknungsversuche für 40 °C

Versuch Nr.	Luftmassenstrom je kg _{TS} [m ³ /h/kg]	Trocknungsdauer [min/kg _{TS}]	Wirkungsgrad th [%]	Energiemenge th/kg Wasser [kWh/kg]
1.3.1	8,12	4,71	29,30	2,33
1.3.2	9,19	4,81	35,11	1,95
2.5.1	8,37	5,11	37,85	1,81
3.5.1	10,45	3,32	50,46	1,35
2.6.1	12,2	3,1	41,7	1,6
3.5.2	11,4	3,3	50,1	1,4
3.6.1	12,4	2,9	48,3	1,4
3.6.2	12,2	2,9	61,6	1,1
1.4.1	14,94	2,54	34,33	1,99
1.4.2	14,53	2,60	34,57	1,98
1.4.3	15,34	2,79	33,51	2,04
2.6.2	14,24	3,73	45,68	1,50

In der ersten Vergleichsgruppe werden das Material 1, 2 und 3 mit einem Luftmassenstrom zwischen 8,12 und 10,45 m³/h/kg_{TS} verglichen. Die Trocknungsdauer der ersten beiden Versuche mit dem gleichen Material liegen nahe beieinander. Die Trocknungsdauer des Versuches 2.5.1 mit dem zweiten Material liegt leicht darüber. Einen signifikanten Unterschied bei der Trocknungsdauer gibt es hingegen bei Versuch 3.5.1, bei welchem die Trocknungszeit 3,32 min/kg_{TS} beträgt. Auch die Wirkungsgrade der Trocknung steigen mit der Korngröße des Materials an und der höchste Wirkungsgrad wird wieder bei der Trocknung des Materials 3 erreicht. Da auch hier die Außeneinflüsse eine wichtige Rolle spielen können, sind diese in Tabelle 3-23 dargestellt.

Tabelle 3-23 Außenbedingungen der Versuchsserie mit einer Trocknungslufttemperatur von 40 °C und einem Luftmassenstrom zwischen 8 und 10 m³/h/kg

Versuch Nr.	Außentemperatur [°C]	Außenluftfeuchte [%]
1.3.1	-7,23	70,45
1.3.2	3,54	81,87
2.5.1	-0,17	67,81
3.5.1	4,65	67,71

Es ist zu erkennen, dass der höchste Wirkungsgrad mit 50,46 % bei der höchsten Außentemperatur erreicht wurde. Der geringste Wirkungsgrad mit 29,3 % wurde bei der niedrigsten Außentemperatur von -7,23 °C erreicht.

In der zweiten Vergleichsgruppe wurden das Material 2 und 3 mit einem Luftmassenstrom zwischen 11,4 und 12,4 m³/h/kg_{TS} verglichen. Die Trocknungsdauer liegt mit Werten zwischen 2,9 und 3,3 min/kg_{TS} in einem engen Bereich und zeigt daher keine wesentlichen Unterschiede. Signifikante Unterschiede gibt es jedoch bei den Wirkungsgraden der Trocknung. Diese bewegen sich zwischen 41,7 % (2.6.1) sowie 61,6 % (3.6.2). Der höchste Wirkungsgrad wurde mit dem Trocknungsmaterial 3 erreicht. Jedoch variiert auch bei der Trocknung dieses Materials der Wirkungsgrad zwischen den einzelnen Messungen. Daher sind in Tabelle 3-24 die Außenbedingungen dieser Versuche dargestellt.

Tabelle 3-24 Außenbedingungen der Versuchsserie mit einer Trocknungslufttemperatur von 40 °C und einem Luftmassenstrom zwischen 11 und 12 m³/h/kg

Versuch Nr.	Außentemperatur [°C]	Außenluftfeuchte [%]
2.6.1	-1,10	64,93
3.5.2	5,63	36,74
3.6.1	2,75	63,76
3.6.2	11,65	41,31

Ein höherer Wirkungsgrad ist auch bei dieser Versuchsserie von einer höheren Außentemperatur abhängig. Der niedrigste Wirkungsgrad mit 41,7 % wurde bei einer Temperatur der Außenluft von -1,10 °C erreicht. Der höchste Wirkungsgrad mit 61,6 % wurde bei einer Außentemperatur von 11,65 °C erreicht.

In der dritten Vergleichsgruppe wird das Material 1 und 2 mit einem Luftmassenstrom zwischen 14 und 15 m³/h/kg_{TS} verglichen. Die Trocknungsdauer des Materials 1 bewegt sich in einem Bereich zwischen 2,54 und 2,79 min/kg_{TS}. Die Trocknungsdauer des Materials 3 liegt hingegen mit 3,73 min/kg_{TS} etwas darüber. Die Wirkungsgrade der Trocknung des Materials 1 liegen mit Werten zwischen 33,51 und 34,57 % nahe zusammen. Der Wirkungsgrad der Trocknung des Materials 2 liegt mit 45, 68 % wieder deutlich darüber. Da auch hier die Außeneinflüsse eine wichtige Rolle spielen sind diese in Tabelle 3-25 dargestellt.

Tabelle 3-25 Außenbedingungen der Versuchsserie mit einer Trocknungslufttemperatur von 40 °C und einem Luftmassenstrom zwischen 14 und 15 m³/h/kg

Versuch Nr.	Außentemperatur [°C]	Außenluftfeuchte [%]
1.4.1	-2,27	73,78
1.4.2	-1,26	77,87
1.4.3	-0,23	85,73
2.6.2	9,46	44,62

Die Außentemperatur bei den Trocknungsversuchen des Trocknungsmaterials 1 liegen wie die Wirkungsgrade nahe beieinander. Die Außenlufttemperatur des Versuches 2.6.2 liegt mit 9,46 °C signifikant darüber, wodurch auch der höhere Wirkungsgrad erklärt werden kann.

3.8.3 Zusammenfassung

Die Trocknungsdauer der einzelnen Versuche hängt wesentlich von der Trocknungslufttemperatur ab. Je höher die Trocknungslufttemperatur ist, desto geringer wird die Trocknungsdauer. Einen weiteren starken Einfluss auf die Dauer der Trocknung hat die Trocknungsluftmenge. Mit einem Anstieg der Trocknungsluftmenge wird die Trocknungsdauer geringer. Diese Sachverhalte sind bei allen Trocknungen unabhängig vom eingesetzten Material zu beobachten.

Anhand dieser Gegenüberstellung konnten bereits die wesentlichen Einflüsse auf die Trocknungsparameter festgestellt werden. Der Wirkungsgrad ist, abhängig von der Außentemperatur, starken Schwankungen unterworfen. Je höher die Außenlufttemperatur ist, desto höher ist auch der Wirkungsgrad. Um diese Zusammenhänge genauer untersuchen zu können wird im nachfolgenden Kapitel eine Korrelationsanalyse einzelner Parameter durchgeführt.

3.9 Korrelationsanalyse

Mit Hilfe der Korrelationsanalyse soll herausgefunden werden, welcher Trocknungsparameter einen wesentlichen Einfluss auf die Trocknung besitzt. Als relevante Parameter der Trocknung werden die Trocknungsdauer und der Wirkungsgrad angesehen. Bei der Korrelationsanalyse wurde nicht zwischen den einzelnen Materialien unterschieden, da es keinen erkennbaren direkten Zusammenhang zwischen der Trocknungsdauer und dem Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Trocknungsmaterial gibt.

Hängt ein metrisch skaliertes Merkmal von einem anderen, zweiten Merkmal ab, kann dieser Zusammenhang mit Hilfe der empirischen Regression erkannt und dargestellt werden. Der erste Zusammenhang kann anhand der Darstellung einer Punktwolke in einem Streudiagramm erkannt werden. Wenn von einer linearen Abhängigkeit ausgegangen wird, ist die Erstellung einer Trendlinie (Regressionsgerade) durch diese Punkte sinnvoll. Weiters wurde das Bestimmtheitsmaß auf Basis der Trendlinie bestimmt, welches immer zwischen 0 und 1 liegt. Der Wert 1 bedeutet, dass alle Punkte exakt auf der Regressionsgeraden liegen und ein absolut linearer Zusammenhang besteht. Beträgt der Wert 0, besteht kein linearer Zusammenhang. [Neue Statistik, 2003]

3.9.1 Trocknungsdauer

Um die vorhandenen Einflüsse auf die Trocknungsdauer darstellen zu können, wurden folgende Abhängigkeiten untersucht, welche näher beschrieben werden:

- Trocknungsdauer in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur
- Trocknungsdauer in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom
- Trocknungsdauer in Abhängigkeit von der Trocknungsluftfeuchte

3.9.1.1 Trocknungsdauer in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur

Die Trocknungstemperatur stellt einen wichtigen Parameter bei der technischen Hackguttrocknung dar, da diese in Abhängigkeit von der Wärmequelle einfach gesteuert, gemessen und verändert werden kann. Abbildung 3-25 stellt die Trocknungsdauer für alle Luftmassenströme in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur dar. Es ist ein Zusammenhang zwischen der Trocknungsdauer und der Trocknungslufttemperatur zu erkennen. Das Bestimmtheitsmaß beträgt 0,558. Je höher die Trocknungslufttemperatur, desto geringer ist die Trocknungsdauer. Jedoch zeigt sich, dass es auch bei gleichen Trocknungstemperaturen große Unterschiede bei der Trocknungsdauer gibt (durch die

vertikale Verteilung der Punkte bei 20, 30 und 40 °C). Diese werden jedoch geringer, je höher die Trocknungslufttemperatur ist. Daher kann festgestellt werden, dass noch weitere Parameter bestehen, welche einen signifikanten Einfluss auf die Trocknungsdauer ausüben.

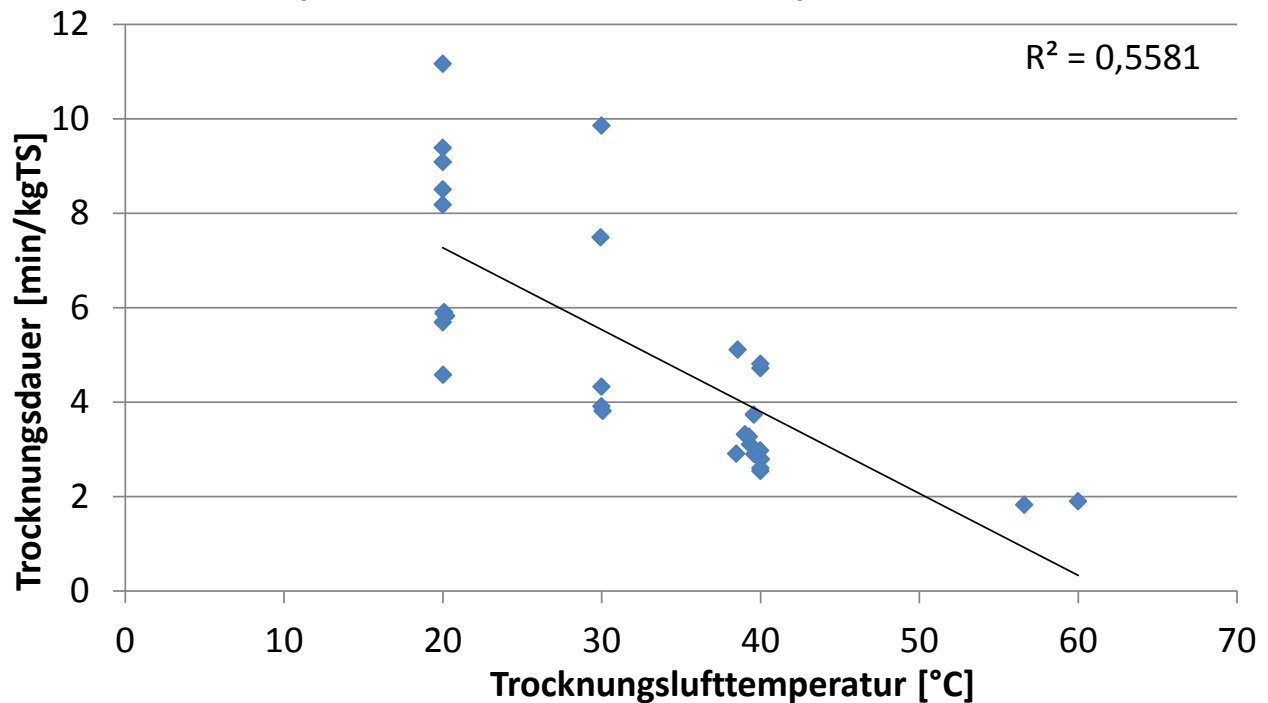


Abbildung 3-25 Darstellung der unterschiedlichen Trocknungszeiträume in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur

Um eine genauere Analyse zu ermöglichen, wurde in Abbildung 3-26 die Trocknungsdauer bei Luftmassenströmen zwischen 8 und 10 m³/h/kg_{TS} in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur betrachtet.

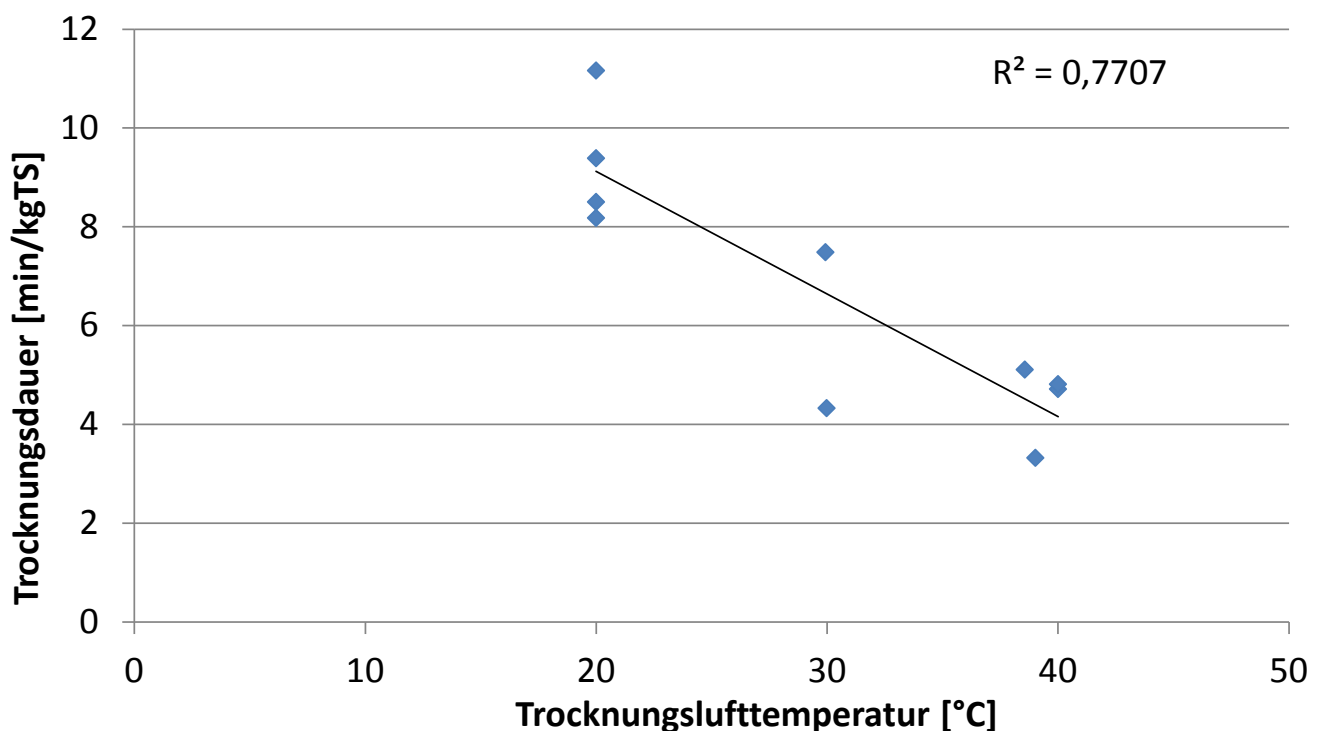


Abbildung 3-26 Darstellung der Trocknungszeiträume bei Luftmassenströmen zwischen 8 und 10 m³/h/kg_{TS} in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur

Auch hier zeigt sich der gleiche Sachverhalt. Die Trocknungsdauer sinkt mit höherer Trocknungslufttemperatur, auch wenn der Luftmassenstrom annähernd gleich bleibt. Dadurch ergibt sich eine Linearität, wodurch das Bestimmtheitsmaß auf einen Wert von 0,77 ansteigt. Dies deutet auf einen starken linearen Zusammenhang hin.

Abbildung 3-27 stellt die Trocknungsdauer bei Luftmassenströmen zwischen 12 und 14 m³/h/kg_{TS} in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur dar. Wenn mit höheren Trocknungsluftmassenströmen getrocknet wird, sinkt die Trocknungsgeschwindigkeit im Vergleich zu einer Trocknung mit einem Luftmassenstrom von 8 bis 10 m³/h/kg_{TS}. Der Zusammenhang zwischen Trocknungsdauer und Trocknungslufttemperatur bleibt jedoch gleich. Das Bestimmtheitsmaß ist mit 0,84 bereits hoch und stellt somit auch die höchste Linearität in diesem Vergleich dar.

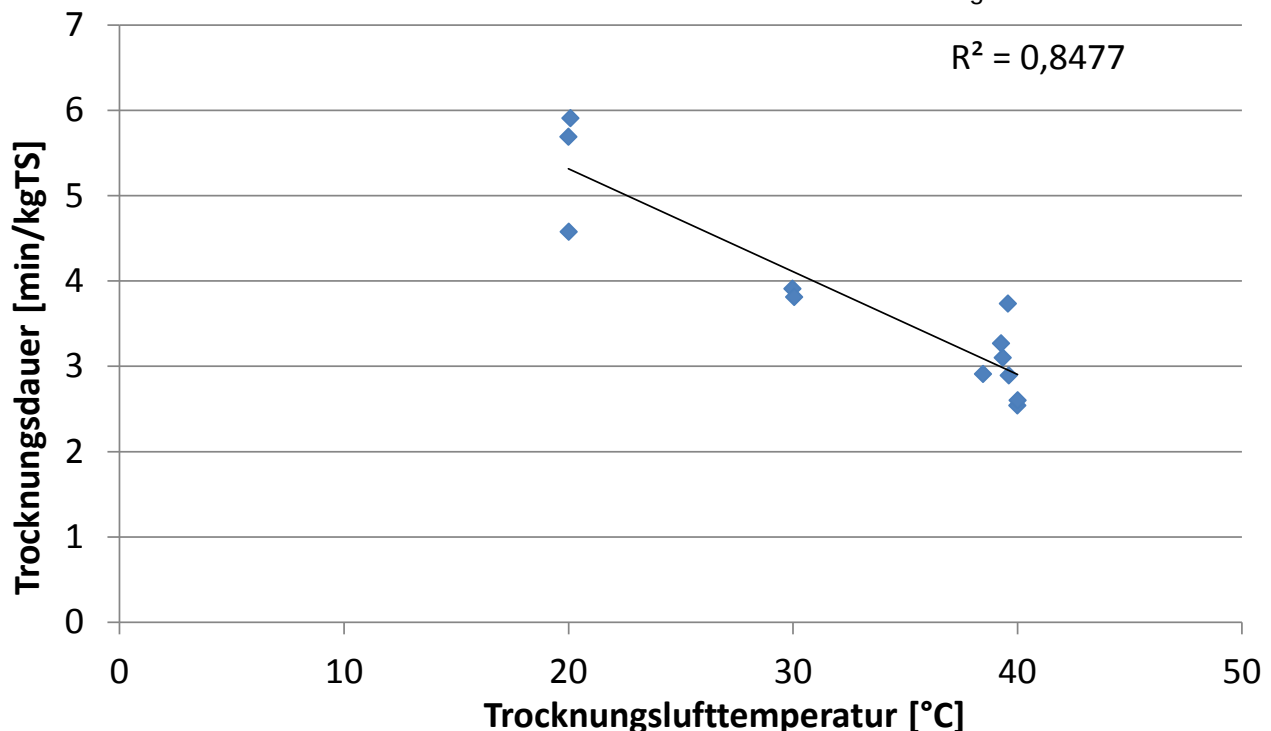


Abbildung 3-27 Darstellung der Trocknungszeiträume bei Luftmassenströmen zwischen 12 und 14 m³/h/kg_{TS} in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur

3.9.1.2 Trocknungsdauer in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom

Der Luftmassenstrom stellt nach der Trocknungslufttemperatur einen weiteren wichtigen Parameter dar. Der Luftmassenstrom wird in der Regel durch ein vorhandenes Gebläse in Stufen oder über einen Frequenzumformer stufenlos variiert. Abbildung 3-28 stellt die Trocknungsdauer für alle Trocknungslufttemperaturen in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom dar.

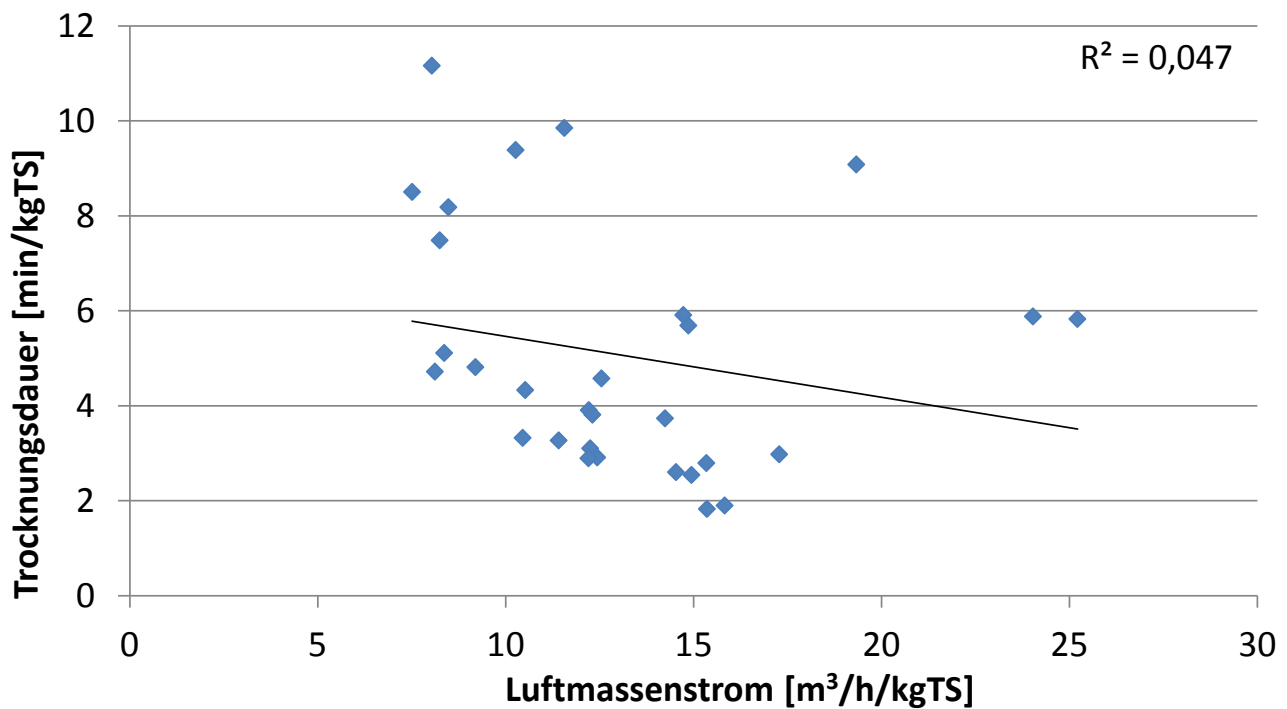


Abbildung 3-28 Darstellung der Trocknungszeiträume in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom

Über alle Versuche zeigt sich ein Zusammenhang zwischen dem Luftmassenstrom und der Trocknungsdauer. Es besteht eine Tendenz, dass mit reduzierter Trocknungsdauer ein Anstieg des Luftmassenstromes besteht. Um genauere Aussagen tätigen zu können wurde der Einfluss des Luftmassenstromes für Trocknungslufttemperaturen von 20 und 40 °C explizit analysiert. In Abbildung 3-29 ist die Trocknungsdauer bei einer Trocknungslufttemperatur von 20 °C in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom dargestellt.

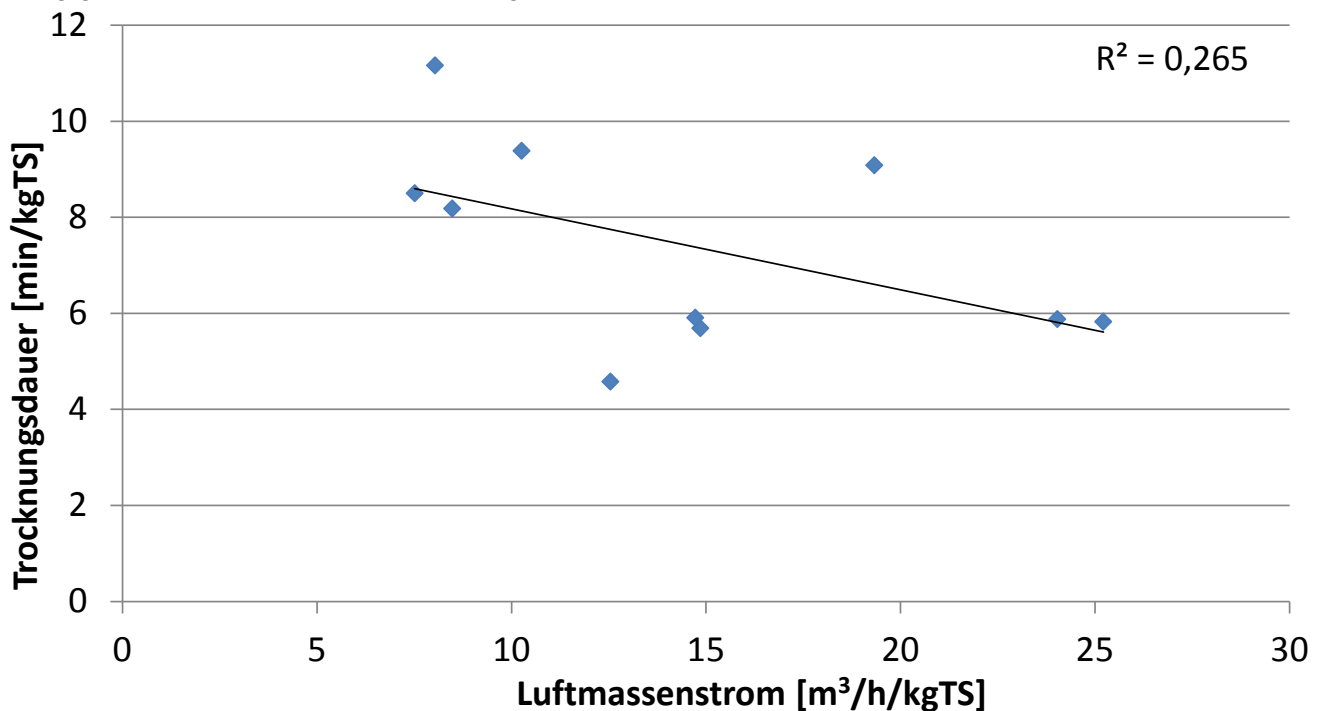


Abbildung 3-29 Darstellung der Trocknungszeiträume bei einer Trocknungslufttemperatur von 20 °C in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom

Die Trocknungsdauer nimmt mit zunehmendem Luftmassenstrom ab. Die Linearität, ausgedrückt durch das Bestimmtheitsmaß, liegt mit einem Wert von 0,265 im unteren Bereich. Daher beeinflusst dieser Parameter die Trocknungsdauer nur bedingt. Es ist anzunehmen, dass andere Parameter die Trocknungsdauer stärker beeinflussen.

In Abbildung 3-30 ist die Trocknungsdauer bei einer Trocknungslufttemperatur von 40 °C in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom dargestellt.

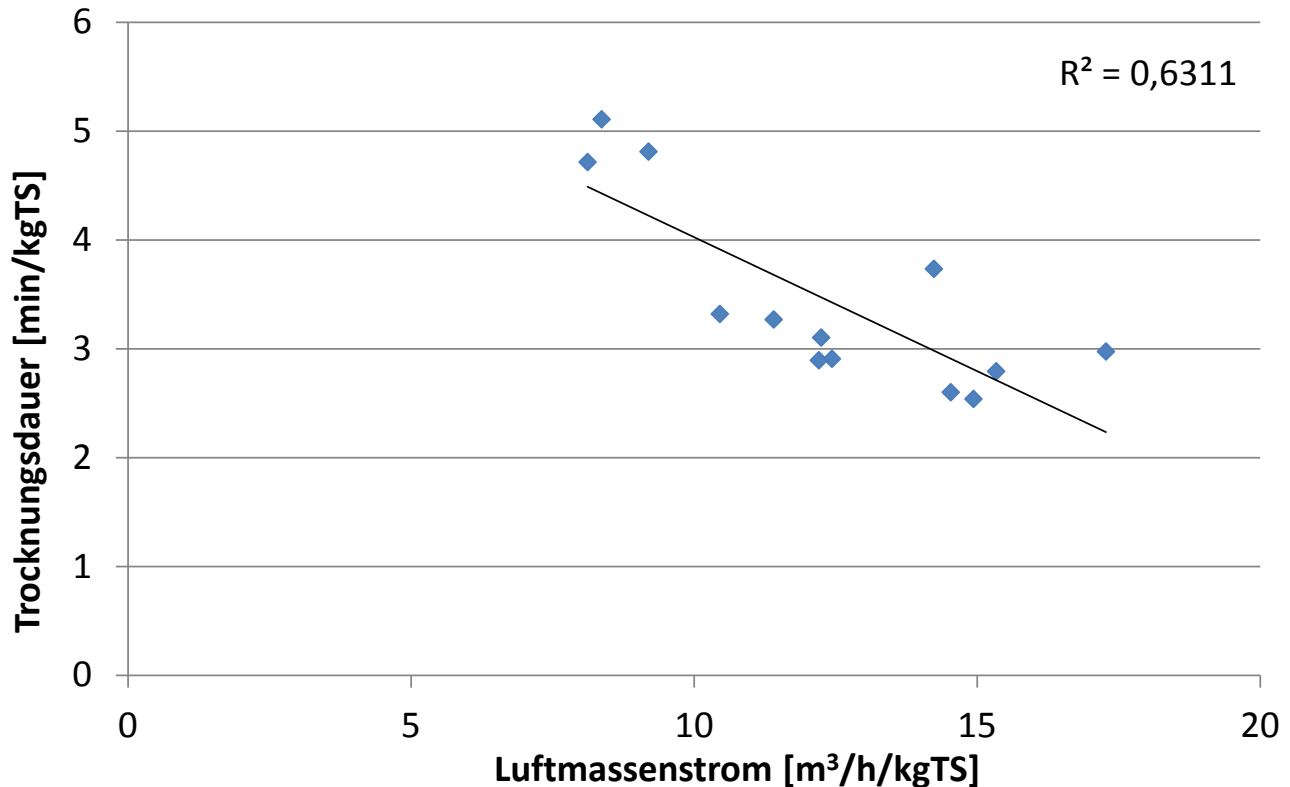


Abbildung 3-30 Darstellung der Trocknungszeiträume bei einer Trocknungslufttemperatur von 40 °C in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom

Die Trocknungsdauer liegt, wie zu erwarten ist, unter jener bei 20 °C Trocknungslufttemperatur. Es zeigt sich ein starker linearer Zusammenhang zwischen der Trocknungsdauer und dem Luftmassenstrom. Je höher der Luftmassenstrom ist, desto niedriger ist die Trocknungsdauer. Dies bedeutet, dass bei höheren Trocknungstemperaturen der Luftmassenstrom im Gegensatz zur Trocknung bei niedrigeren Temperaturen einen signifikanten Einfluss auf die Trocknungsdauer hat und eventuell andere vorhandene Einflussfaktoren überlagert werden.

3.9.1.3 Trocknungsdauer in Abhängigkeit von der Trocknungsluftfeuchte

Die Trocknungsluftfeuchte stellt den dritten wichtigen Trocknungsparameter dar. Diese wird von der Außenlufttemperatur, der relativen Luftfeuchte der Außenluft sowie der Temperaturerhöhung zur Trocknung beeinflusst. In Abbildung 3-31 ist die Trocknungsdauer für alle Temperaturen der Versuche und Luftmassenströme in Abhängigkeit von der Trocknungsluftfeuchte dargestellt.

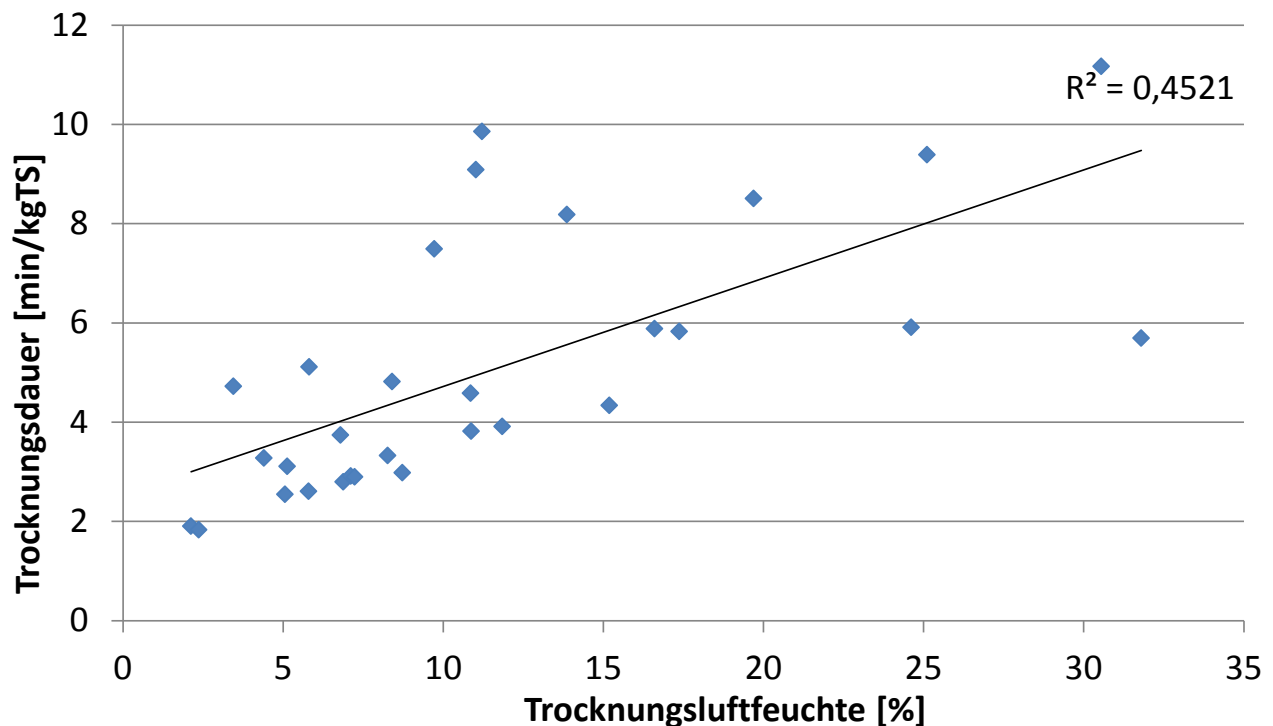


Abbildung 3-31 Darstellung der Trocknungszeiträume in Abhängigkeit von der Trocknungsluftfeuchte

Die Trocknungsluftfeuchte hat mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,45 einen mittleren Einfluss auf die Trocknungsdauer, wenn alle Temperaturen und Luftmassenströme betrachtet werden. Die Trocknungsdauer ist größer, je feuchter die Trocknungsluft ist. Um weitere Details herauszuarbeiten wurde der Einfluss der Trocknungsluftfeuchte für Trocknungslufttemperaturen von 20 und 40 °C dargestellt. In Abbildung 3-32 ist die Trocknungsdauer bei einer Trocknungslufttemperatur von 20 °C für alle Luftmassenströme illustriert.

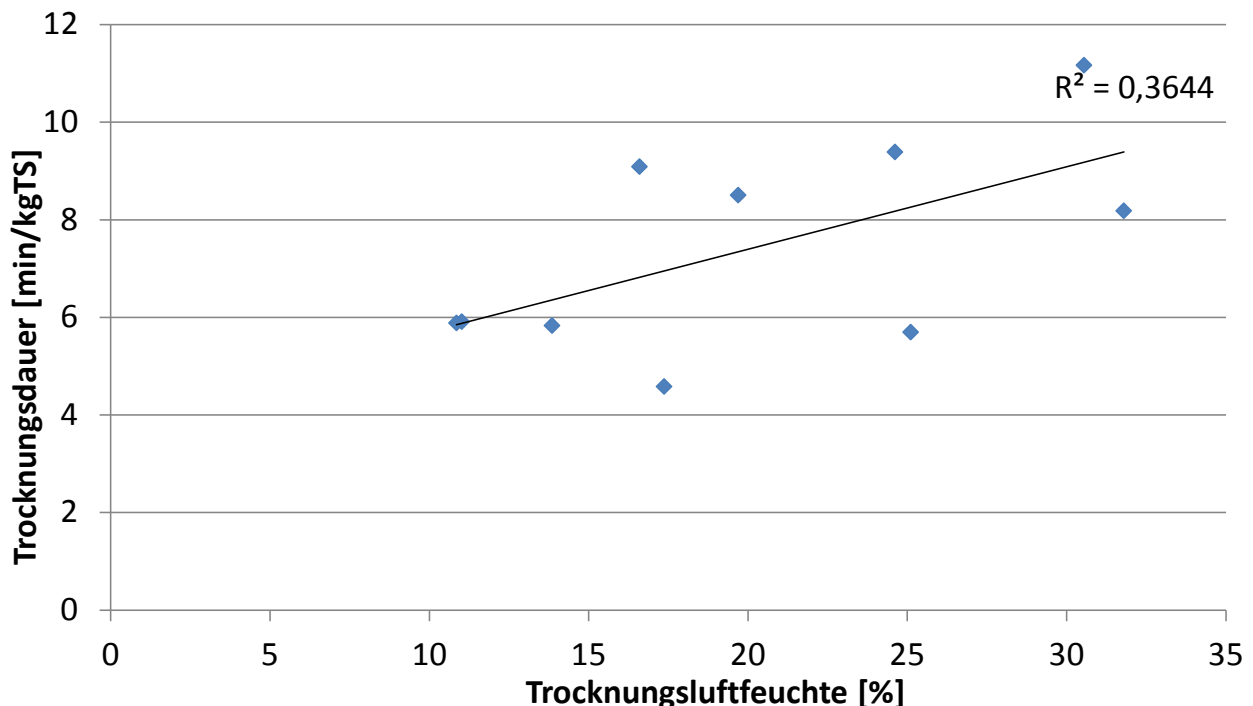


Abbildung 3-32 Darstellung der Trocknungszeiträume bei 20 °C Trocknungslufttemperatur in Abhängigkeit von der Trocknungsluftfeuchte

Es zeigt sich, dass bei einer Trocknungslufttemperatur von 20 °C und verschiedenen Luftmassenströmen die Trocknungsluftfeuchte einen signifikanten Einfluss auf die Trocknungsdauer aufweist. Dieser Einfluss ist jedoch mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,36 nicht stark ausgeprägt. Daher wurde in Abbildung 3-33 die Trocknungsdauer bei 20 °C Trocknungslufttemperatur und Luftmassenströmen in einem Bereich zwischen 8 und 10 m³/h/kg_{TS} dargestellt.

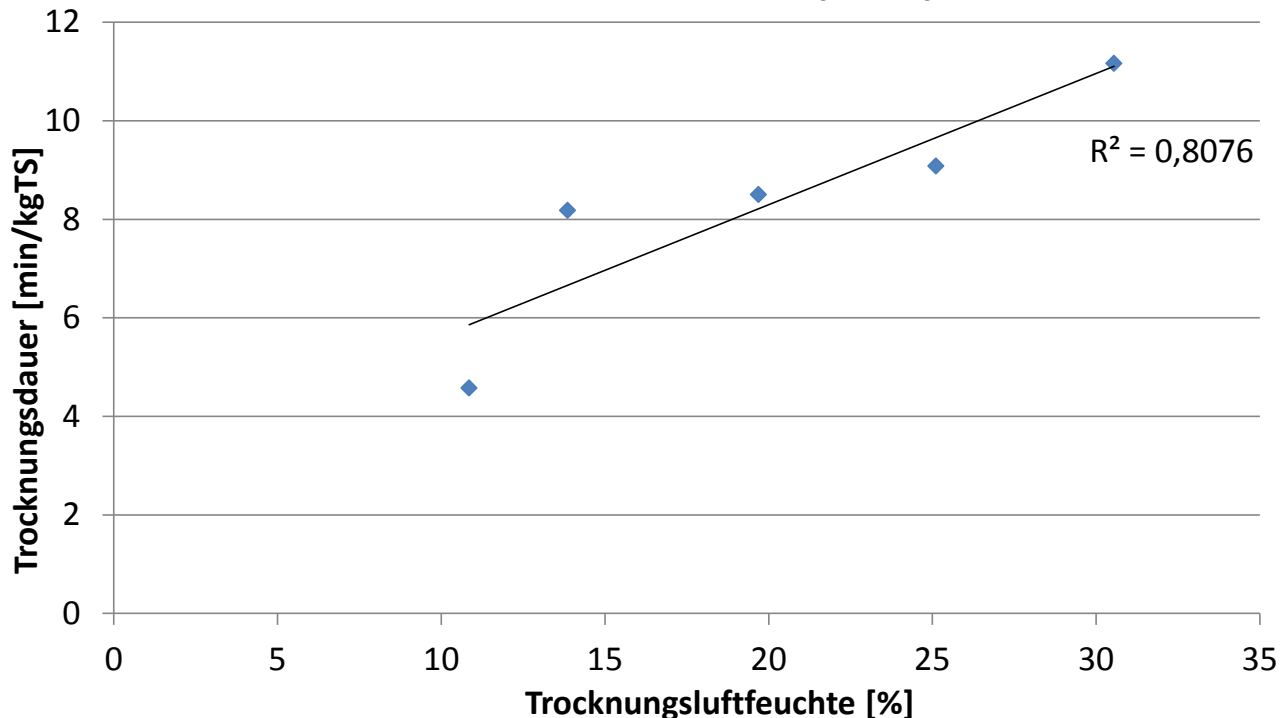


Abbildung 3-33 Darstellung der Trocknungszeiträume bei 20 °C Trocknungslufttemperatur und einem Luftmassenstrom zwischen 8 und 10 m³/h/kg_{TS}

Durch Betrachtung der Abbildung zeigt sich ein signifikanter Zusammenhang. Wie mit der Literatur verglichen werden kann, steigt die Trocknungsdauer mit zunehmender Trocknungsluftfeuchte an. Dies hat vor allem für niedriger Trocknungstemperaturen eine große Relevanz. Wenn die Außenluft bereits warm und sehr feucht ist, kann die Trocknungsdauer dadurch stark ansteigen. Die Trocknungsluftfeuchte und die korrespondierende Trocknungslufttemperatur haben den höchsten Einfluss auf die Trocknung im unteren Temperaturbereich. Wie bereits dargestellt wurde, ist dies jener Parameter, der bei niedrigen Temperaturen einen höheren Einfluss als der Trocknungsluftmassenstrom aufweist.

In Abbildung 3-34 wird die Trocknungsdauer bei 40 °C für alle Luftmassenströme dargestellt. Bei einer Trocknung mit 40 °C Lufttemperatur hat die Trocknungsluftfeuchte keinen signifikanten Einfluss auf die Trocknungsdauer. Dies liegt jedoch nicht vorrangig an der Trocknungstemperatur, sondern an der niedrigen Trocknungsluftfeuchte, die in einem Bereich zwischen 4 und 8 % liegt. Würde die Trocknungsluftfeuchte in einem Bereich wie bei der Trocknung mit 20 °C liegen, wäre auch hier bei höheren Temperaturen ein größerer Einfluss zu erkennen.

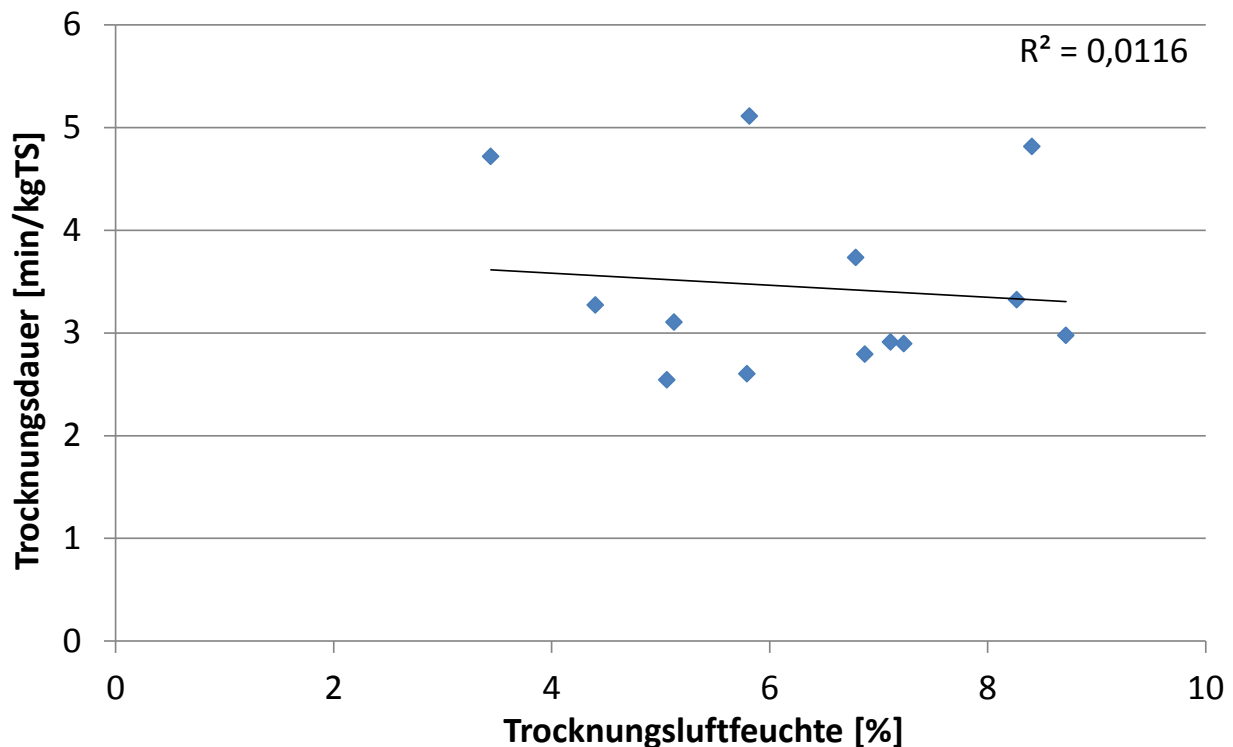


Abbildung 3-34 Darstellung der Trocknungsdauer bei 40 °C Trocknungslufttemperatur in Abhängigkeit von der Trocknungsluftfeuchte

3.9.2 Wirkungsgrad

Um die vorhandenen Einflüsse auf den Wirkungsgrad darstellen zu können, wurden folgende Abhängigkeiten untersucht:

- Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur
- Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom
- Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur
- Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Außenluftfeuchte
- Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Aufwärmspanne

3.9.2.1 Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur

In Abbildung 3-35 ist die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Trocknungslufttemperatur für alle Luftmassenströme dargestellt. Die Trocknungslufttemperatur hat keinen signifikanten Einfluss auf den Wirkungsgrad der Trocknung. Dies ist durch die vertikale Verteilung der Punkte bei den verschiedenen Trocknungstemperaturen zu erkennen. Dies bedeutet, dass der Wirkungsgrad unabhängig von der Trocknungstemperatur starken Schwankungen unterworfen ist. Daher ist eine weitere Detaildarstellung dieses Zusammenhanges nicht notwendig.

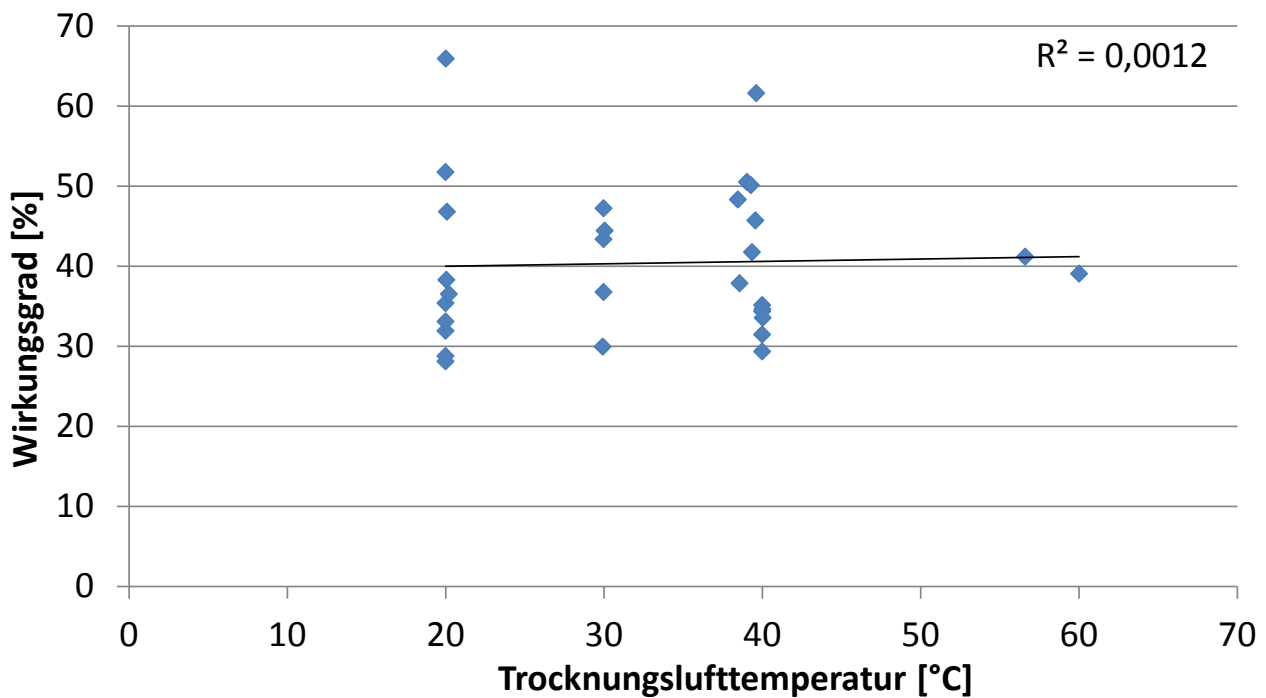


Abbildung 3-35 Darstellung der Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur

3.9.2.2 Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom

Abbildung 3-36 stellt den Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom für alle Temperaturen dar. Auch die Trocknungsluftmenge hat keinen signifikanten Einfluss auf den Wirkungsgrad der Trocknung. Auf eine weitere Detaildarstellung des Wirkungsgrades wird an dieser Stelle verzichtet, da diese keine neuen Zusammenhänge liefert. Dies bedeutet, dass die Trocknungstemperatur und die Trocknungsluftmenge keinen signifikanten Einfluss auf den Wirkungsgrad haben. Somit wird der Wirkungsgrad von anderen Parametern beeinflusst.

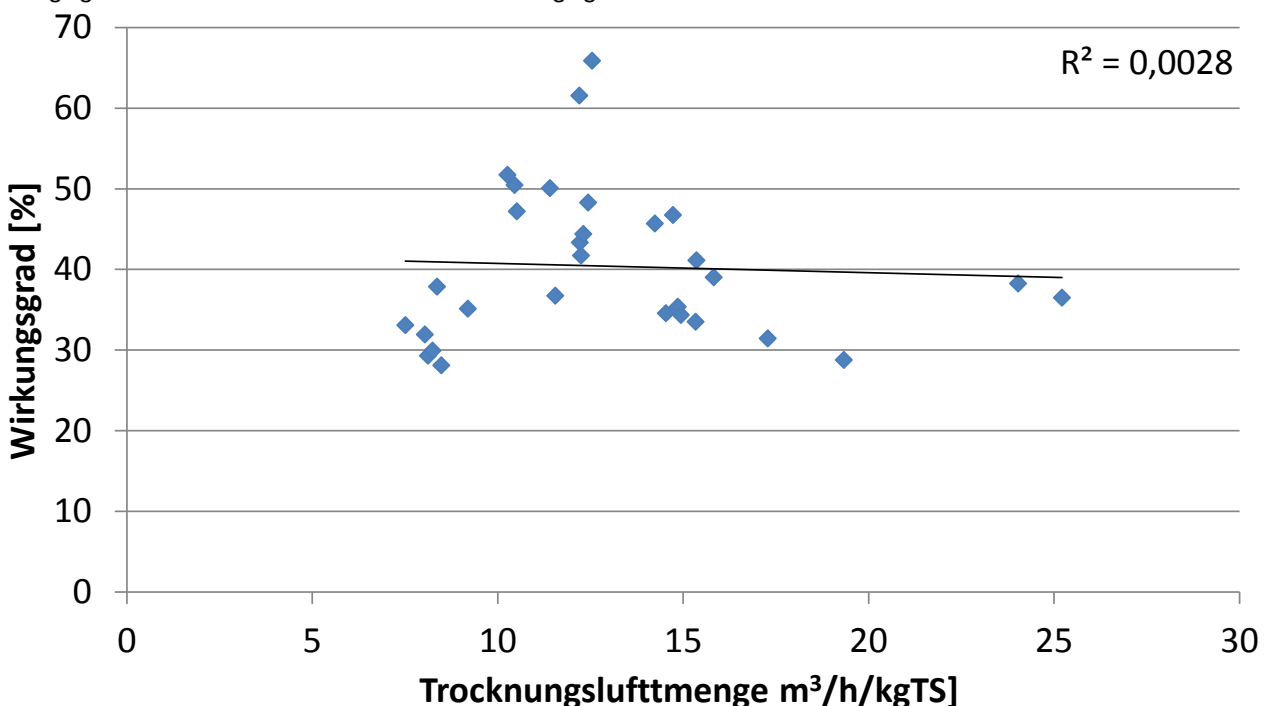


Abbildung 3-36 Darstellung der Wirkungsgrade in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom

3.9.2.3 Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

Nachfolgend ist in Abbildung 3-37 der Wirkungsgrad für alle Temperaturen und Luftmassenströme in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur dargestellt.

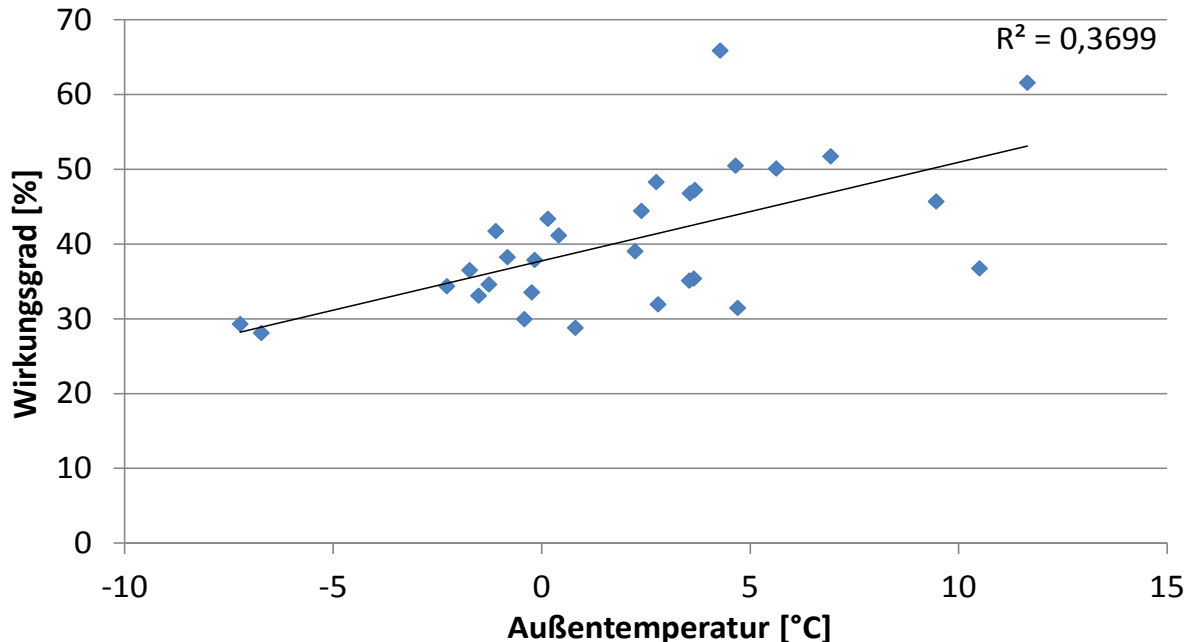


Abbildung 3-37 Darstellung der Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

Zwischen dem Wirkungsgrad und der Außentemperatur besteht ein Zusammenhang. Bei steigender Außenlufttemperatur steigt auch der Wirkungsgrad. Die Trocknungsversuche wurden hierbei bei Außentemperaturen zwischen -7 und 14 °C durchgeführt. Damit weitere Details erarbeitet werden können, wurde der Einfluss der Außentemperatur für Trocknungslufttemperaturen von 20 und 40 °C dargestellt. In Abbildung 3-38 ist der Wirkungsgrad bei einer Trocknungslufttemperatur von 20 °C für alle Luftmassenströme dargestellt.

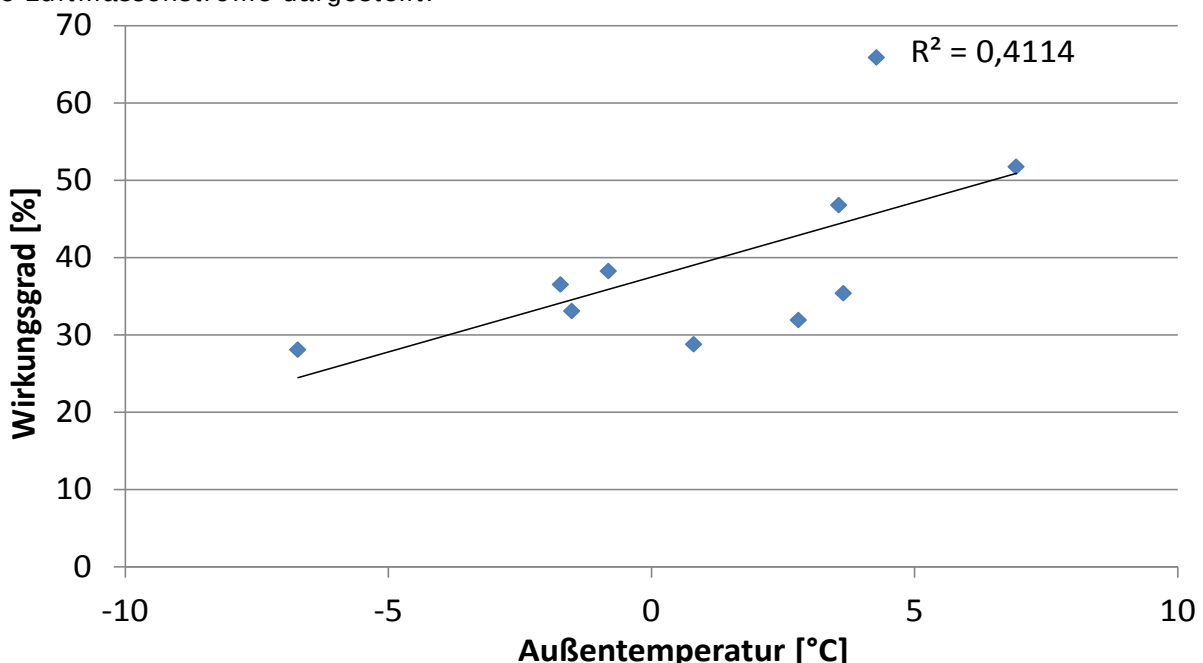


Abbildung 3-38 Darstellung der Wirkungsgrade bei 20 °C Trocknungslufttemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

Die Darstellung der Wirkungsgrade bei einer Trocknungslufttemperatur von 20 °C in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur zeigt den gleichen Zusammenhang, wie vorhin illustriert wurde. Das Bestimmtheitsmaß ist mit einem Wert von 0,41 höher. Nachfolgend ist in Abbildung 3-39 der Wirkungsgrad bei einer Trocknungslufttemperatur von 40 °C für alle Luftmassenströme dargestellt. Auch bei höheren Temperaturen ändert sich der Zusammenhang zwischen der Außentemperatur und dem Wirkungsgrad nicht. Lediglich das Bestimmtheitsmaß steigt auf 0,57 an, was auf eine höhere Linearität schließen lässt.

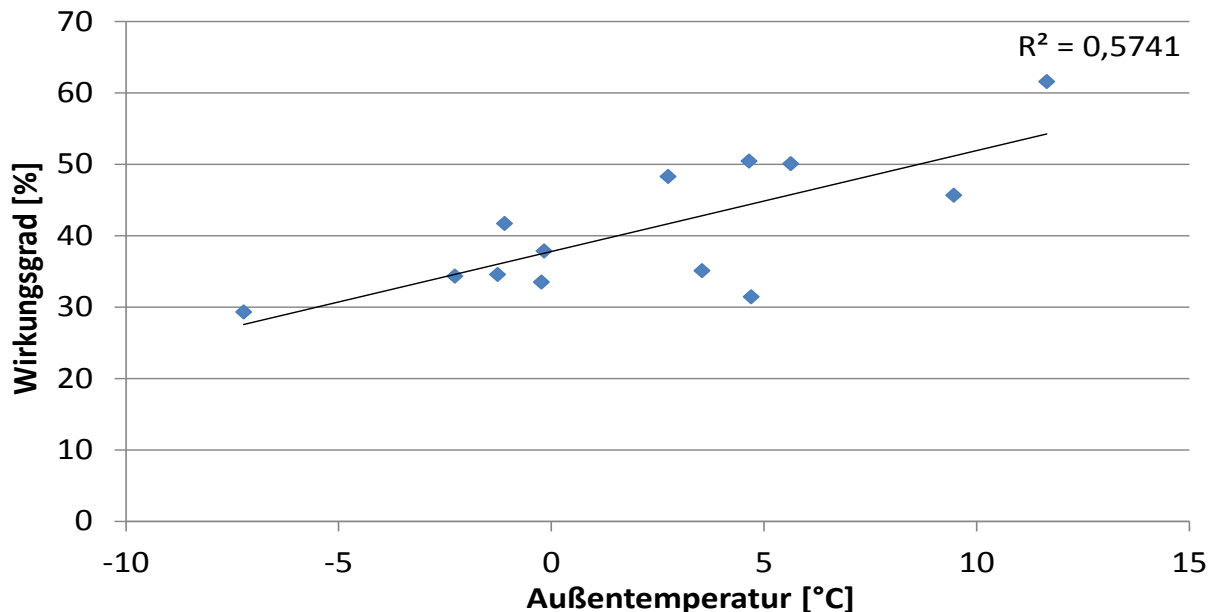


Abbildung 3-39 Darstellung der Wirkungsgrade bei 40 °C Trocknungslufttemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

3.9.2.4 Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Außenluftfeuchte

In Abbildung 3-40 ist der Einfluss der Außenluftfeuchte für alle Trocknungstemperaturen und Luftmassenströme auf den Wirkungsgrad dargestellt.

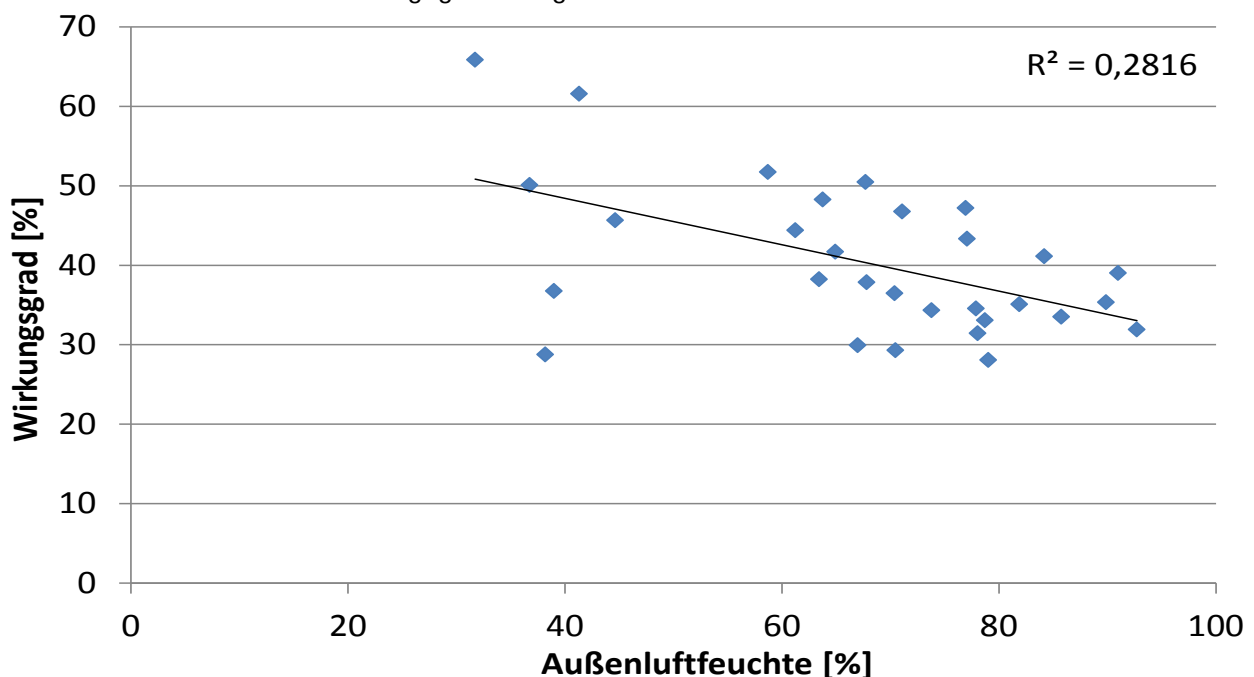


Abbildung 3-40 Darstellung der Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Außenluftfeuchte

Zwischen dem Wirkungsgrad und der Außenluftfeuchte besteht ein Zusammenhang, da der Wirkungsgrad mit steigender Außenluftfeuchte sinkt. Das Bestimmtheitsmaß ist einem Wert von 0,28 nicht stark ausgeprägt.

3.9.2.5 Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Aufwärmspanne

Die Aufwärmspanne bezeichnet die Temperaturerhöhung, welche notwendig ist um die Trocknungsluft von der Außenlufttemperatur auf die eingestellte Trocknungslufttemperatur zu erhöhen und stellt somit den Wärmeeintrag (= Input) dar. In Abbildung 3-41 ist der Wirkungsgrad für alle Temperaturen und Luftmassenströme in Abhängigkeit von der Aufwärmspanne dargestellt.

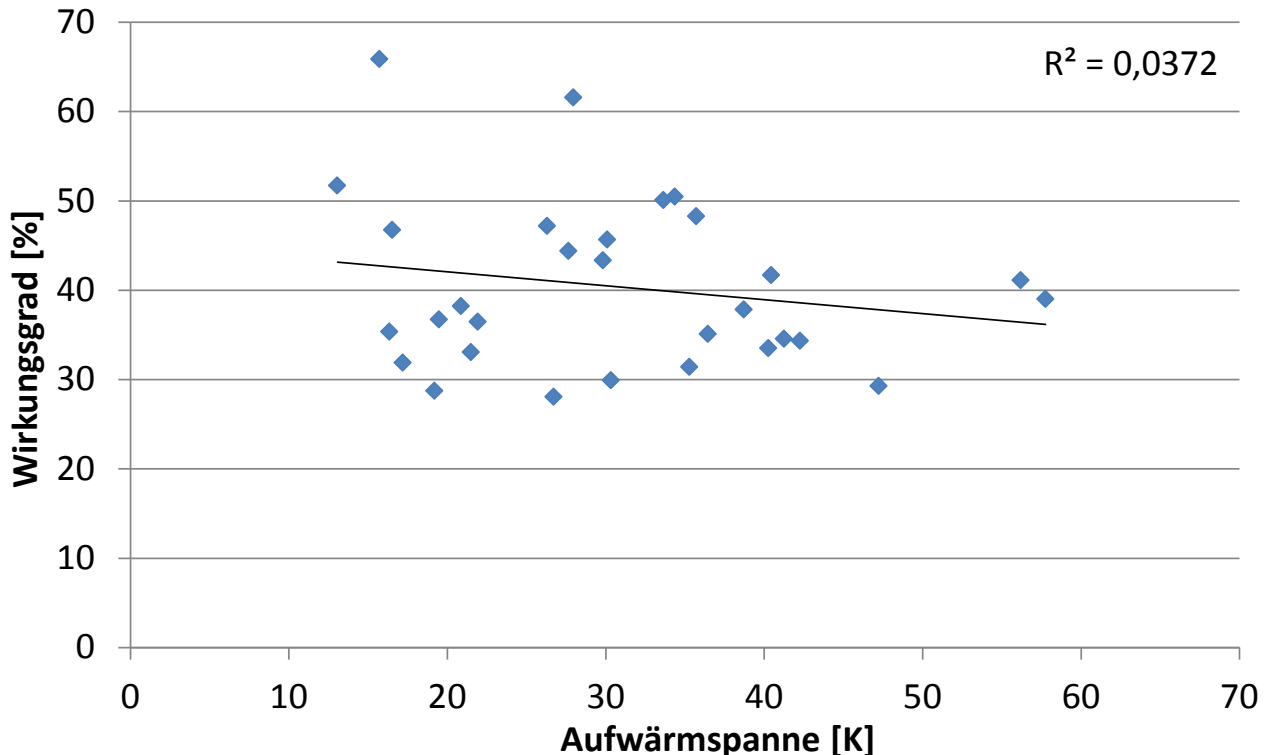


Abbildung 3-41 Darstellung der Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Aufwärmspanne

Anhand der Darstellung über alle Temperaturen und Luftmassenströme ist für die Aufwärmspanne mit einem Bestimmtheitsmaß von lediglich 0,03 kein linearer Zusammenhang zu erkennen. Daher wird für eine Detailanalyse die Aufwärmspanne für 20 und 40° C Trocknungslufttemperatur für alle Versuche dargestellt (siehe Abbildung 3-42).

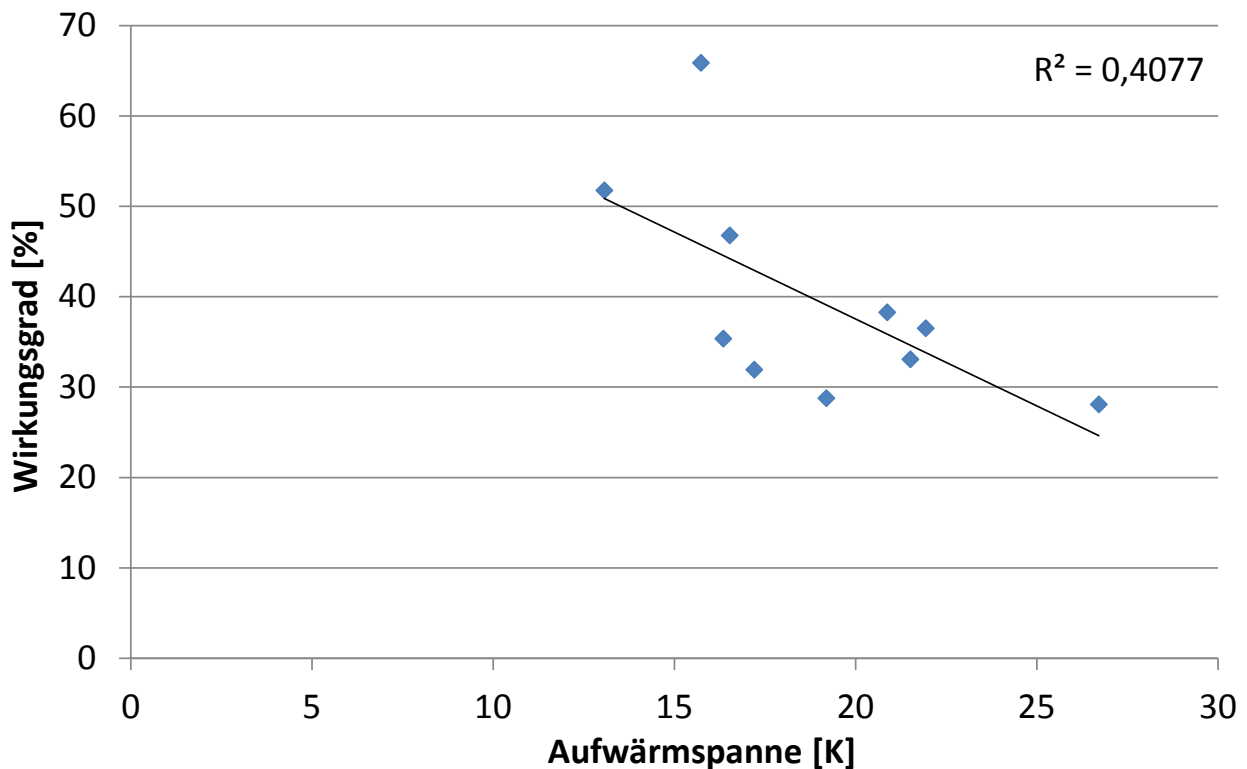


Abbildung 3-42 Darstellung der Wirkungsgrade für 20 °C Trocknungslufttemperatur in Abhängigkeit von der Aufwärmspanne

Anhand der Detaildarstellung für 20 °C Trocknungslufttemperatur zeigt sich ein Zusammenhang zwischen der Aufwärmspanne und dem Wirkungsgrad. Je höher die Aufwärmspanne ist, desto geringer ist der Wirkungsgrad. Abbildung 3-43 zeigt in Analogie zur vorhergehenden Darstellung die Detaildarstellung für 40 °C Trocknungslufttemperatur.

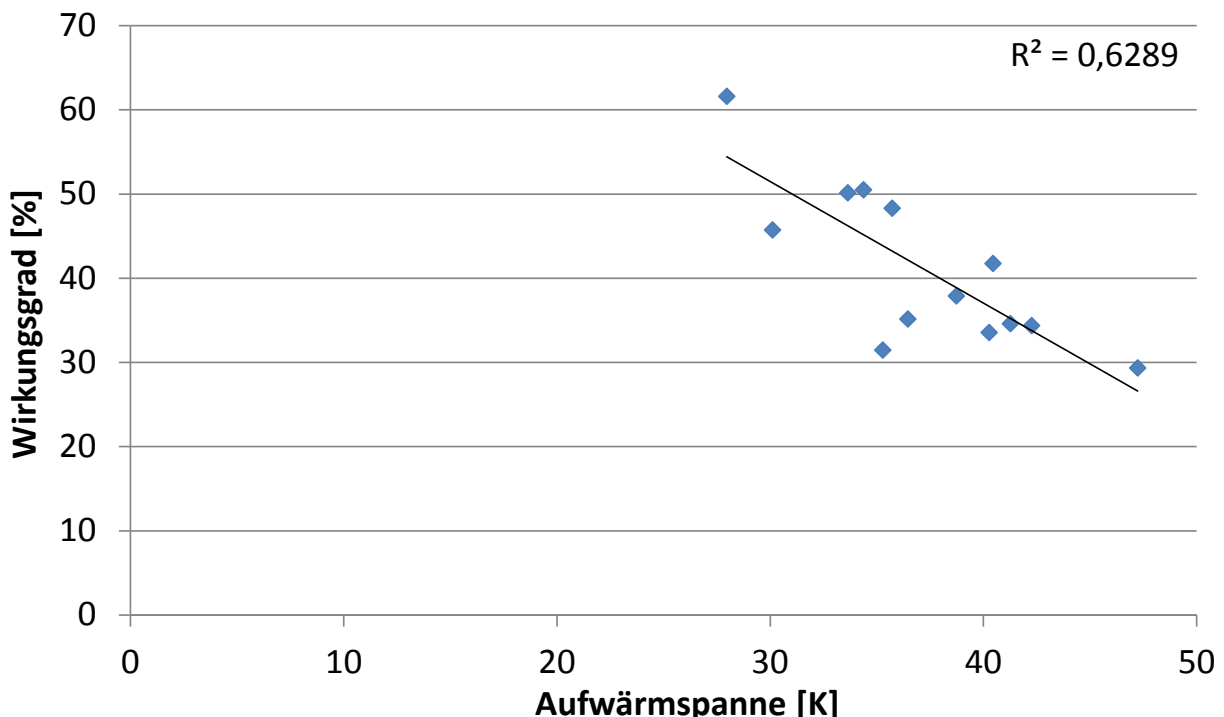


Abbildung 3-43 Darstellung der Wirkungsgrade für 40 °C Trocknungslufttemperatur in Abhängigkeit von der Aufwärmspanne

Auch bei der Darstellung für eine Trocknungslufttemperatur von 40 °C zeigt sich, dass der Wirkungsgrad mit steigender Aufwärmspanne sinkt. Das Bestimmtheitsmaß ist in diesem Fall etwas höher als bei 20 °C und beträgt 0,62.

3.9.3 Zusammenfassung

Mit Hilfe der Korrelationsanalyse wurden die Einflüsse auf die Trocknungsdauer und den Wirkungsgrad erhoben und analysiert.

Folgende Einflüsse auf die Trocknungsdauer konnten festgestellt werden:

- Die Trocknungsdauer ist geringer je höher die Trocknungslufttemperatur ist.
- Über alle Versuche zeigt sich ein Zusammenhang zwischen dem Luftmassenstrom und der Trocknungsdauer. Die Trocknungsdauer ist umso geringer, je höher der Luftmassenstrom ist.
- Die Trocknungsdauer sinkt mit zunehmendem Luftmassenstrom signifikant. Die Trocknungsdauer wird jedoch auch von anderen Parametern beeinflusst.
- Die Trocknungsdauer steigt an je feuchter die Trocknungsluft ist.
- Bei niedrigen Trocknungslufttemperaturen (20 °C) hat die Trocknungsluftfeuchte einen besonders signifikanten Einfluss auf die Trocknungsdauer.
- Bei einer Trocknung mit höheren Trocknungslufttemperaturen (40 °C) hat die Trocknungsluftfeuchte keinen wesentlichen Einfluss auf die Trocknungsdauer. Dies bedeutet für den Praxisbetrieb, dass die Luftfeuchte umso geringer sein soll, je niedriger auch die Trocknungslufttemperatur ist. Wird ein bestimmter Feuchtwert der Luft überschritten, soll von einer Trocknung Abstand genommen werden (sofern keine Entfeuchtung erfolgt).

Für die Betrachtung des Wirkungsgrades konnten folgende Zusammenhänge analysiert werden:

- Die isolierte Betrachtung der Trocknungslufttemperatur hat keinen signifikanten Einfluss auf den Wirkungsgrad der Trocknung.
- Die isolierte Betrachtung Trocknungsluftmenge hat keinen signifikanten Einfluss auf den Wirkungsgrad der Trocknung.
- Zwischen dem Wirkungsgrad und der Außentemperatur besteht der Zusammenhang, dass bei steigender Außenlufttemperatur auch der Wirkungsgrad steigt.
- Zwischen dem Wirkungsgrad und der Außenluftfeuchte besteht der Zusammenhang, dass der Wirkungsgrad mit steigender Außenluftfeuchte sinkt.
- Anhand der Darstellung über alle Temperaturen und Luftmassenströme ist für die Aufwärmspanne kein linearer Zusammenhang auf den Wirkungsgrad zu erkennen.
- Bei niedrigen Trocknungstemperaturen (20 °C) zeigt sich ein Zusammenhang zwischen der Aufwärmspanne und dem Wirkungsgrad. Je höher die Aufwärmspanne ist, desto geringer ist der Wirkungsgrad.
- Bei einer Trocknung mit höheren Trocknungslufttemperaturen (40 °C) zeigt sich, dass der Wirkungsgrad mit steigender Aufwärmspanne sinkt.

Dies bedeutet, dass die Trocknungsdauer durch eine Regelung des Luftmassenstroms und der Trocknungslufttemperatur wesentlich beeinflusst werden könnte.

Der Wirkungsgrad kann jedoch auch von vielen nicht oder schwer regelbaren Parametern beeinflusst werden, wie z. B. der Außentemperatur und der Außenluftfeuchte. Hier könnte eine aktive Beeinflussung der Aufwärmspanne in Abhängigkeit von den Außenbedingungen wesentliche Verbesserungen bringen.

3.10 Monitoring zur Steuerung der Trocknungsdauer

Die sinnvolle Beeinflussung der Trocknungsdauer stellt in der Praxis eine komplexe Aufgabe dar. Beispielsweise sind im Praxisbetrieb Regelparameter nicht einfach zu installieren. So ist bei einer Schüttung, welche vertikal mit Trocknungsluft durchströmt wird, die Integration von Messequipment, welches den Gesamtwassergehalt des Hackgutes bestimmt, nicht einfach zu realisieren. Viele Messinstrumente gehen mit einem signifikanten Kostenaufwand insbesondere für die Installation und Wartung einher und sind daher ungeeignet. Daher laufen aktuell viele Anlagen ohne die Erfassung von Regelparametern, wodurch es vielfach zu einer Über- bzw. Untertrocknung kommt. Bei der Untertrocknung ist das Material nach einer Durchmischung immer noch zu feucht, was einen Abstrich bei der Produktqualität zur Folge hat. Ist das Material übergetrocknet, wird mehr Energie eingesetzt als notwendig ist, da ein zu niedriger Wassergehalt nicht erwünscht ist.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung des Gesamtwassergehaltes würde darin bestehen, dass die in Kapitel 2.2 beschriebene Temperatur-Anstiegsmethode (Knickpunktmethode) angewendet wird. Diese Methode ist einfacher und kostengünstiger zu realisieren als viele andere Methoden. Es können damit für den Praxisbetrieb ausreichende Regelparameter erzielt werden. Bei dieser Methode wird über einen Temperatursensor im Hackguthaufen während der Trocknungsdauer die Temperatur aufgezeichnet. Voraussetzung ist jedoch, dass die Trocknung gleichmäßig von unten nach oben voranschreitet bzw. der Messpunkt repräsentativ für die Schüttung ausgerichtet ist. Die richtige horizontale Verteilung des Temperatursensors stellt keine Herausforderung dar. Die vertikale Positionierung ist hingegen schwerer zu realisieren und ein Erfolgsfaktor. Die richtige Position kann ohne Online-Messungen des Wassergehaltes über Wägezellen mittels „Trial and Error“ identifiziert werden, wodurch die Messung sowie die Platzierung der Messgeräte auf die Anlage kalibriert werden muss. Dies bedeutet, dass der Messpunkt an einem repräsentativen Punkt gesetzt wird und die Trocknung beendet wird, sobald ein gewisser Temperaturgradient erreicht wird. Danach wird nach dem Durchmischen der Gesamtwassergehalt überprüft (z. B. im Trockenschrank). Ist der Wassergehalt zu hoch, wurde der Sensor zu weit unten angebracht. Ist der Wassergehalt hingegen zu gering, war der Sensor zu hoch montiert. Adaptionen sind auch bei unterschiedlichen Trocknungsparametern, wie Temperatur und Luftmassenstrom, notwendig, da sich durch eine Änderung dieser auch der ideale Messpunkt verschieben kann.

Anhand der Laborversuche konnte dieser Art der Bestimmung des Gesamtwassergehaltes als grundsätzliche Methode identifiziert werden. Die Temperaturen im Trocknungsbehälter wurden in drei Ebenen / Schichten gemessen. Dabei hat sich die oberste Sensorreihe als sehr guten Bezugswert herauskristallisiert. In Abbildung 3-44 ist der Temperaturanstieg in der obersten (3) und mittleren (2) Sensorreihe, die Abnahme des Gesamtwassergehaltes sowie der Zeitpunkt des Erreichens des Gesamtwassergehaltes von 20 % dargestellt. Der Temperaturanstieg in der oberen Sensorreihe ist repräsentativ für die Identifikation eines Wassergehaltes von 20 % des Materials. In Tabelle 3-26 sind die Unterschiede zwischen dem Erreichen des Knickpunktes und dem Gesamtwassergehalt für 4 verschiedene Versuche dargestellt. Die Knickpunktmethode ist daher eine einfache und ausreichend genaue Methode zur Bestimmung des Gesamtwassergehaltes der Schüttung, wodurch bei einer Trocknung Über- oder Untertrocknen vermieden werden könnten.

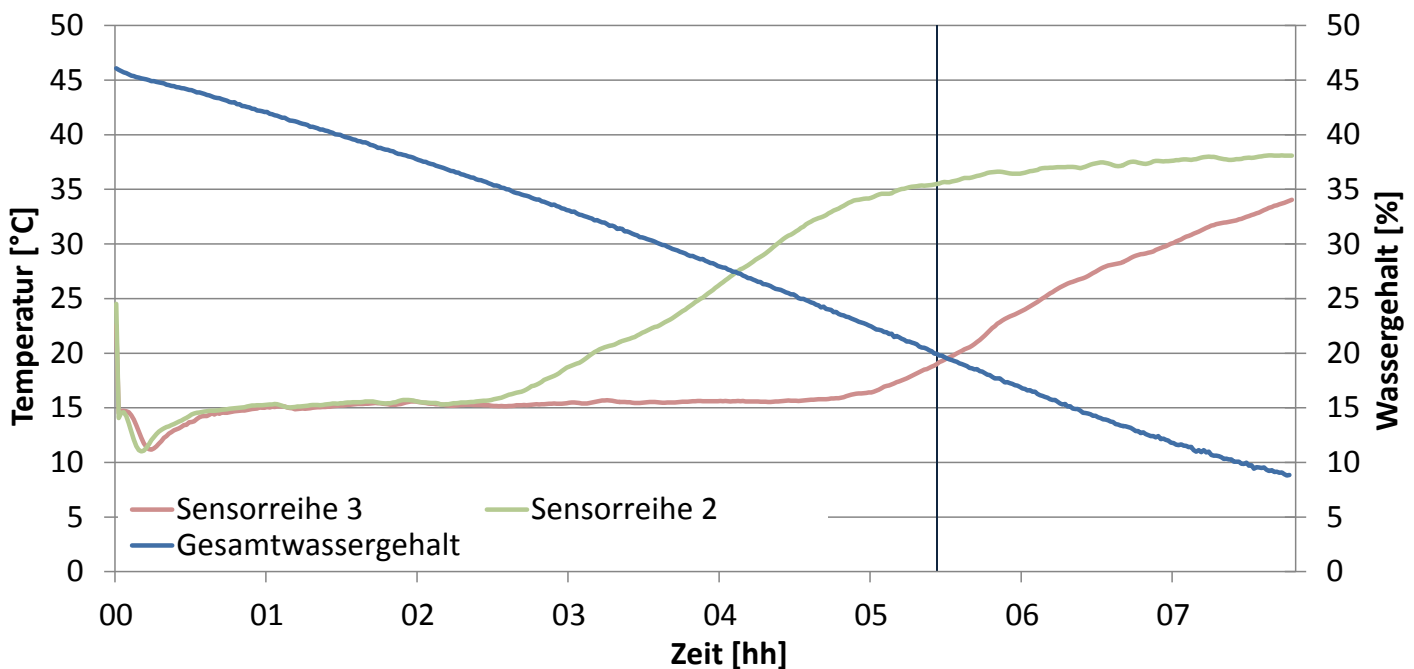


Abbildung 3-44 Temperaturanstieg in den obersten zwei Sensorreihen der Labormessungen

Anmerkungen: Sensorreihe 3...obersten Schicht; Sensorreihe 2...mittlere Schicht

Tabelle 3-26 Ausgewählte Parameter im Zusammenhang mit der Knickpunktmethode

Parameter				
Trocknungstemperatur [°C]	20	20	40	40
Trocknungsluftmassenstrom [m ³ /h]	500	1.000	500	1.000
Endwassergehalt 20 % erreicht [h]	22,36	10,68	8,65	8,43
Knickpunkt [h]	22,68	11,25	9,9	4,86
Gesamtwassergehalt Knickpunkt [%]	19,63	18,63	16,09	23,39

3.11 Zusammenfassung der Laborergebnisse

Anhand der durchgeführten Labormessungen konnten die Gesetzmäßigkeiten der Hackguttrocknung, die in der Literatur teilweise bereits vorliegen, bestätigt werden (Verlauf der Temperaturen und der Verlauf der Trocknung durch die Schüttung). Dies bedeutet, dass der Versuchsaufbau repräsentativ ist für eine reale Trocknung.

Es zeigt sich, dass der Verlauf der Temperaturen und der relativen Luftfeuchte unabhängig von der Trocknungslufttemperatur sowie dem Trocknungsluftmassenstrom den gleichen Gesetzmäßigkeiten folgen. Der Unterschied liegt in der Dauer der verschiedenen Phasen und ist von der Trocknungstemperatur sowie dem Luftmassenstrom abhängig. Je höher diese Parameter sind, desto kürzer sind die einzelnen Phasen ausgebildet.

Auch der Verlauf der Wasseraufnahme bei unterschiedlichen Trocknungstemperaturen zeigt eine gleiche Charakteristik. Die Wasseraufnahme aus dem Hackgut erfolgt immer nur in Schichten, wobei die Temperatur in der oberen Schicht erst nach Trocknung der unteren Schicht zu steigen beginnt. Die oberste Schicht bleibt feuchter und es würde signifikant länger dauern diese auf ein gleiches Niveau zu trocknen. Auch zeigt sich bei Betrachtung der vertikalen Wassergehaltsverläufe des Hackguts, dass die Wasseraufnahme durch die Trocknungsluft mit zunehmender Schütthöhe sinkt. Dies bedeutet, dass in einer Schüttung der Trocknungsprozess in Schichten erfolgt. Der

Trocknungsprozess findet nur in einer Schicht statt. Das Material darunter ist idR bis auf die Gleichgewichtsfeuchte getrocknet. Das Material darüber befindet sich noch im Ausgangszustand. Dadurch kommt es zu einer Inhomogenität des Trocknungsmaterials. Daher stellt die Rosttrocknung im Hinblick auf eine gleichmäßige Trocknung nicht die ideale Technologie dar. Die Vorteile der Rosttrocknungsanlage sind die leichte Installation und der einfache Betrieb. Andere Trocknungstechnologien bei denen das Trocknungsgut während der Trocknung durchmischt wird, würden eine gleichmäßige Trocknung ermöglichen.

Auf die Trocknungsdauer haben vor allem Luftfeuchte, die Trocknungslufttemperatur sowie der Luftmassenstrom einen signifikanten Einfluss. Idealerweise liegen die Temperaturen im Sinne einer niedrigen Trocknungsdauer im mittleren / höheren Bereich. In diesem Fall kann eine schnelle Trocknungsdauer auch bei einem geringen Luftmassenstrom realisiert werden. Ein geringer Luftmassenstrom hat den Vorteil, dass weniger Hilfsenergie (z. B. Strom) für den Betrieb des Ventilators aufgewandt werden muss. Wird mit einem geringeren Temperaturniveau getrocknet, muss der Luftmassenstrom erhöht werden, damit die gleiche Trocknungsdauer beibehalten werden kann. Die schnellste (jedoch nicht effizienteste) Trocknung erfolgt bei den höchstmöglichen Temperaturen mit dem maximalen Luftmassenstrom.

Der thermische Wirkungsgrad ist nicht signifikant von den regelbaren Parametern, wie Trocknungslufttemperatur und Luftmassenstrom, abhängig. Die Aufwärmspanne hat einen größeren Einfluss auf den Wirkungsgrad. Dies bedeutet, je höher die Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und der Trocknungsluft ist, desto höher ist der Energieeintrag (Input). Daher ist es nicht sinnvoll mit einer festen / absoluten Trocknungstemperatur zu trocknen, sondern es soll ein stets angepasstes / relatives Temperaturniveau mit Bezug auf die Ausgangstemperatur erreicht werden, wodurch die Aufwärmphase bzw. absolute Temperaturerhöhung stets relativ gleich ist. In diesem Zusammenhang sollte unabhängig von der Außentemperatur (wenn es die Steuerung und das Temperaturniveau zulassen) eine Aufwärmspanne von 20 bis 30K forciert werden. Eine Aufwärmspanne in dieser Höhe stellt sicher, dass die Trocknungsluft auch bei schlechten Außenbedingungen (warm und feucht) ein ausreichendes Aufnahmevermögen besitzt.

4 Auswertungs- und Analyseergebnisse der Feldmessungen

Im Zuge dieses Abschnittes werden Feldmessungen an einer Hackguttrocknungsanlage durchgeführt. Die Messung erfolgt ohne Online- bzw. Echtzeiterfassung des Wassergehalts. Es erfolgt eine nachträgliche Wassergehaltsbestimmung. Durch eine Analyse und Gegenüberstellung der Praxis- mit den Labor-Ergebnissen erfolgt eine Verifizierung der Labor-Ergebnisse und Schlussfolgerungen werden abgeleitet.

4.1 Beschreibung der zu untersuchenden Trocknungsanlage

Die an einem Heizwerk befindliche Trocknungsanlage basiert auf einem Trocknungsboxen-System und einer vorgeschalteten Siebung für das Hackgut. Abbildung 4-1 stellt das Schaltbild der Trocknungsanlage dar. Die Größe der Trocknungsbox beträgt 4,5 X 6 m. Die Trocknungsenergie wird über einen Wärmetauscher bereitgestellt. Dieser kann die Wärme aus dem Vorlauf oder aus dem Rücklauf des Nahwärmenetzes entnehmen. Der notwendige Luftmassenstrom wird von zwei Gebläsen bereitgestellt. Diese sind an einen Frequenzumformer angeschlossen und können stufenlos geregelt werden. Die Ansaugung der Trocknungsluft erfolgt in der Hackgutlagerhalle und ist knapp unter dem Dach angebracht. Dadurch kann die Wärme, die durch die Selbsterwärmung des Hackgutes entsteht und aufsteigt bereits genützt werden und es muss nicht kalte Außenluft angesaugt werden.

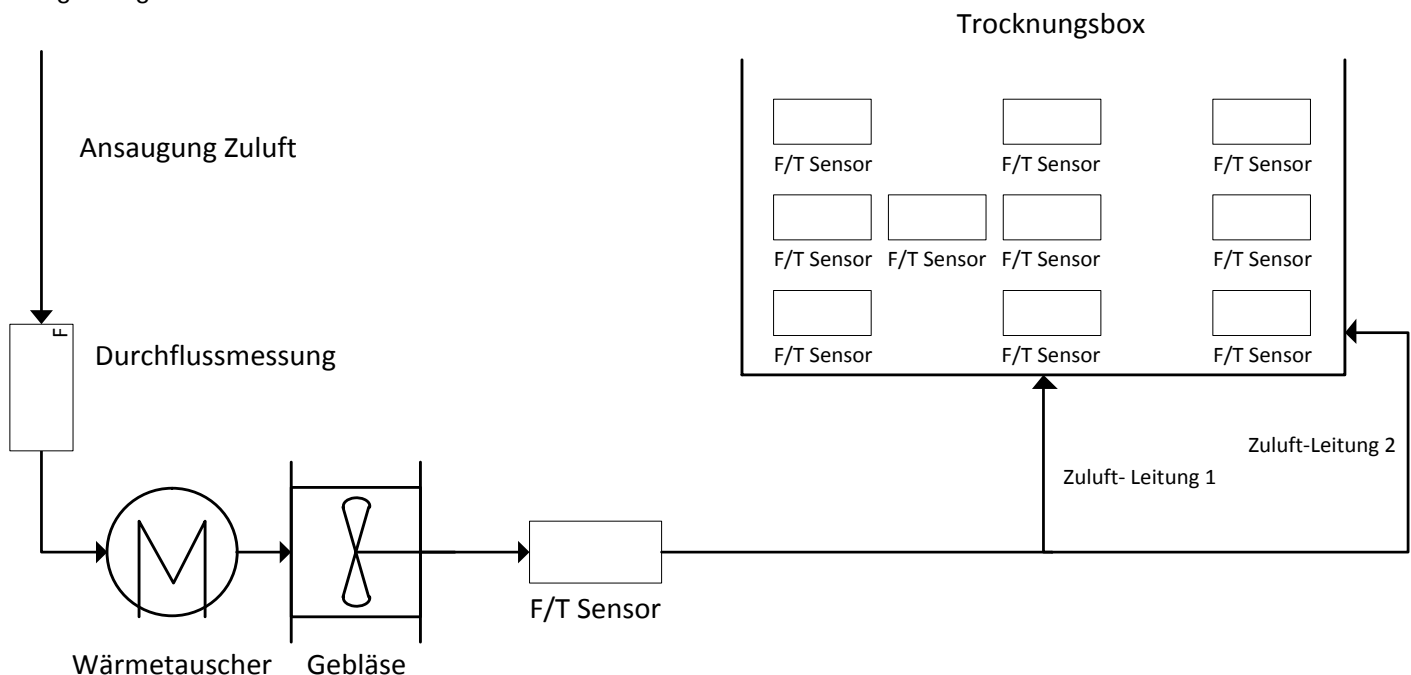


Abbildung 4-1 Schaltbild Feldmessung

Quelle: [eigene Darstellung]

Anmerkung: F/T...Feuchte/Temperatur

4.2 Messaufbau

Die Messsensorik wurde in Analogie zur Labortrocknungsanlage ausgeführt. Folgende Parameter wurden bei den Feldmessungen online / in Echtzeit aufgezeichnet:

- Temperatur und Feuchte der angesaugten Luft

- Temperatur und Feuchte der Trocknungsluft
- Luftmassenstrom
- Temperatur und Feuchte im Hackgut (6 Sensoren)
- Energieeinsatz (Wärmemengenzähler am Heizwerk)

Die Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren wurden im Hackgut, wie in Abbildung 4-2 dargestellt wird, angebracht. Die Anzahl der Sensoren (vor allem im oberen Bereich) wurde je nach Anforderung variiert. Die Sensorreihen 1 und 2 waren bei jeder Messung mit je 3 Sensoren bestückt. Die Feuchte/Temperaturfühler wurden mit der Hilfe von Lanzen über die Trocknungsbox-Rückwand in den Hackguthaufen eingeführt. Aufgrund vorgefertigter Löcher in der Rückwand konnte sichergestellt werden, dass sich die Lanzen bzw. die Sensoren bei jeder Messung an den selben Stellen befinden.

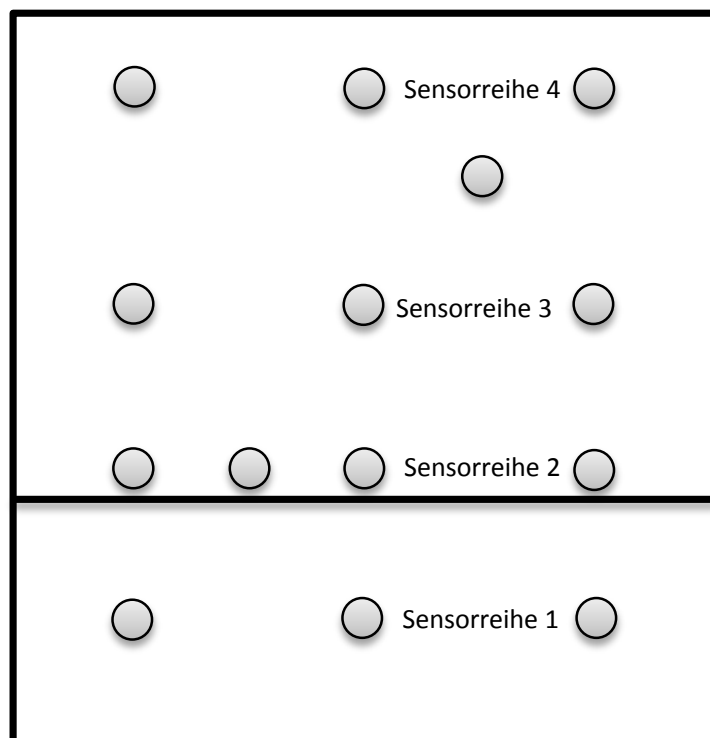


Abbildung 4-2 Sensoren Feldmessung

Quelle: [eigene Darstellung]

4.3 Auswertung der Messserien

Insgesamt wurden 9 Feldmessungen durchgeführt. Hierbei wurden unterschiedliche Materialien, Trocknungstemperaturen und -luftmassenströme herangezogen. Für die Auswertung der Feldmessungen werden diese gegenübergestellt, verglichen und analysiert. Auch wird anhand einer Feldmessung der Verlauf der Trocknung im Praxisbetrieb aufgezeigt. Nachfolgend werden ausgewählte Parameter der Messungen in Tabelle 4-1 dargestellt. Bei den Feldmessungen wurde zwischen den Materialien G30 und G50 unterschieden. Als Wärmequelle wurde der Rücklauf bzw. der Vorlauf des Nahwärmenetzes verwendet. Der Luftmassenstrom konnte in zwei Stufen geregelt werden. Die Messdauer einzelner Trocknungsvorgänge wurde bewusst lang gewählt (Messung 1 und 3) um die typische Trocknungscharakteristik aufzeichnen zu können. Bei den Messserien 8 und 9 wurde versucht, dass im Labormaßstab angewandte Monitoringsystem anhand der Kickpunktmethode an die Feldmessungen anzupassen.

Tabelle 4-1 Parameter Feldmessungen

Anmerkungen: VL...Vorlauf, RL...Rücklauf

Messung Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Anzahl der Lüfter	1	1	1	2	2	1	2	2	2
Material	G 30	G 30	G 30	G 30	G 30	G 50	G 50	G 50	G 50
Anfangswasser- gehalt [%]	40,75	40,42	43,12	21,38	28,75	38,11	38,11	29,76	35,13
Wärmequelle	RL	RL	RL	VL	VL	VL	RL	VL	VL
Luftmenge [m ³ /h]	8.778	8.544	8.623	9.286	9.334	8.832	9.178	9.611	9.280
Außenluft- temperatur Ø [°C]	8,17	14,66	15,16	14,24	13,87	17,40	8,86	14,87	8,60
Trocknungsluft- temperatur Ø [°C]	23,18	28,52	29,44	37,00	43,57	42,45	23,83	42,52	35,79
Aufwärmspanne Ø [°C]	15,01	13,86	14,28	22,76	29,70	25,20	14,96	27,65	27,29
Außenluftfeuchte Ø [%]	63,90	53,38	58,59	49,34	78,45	45,80	57,85	66,13	88,80
Trocknungsluft- feuchte Ø [%]	26,85	24,14	26,28	15,04	15,22	10,66	24,64	13,88	19,12
Versuchsdauer [hh]	85,01	45,75	86,98	66,98	29,76	59,28	63,48	26,60	11,15
Energie thermisch [kWh]	4.300	2.200	4.000	5.600	3.300	4.800	1.500	2.900	1.600
Strom [kWh]	512	275	524	806	358	357	764	320	157
Verhältnis Strom- / Wärmeeinsatz	0,12	0,13	0,13	0,14	0,11	0,07	0,51	0,11	0,10

4.3.1 Detaildarstellung der Feldmessung 1

Die Feldmessung 1 wurde mit den in Tabelle 4-2 dargestellten Parametern vorgenommen. Die Trocknungsdauer wurde bewusst lang festgelegt um die typische Trocknungscharakteristik aufzuzeichnen.

Tabelle 4-2 Detailergebnisse der Feldmessung 1

Anzahl der Lüfter	1
Material	G 30
Wärmequelle	RL
Trocknungsluftmenge [m ³ /h]	8.778,39
Außenlufttemperatur Ø [°C]	8,17
Trocknungslufttemperatur Ø [°C]	23,18
Aufwärmspanne Ø [°C]	15,01
Außenluftfeuchte Ø [%]	63,90
Trocknungsluftfeuchte Ø [%]	26,85
Anfangswassergehalt [%]	40,75
Versuchsdauer [h]	85,01

Die Darstellung der Anordnung der Temperatur-/Feuchtesensoren erfolgt in Abbildung 4-3.

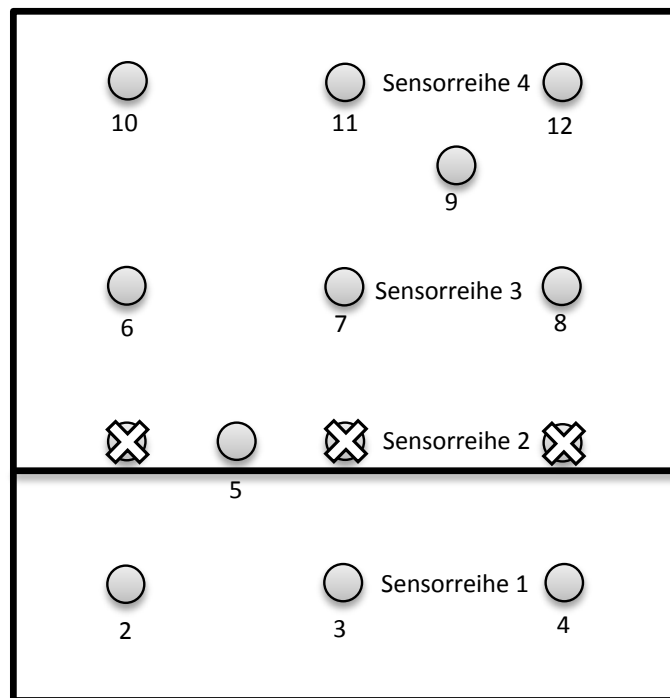


Abbildung 4-3 Anordnung der Temperatur- und Feuchtesensoren im Schüttgut

Quelle: [eigene Darstellung]

Bei Feldmessung 1 wurde das zu Hackgut automatisiert über die Fördereinrichtung in die Trocknungsbox geleitet. Dies bewirkte die in Abbildung 4-4 dargestellte typische Kegelform, wodurch der Trocknungsprozess im Schüttgut ungleichmäßig erfolgt ist. Der äußere und obere Bereich des Schütthaufens ist signifikant nasser (ersichtlich durch den dunkleren Bereich).



Abbildung 4-4 Schüttung Feldmessung

Quelle: [eigene Darstellung]

4.3.1.1 Darstellung der Außen- und Trocknungslufttemperatur

Abbildung 4-5 stellt den Zusammenhang zwischen der Temperatur der Außen- sowie der Trocknungsluft dar. Es ist zu erkennen, dass im Vergleich zu den Labormessungen die

Trocknungslufttemperatur nicht konstant ist, sondern mit einer Temperaturerhöhung von etwa 15 K den Außentemperaturen folgt. Selbiges gilt auch für die relative Luftfeuchte.

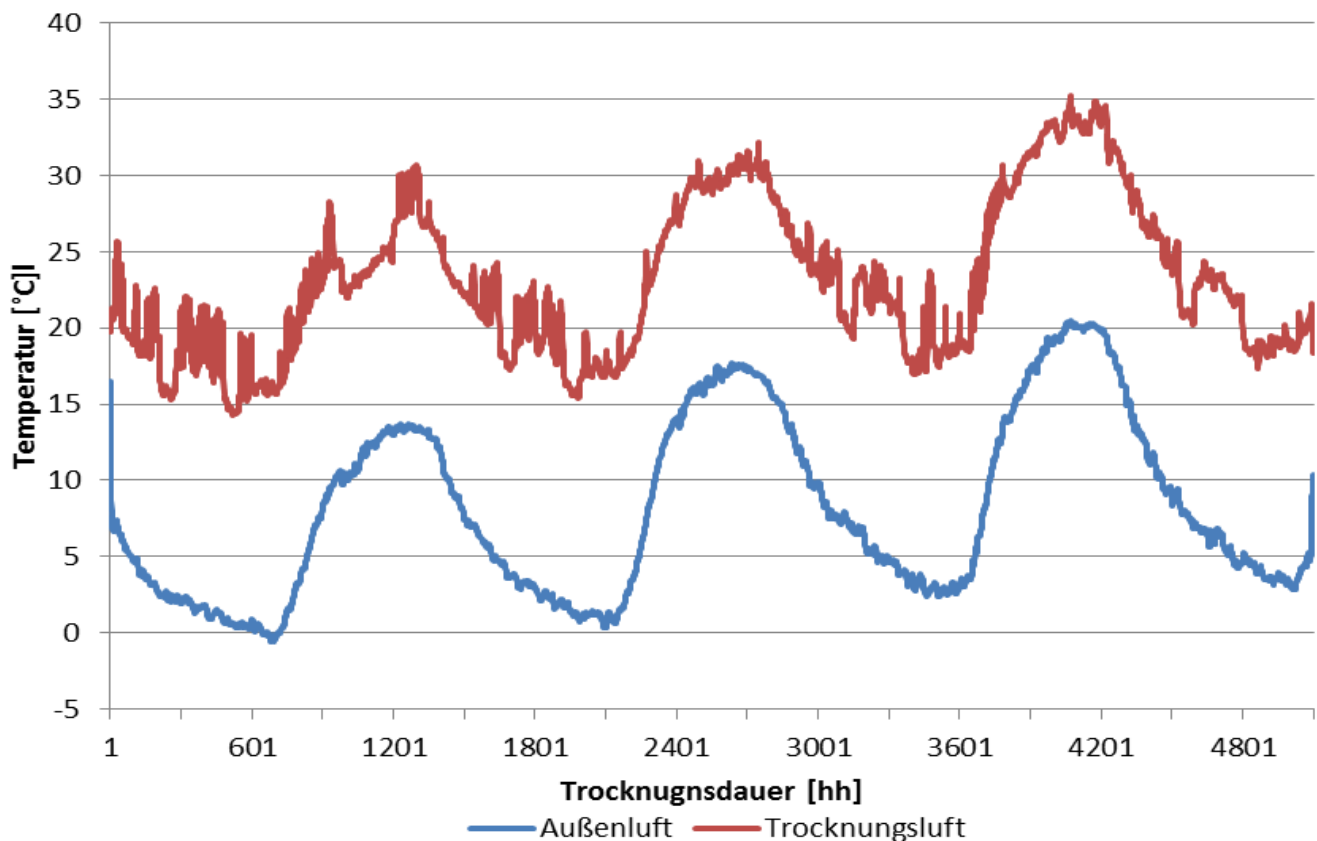


Abbildung 4-5 Verlauf der Außenluft- sowie der Trocknungslufttemperatur

4.3.1.2 Verlauf der Temperaturen im Hackgut

Abbildung 4-6 zeigt den Verlauf der Temperaturen für die Sensoren 2, 3, 4 (Sensorreihe 1) sowie 5 (Sensorreihe 2). Es ist zu erkennen, dass sich am Anfang der Messung die Temperaturen im Hackguthaufen bei knapp unter 10°C einpendeln. Nach einer Trocknungsdauer von 8 Stunden beginnt die Temperatur im Bereich des Sensors 2 zu steigen. Zwei Stunden später steigen auch die anderen Temperaturen. Dies erfolgt aufgrund des Anstieges der allgemeinen Trocknungslufttemperatur (Temperatur 1). Nach 19 Stunden beginnt am Sensor 3 bzw. nach 24 Stunden am Sensor 4 die Temperatur zu steigen. Diese Temperaturen nähern sich dann der Trocknungslufttemperatur an und folgen dieser über den Verlauf der Trocknung. Nach 72 Stunden beginnt auch die Trocknungsdauer in der nächsten Sensorebene zu steigen. Die unterschiedlichen Zeitpunkte des Temperaturanstieges werden durch eine ungleichmäßige Durchströmung der Hackgutschüttung bzw. durch die Anordnung der Zuluftkanäle unterstützt. Der charakteristische Verlauf der Temperaturen, wie er bei den Feldmessungen aufgezeichnet werden konnte, entspricht den im Labor gewonnen Erkenntnissen.

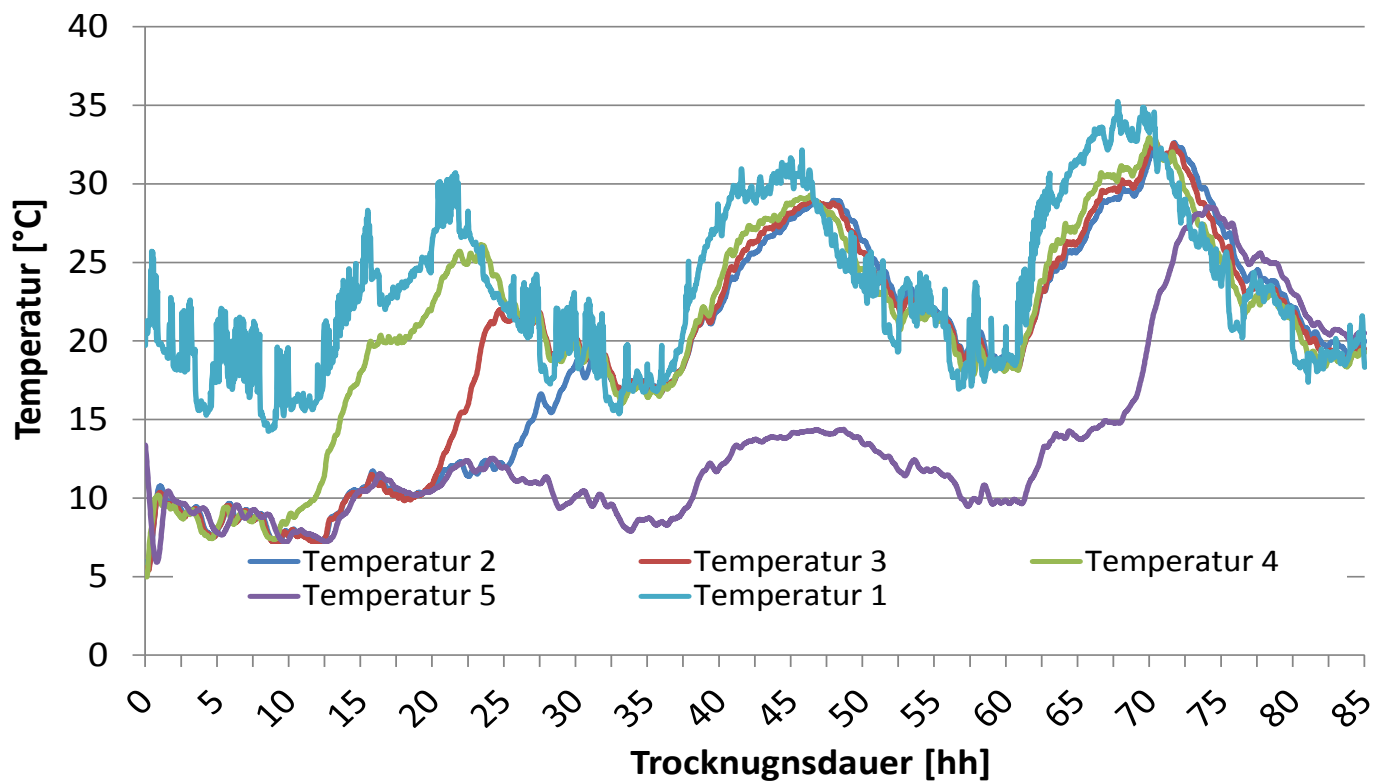


Abbildung 4-6 Verlauf der Temperaturen der Sensoren 2, 3, 4 (Sensorreihe 1) und 5 (Sensorreihe 2)

In höheren Schichten (Sensoren 6, 7 und 8) konnte, wie in Abbildung 4-7 dargestellt wird, kein Temperaturanstieg aufgezeichnet werden. Die Temperaturen ändern sich geringfügig in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur.

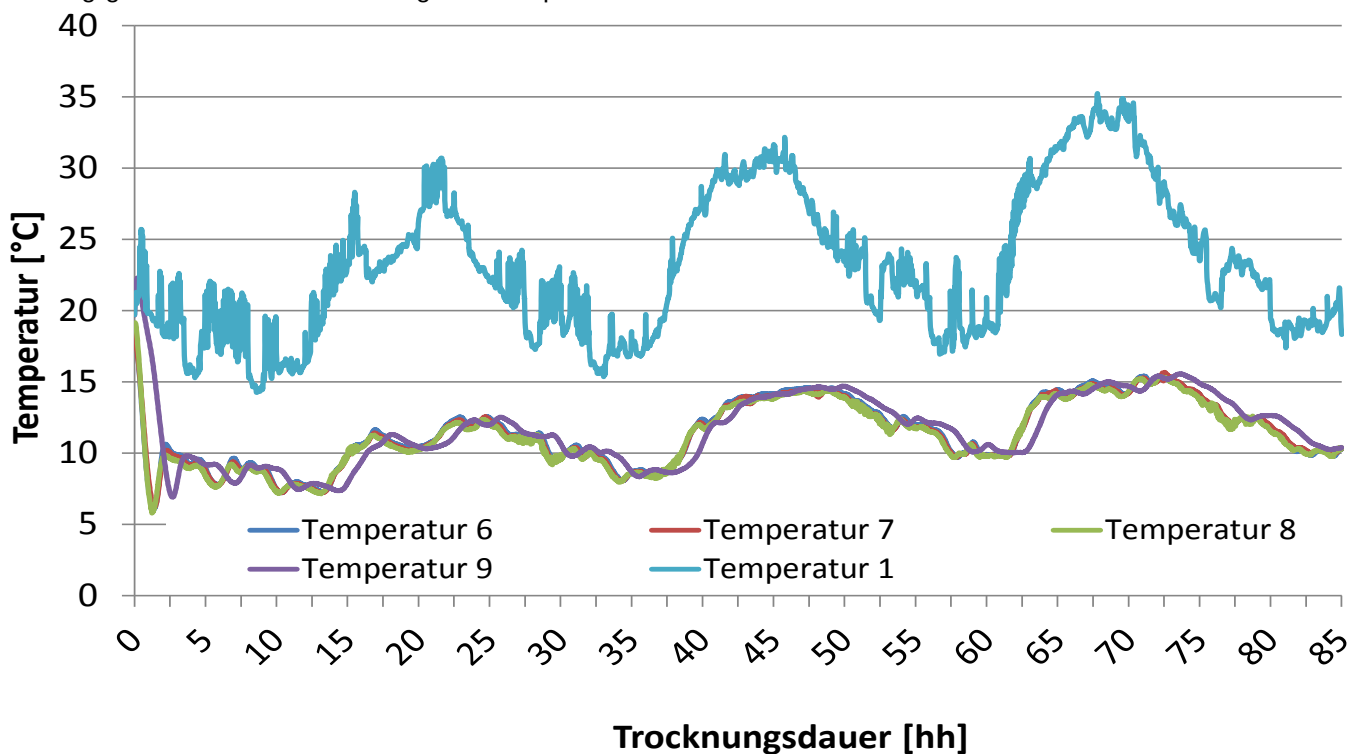


Abbildung 4-7 Verlauf der Temperaturen der Sensoren 6, 7, 8 (Sensorreihe 3) und 9 (zw. Sensorreihe 3 und 4)

4.3.1.3 Verlauf der relativen Luftfeuchte

Der Verlauf der relativen Luftfeuchte verhält sich indirekt proportional zum Temperaturverlauf. Die relative Luftfeuchte an den Sensoren sinkt sobald die Temperatur ansteigt. Abbildung 4-8 stellt diesen Sachverhalt für die Sensorreihe 1 (Sensoren 2, 3, 4) sowie Reihe 2 (Sensor 5) dar. Die relative Feuchte am Sensor beginnt nach 9 Stunden zu sinken. Zeitgleich steigt auch die gemessene Lufttemperatur an diesem Sensor an. Die anderen Sensoren folgen zeitversetzt. Die relative Luftfeuchte pendelt sich danach auf den Wert der Trocknungsluft ein und folgt dieser über die weitere Versuchsdauer.

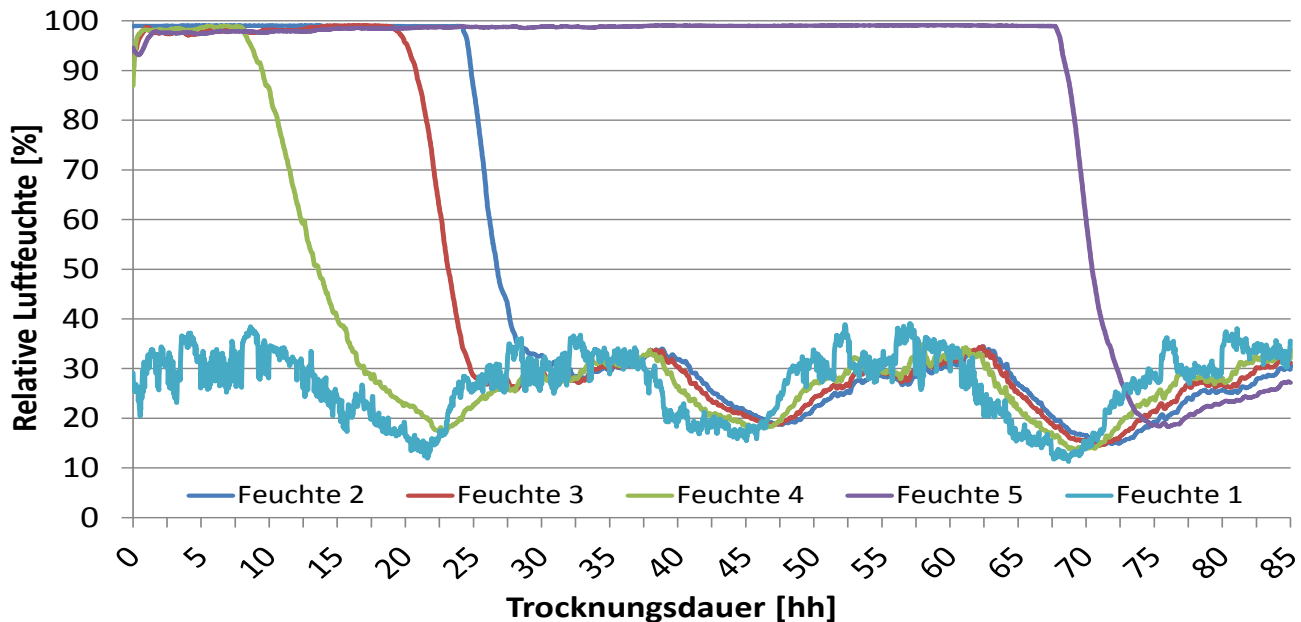


Abbildung 4-8 Verlauf der relativen Luftfeuchte der Sensoren 2, 3, 4 (Sensorreihe 1) und 5 (Sensorreihe 2)

In den darüber liegenden Ebenen (Sensoren 6, 7, 8, 9) konnte keine Abnahme der relativen Luftfeuchte festgestellt werden (siehe Abbildung 4-9). Diese liegt über die gesamte Versuchsdauer bei knapp unter 100%.

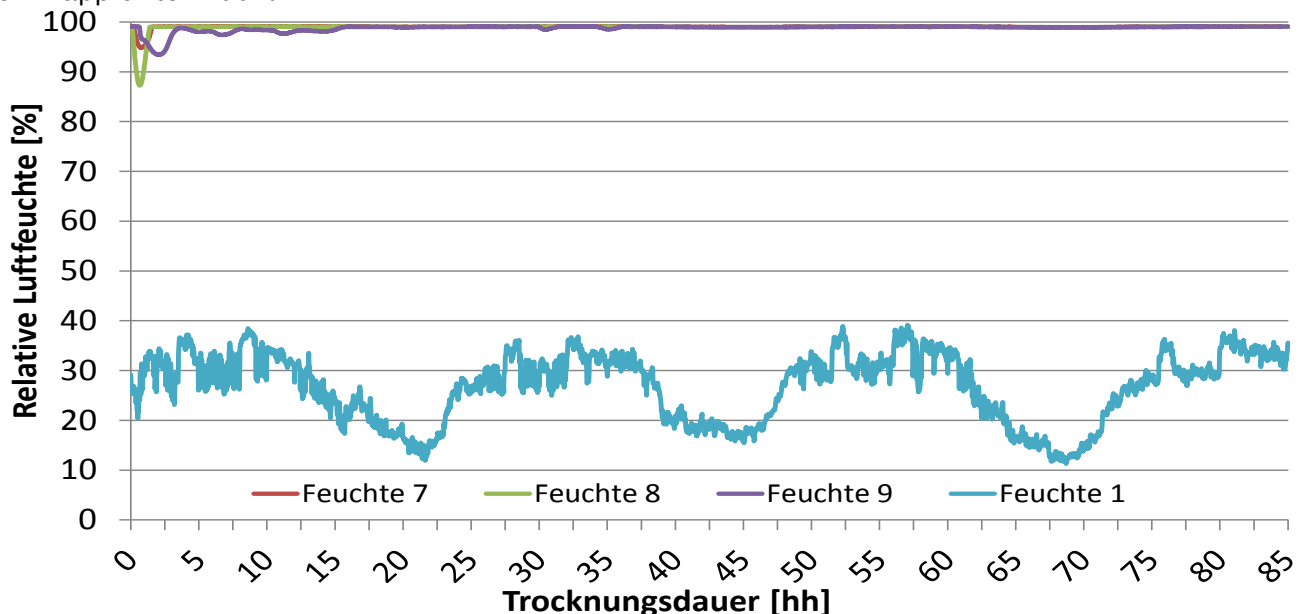


Abbildung 4-9 Verlauf der relativen Luftfeuchte Sensoren 7, 8 (Sensorreihe 3) und 9 (zw. Sensorreihe 3 und 4)

4.3.1.4 Energieeinsatz

Für den Energieeinsatz der Trocknung wird zwischen thermischer und elektrischer Energie unterschieden. Die thermische Energie wurde für die Trocknung über einen Wärmetauscher aus dem Rücklauf des Nahwärmenetzes entnommen. Die elektrische Energie war für den Betrieb des Gebläses notwendig. Tabelle 4-3 stellt die benötigten Energiemengen der Trocknung dar. Über die Versuchsdauer von 85 Stunden wurde mit einer durchschnittlichen Leistung von 50 kW getrocknet. Das Verhältnis zwischen Strom und Wärme besagt, dass je kWh Wärme 0,12 kWh Strom verbraucht wurden. Dieser Wert soll für eine kostengünstige Trocknung möglichst gering sein, da Strom eine teure Hilfsenergie darstellt.

Tabelle 4-3 Energieeinsatz der Feldmessung 1

Wärmemenge [kWh]	4.300
Elektrische Energie [kWh]	512
Gesamtenergieverbrauch [kWh]	4.812
Verhältnis Strom / Wärme [kWh/kWh]	0,12

4.3.1.5 Endwassergehalt der Feldmessung 1

Die Trocknung wurde mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von 40,75 % gestartet und über einer Dauer von 85,01 Stunden betrieben. Nach dem Ende der Trocknung wurde der Wassergehalt an verschiedenen Stellen der Schüttung gemessen. Tabelle 4-4 beschreibt die Punkte sowie den Wassergehalt der verschiedenen Proben. Beim Ort der Probenahme wird zwischen horizontaler und vertikaler Position unterschieden. Anhand der Wassergehalte ist zu erkennen, dass die Trocknung nach über 85 Stunden noch nicht weit vorangeschritten ist. Lediglich im unteren und im vorderen Bereich konnte eine Wassergehaltsreduktion beobachtet werden. In allen anderen Bereich hat sich der Wassergehalt nur unwesentlich verändert. An der äußersten Schicht der Schüttung konnte ein kondensieren der Trocknungsluft beobachtet werden, da hier der Wassergehalt mit 48,29 % um etwa 8 % über dem Anfangswassergehalt lag. In einer Tiefe von 20cm konnte diese Effekt jedoch nicht mehr nachgewiesen werden (Wassergehalt 40,30 %).

Tabelle 4-4 Wassergehaltsmessungen an ausgewählten Bereichen der Feldmessung 1

Ort der Probenahme	Wassergehalt [%]
Optisch trockener Bereich links vorne	7,16
Äußere Schicht in einer Höhe von 2m	48,29
20 cm in der Schüttung in einer Höhe von 2m	40,30
Mitte der Schüttung	39,85
Unteres Drittel im vorderen Bereich	4,98
Unteres Drittel im hinteren Bereich	39,02
Mittleres Drittel im hinteren Bereich	40,33
Oberes Drittel im hinteren Bereich	40,42

4.3.1.6 Änderungsvorschläge

Die Form der Hackgutschüttung ist in dieser Weise für eine Trocknung nicht vorteilhaft, da nur die untersten Schichten im vorderen Bereich getrocknet werden. Der restliche Bereich wurde von keiner Trocknungsluft durchströmt. Es ist davon auszugehen, dass dies auch im weiteren Verlauf der Trocknung nicht der Fall gewesen wäre, da die Trocknungsluft bereits aufgrund des hohen Druckwiderstandes der Schüttung bereits unten und seitlich aus der Schüttung austritt, da hier der

geringste Widerstand herrschte. Diese Schichten sind nach 85 Stunden auch bereits übertrocknet. Daher wurde bei den darauf folgenden Messungen eine trapezförmige Schüttung mit einer Höhe von ca. 2 m in der Trocknungsbox bewerkstelligt (siehe Abbildung 4-10).



Abbildung 4-10 Trapezförmige Hackgutschüttung

Das Verhältnis von Strom und Wärme auf Basis dieser Schüttungsform liegt mit 0,12 kWh/kWh im unteren Bereich. Für den Verlauf der Temperaturen und der entsprechenden relativen Luftfeuchte konnten die gleichen Gesetzmäßigkeiten, wie sie bereits bei den Labormessungen aufgezeichnet wurden, festgestellt werden. Die Trocknung erfolgt stets in Segmenten, wobei im Praxisbetrieb die Schüttung eine wesentliche Rolle spielt. Durch eine unsachgemäße Aufschüttung des Trocknungsgutes kann eine Durchtrocknung nicht gewährleistet werden und die Trocknungs- sowie Produktqualität verschlechtern sich signifikant.

4.3.2 Detaildarstellung der Feldmessung 9

Die Daten der Feldmessung 9 sind in Tabelle 4-5 dargestellt. Bei dieser Trocknung wurde versucht die im Laborbetrieb identifizierte Monitoringmethode über den Knickpunkt auf die Feldmessungen zu übertragen.

Tabelle 4-5 Detailergebnisse der Feldmessung 9

Anzahl der Lüfter	2
Material	G 50
Wärmequelle	VL
Luftmenge [m ³ /h]	9.610,56
Außenlufttemperatur Ø [°C]	14,87
Trocknungslufttemperatur Ø [°C]	42,52
Aufwärmspanne Ø [°C]	27,65
Außenluftfeuchte Ø [%]	66,13
Trocknungsluftfeuchte Ø [%]	13,88
Versuchsdauer [h]	26,60
Wassergehalt Start	35,13

Für die Feldmessung 9 waren 6 Feuchte-/Temperatur-Sensoren in der Hackgutschüttung untergebracht. Diese waren in zwei Reihen (Sensorreihe 1 und 2), wie in Abbildung 4-11 dargestellt wird, angebracht.

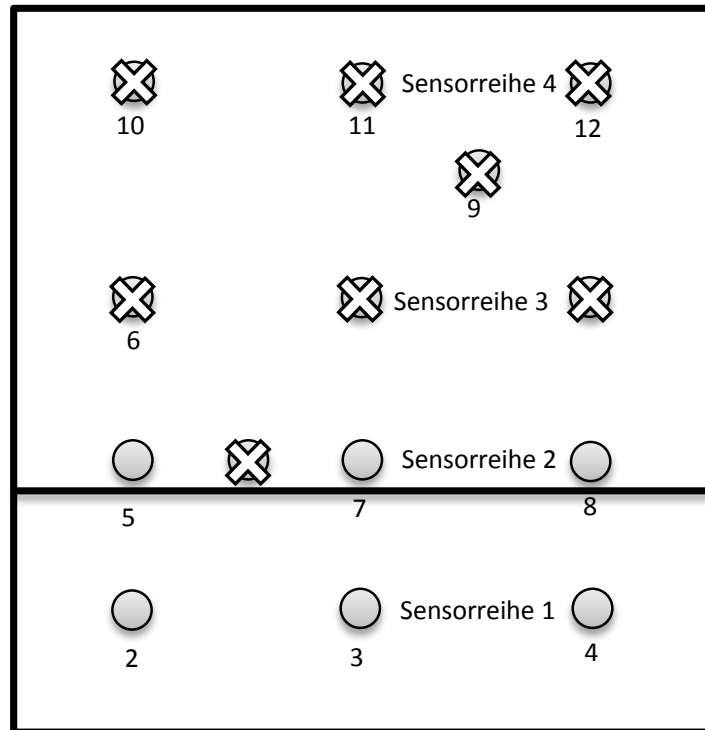


Abbildung 4-11 Anordnung der Temperatur- und Feuchtesensoren im Schüttgut

4.3.2.1 Darstellung der Außenluft- und Trocknungslufttemperatur

In Abbildung 4-12 ist der Zusammenhang zwischen der Außenlufttemperatur und der Trocknungslufttemperatur dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die Trocknungslufttemperatur mit einer mittleren Temperaturdifferenz von 26,7 K der Außenlufttemperatur folgt.

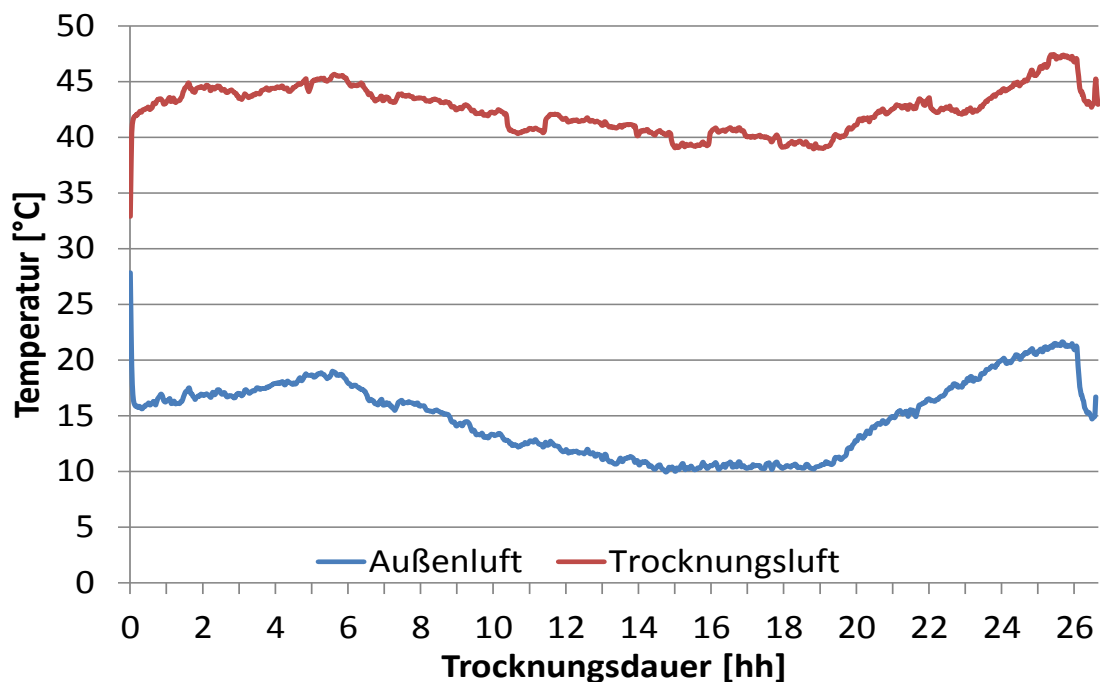


Abbildung 4-12 Verlauf der Außenluft- und der Trocknungslufttemperatur

4.3.2.2 Verlauf der Temperaturen im Hackgut

Abbildung 4-13 stellt den Verlauf der Temperaturen in der ersten Sensorreihe sowie den Verlauf der Trocknungslufttemperatur da. Der Verlauf zeigt, dass sich nach einer kurzen Startzeit die Temperaturen auf etwa 20°C einpendeln. Nach 7 Stunden beginnen die Temperaturen an den Sensoren zu steigen. Als erstes steigt die Temperatur am Sensor 2 an. Dies war auch bei der Feldmessung 1 der Fall. Nach 11 Stunden beginnt auch die Temperatur am Sensor 3 zu steigen. Nach über 20 Stunden steigt auch die Temperatur am letzten Sensor in dieser Ebene an. Nachdem alle Sensoren in der ersten Sensorreihe sich der Trocknungslufttemperatur angenähert hatten, wurde der Versuch nach einer Trocknungsdauer von 26,60 Stunden beendet.

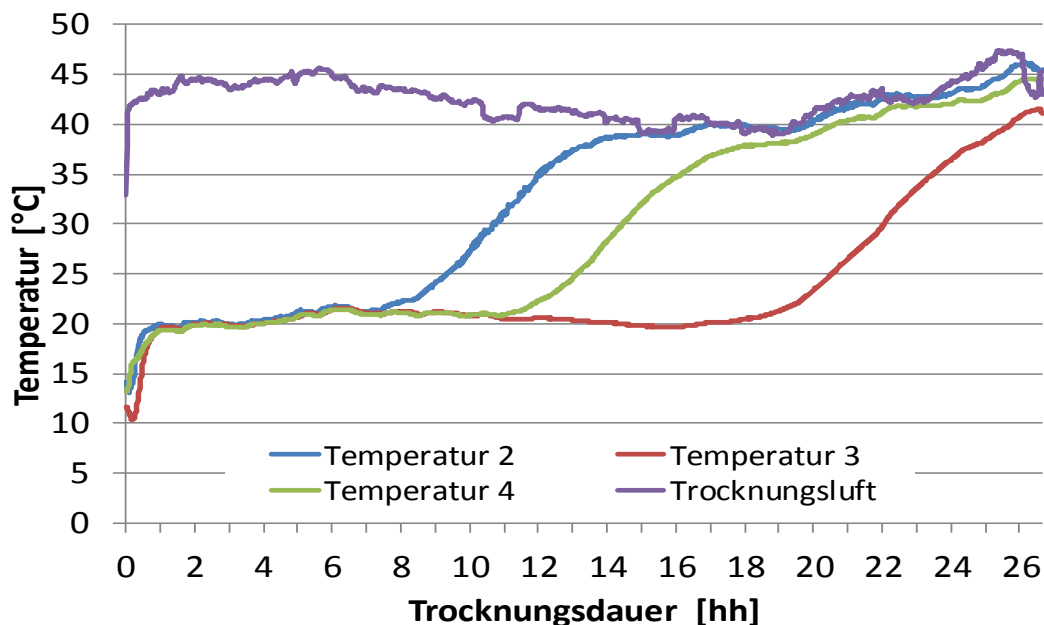


Abbildung 4-13 Verlauf der Temperaturen der Sensorreihe 1

Die Temperaturen in der Sensorreihe 2 lagen über die Messdauer bei annähernd 20 °C und waren nur leichten Schwankungen unterworfen. In Abbildung 4-14 ist der Temperaturverlauf dargestellt.

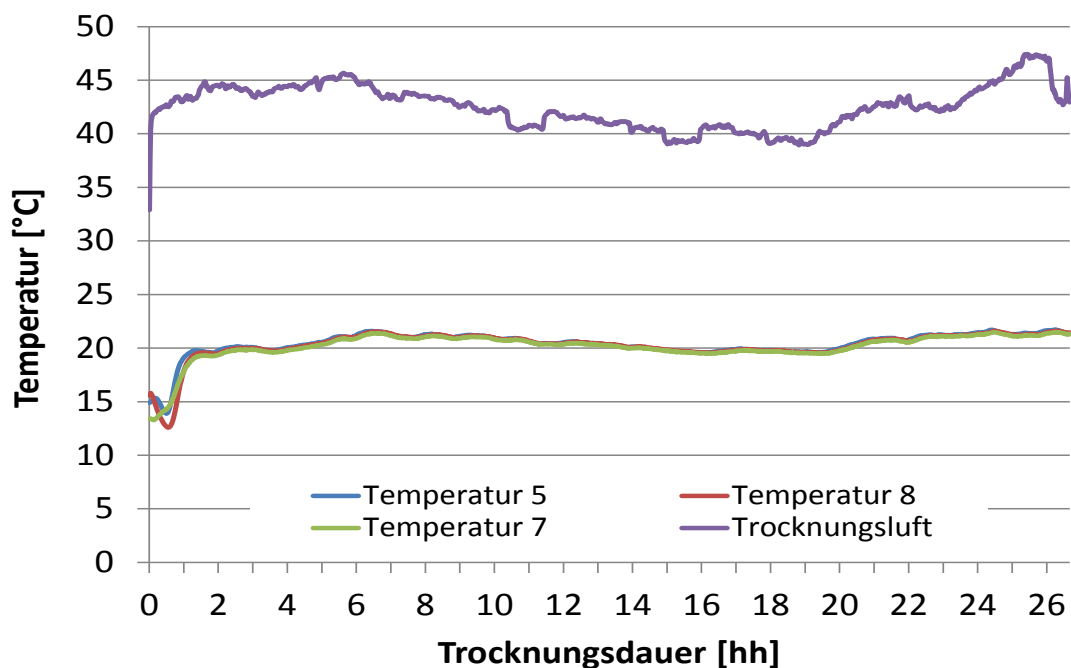


Abbildung 4-14 Verlauf der Temperaturen der Sensorreihe 2

4.3.2.3 Verlauf der relativen Luftfeuchte

Der Verlauf der relativen Luftfeuchte verhält sich auch bei dieser Messung indirekt proportional zum Temperaturverlauf. Daher wird nur der Verlauf der Sensorreihe 1 in Abbildung 4-15 dargestellt.

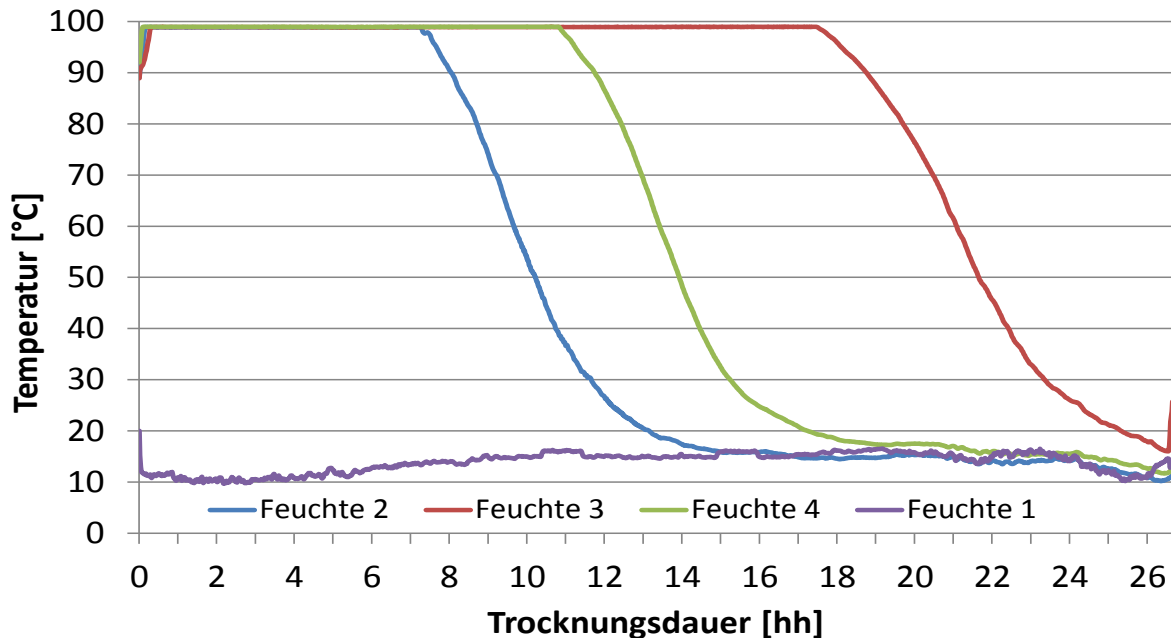


Abbildung 4-15 Verlauf der relativen Luftfeuchte der Sensorreihe 2

4.3.2.4 Energieeinsatz

Der Energieeinsatz der Trocknung wird in die thermische sowie elektrische Energie aufgeteilt. In diesem Fall wurde die Wärme aus dem Vorlauf des Nahwärmenetzes entnommen. Tabelle 4-6 stellt den Energieverbrauch dar.

Tabelle 4-6 Energieeinsatz der Feldmessung 9

Wärmemenge [kWh]	2.900
Elektrische Energie [kWh]	320
Gesamtenergieverbrauch [kWh]	3.220
Verhältnis Strom / Wärme [kWh/kWh]	0,11

Bei einer Versuchsdauer von 26, 6 Stunden und einer verbrauchten Wärmemenge von 2.900 kWh wurde mit einer durchschnittlichen Leistung von 109 kW getrocknet. Das Strom-/Wärme-Verhältnis liegt mit einem Wert von 0,11 im unteren Bereich. Obwohl mit 320 kWh elektrischer Energie sehr viel Hilfsenergie verbraucht wurde, ist der Wert niedrig da mit einer hohen thermischen Leistung getrocknet wurde.

4.3.2.5 Endwassergehalt der Feldmessung 9

Die Trocknung wurde mit einem Anfangswassergehalt von 35,13 % gestartet. Das Ziel war es durch die Knickpunktmethode so zu trocknen, dass durch eine darauffolgende Durchmischung des Hackgutes ein durchschnittlicher Wassergehalt von 25 % erreicht werden kann. Anhand der Parameter aus Tabelle 4-7 für den Wassergehalt an unterschiedlichen Stellen zeigt sich, dass die Knickpunktmethode eine Möglichkeit zur Optimierung der Trocknungsdauer darstellt. Der Wassergehalt in den oberen Bereichen (Kondensationszone; im Mittel ca. 20 cm) der Schüttung liegt mit Werten von etwa 40 % um 5% über dem Wassergehalt des Ausgangsmaterials. Die Werte im

mittleren Bereich der Schüttung liegen bei dem angestrebten Wert von etwa 25 % Wassergehalt. Die Werte in den unteren Bereichen liegen bei etwa 10 % und sind übertrocknet. Durch eine anschließende Durchmischung des Materials könnte ein Hackgut mit einem Wassergehalt von durchschnittlich 25 % bereitgestellt werden.

Tabelle 4-7 Wassergehaltsmessungen an ausgewählten Bereichen der Feldmessung 9

Ort der Probenahme	Wassergehalt [%]
Vorderer Bereich oben	40,16
Vorderer Bereich unten	10,46
Mitte der Schüttung	37,02
Hinterer und oberer rechter Bereich	39,90
Hinterer und oberer linker Bereich	28,21
Hinterer und mittlerer Bereich	40,21
Mitte (rechts)	23,65
Mitte (links)	24,51

4.3.2.6 Änderungsvorschläge

Für die Anwendung der Knickpunktmethode ist vor allem die Höhe der Sensoren in der Schüttung von großer Bedeutung. Hierfür muss die optimale / kalibrierte Höhe für die jeweiligen Trocknungsparameter ermittelt werden. Für gleichbleibende Ergebnisse sollte der Anfangswassergehalt sowie die Schütthöhe nur wenig verändert werden.

Im Allgemeinen konnte festgestellt werden, dass die Knickpunktmethode eine Möglichkeit der Optimierung der Trocknung darstellt. Hierdurch kann online der Fortschritt der Trocknung überwacht werden und zum optimalen Zeitpunkt beendet werden. Dadurch kann die eingesetzte Energie effizient verwendet werden und ein Übertrocknen verringert bzw. vermieden werden. Es besteht jedoch noch weiterer Entwicklungsbedarf um die Genauigkeit und den Einsatz weiter zu verbessern.

4.4 Analyseergebnisse der Feldmessungen

Anhand der durchgeführten Feldmessungen konnten die Laborversuche verifiziert werden. Die aufgezeichneten Verläufe der relativen Luftfeuchte sowie der Temperaturen entsprechend den bereits erhalten Laborergebnissen.

In der Trocknungspraxis von Hackgut ist die Schüttung von großer Bedeutung. Es ist dafür zu sorgen, dass das Hackgut gleichmäßig geschüttet ist (bei Rosttrocknung idealerweise trapezförmig), damit an jeder Stelle der gleiche Gegendruck herrscht. Ist dies nicht der Fall kann eine gleichmäßige Trocknung nicht gewährleistet werden, da die Trocknungsluft den Weg des geringsten Widerstandes wählt.

Im Praxisbetrieb ist ein Trocknungsmonitoring schwer zu realisieren, da der Wassergehalt der Schüttung nicht online aufgezeichnet werden kann. Die im Labor identifizierte Knickpunktmethode stellt jedoch eine sinnvolle Möglichkeit zum Monitoring auf Basis eines mit dem Wassergehalt korrelierenden Parameters, dem vertikalen Temperaturverlauf, dar.

Damit bei der Rosttrocknung eine homogene Produktqualität gewährleistet werden kann, empfiehlt sich eine Durchmischung des Hackguts nach der Trocknung, damit sich übertrocknetes sowie feuchtes Hackgut zu einem homogenen Material mit annähernd gleichem Wassergehalt vermischen. Für eine schnellere Trocknung soll mit höheren Temperaturen getrocknet werden. Auch soll ein nicht zu großer Luftmassenstrom bei der Trocknung vorherrschen. Durch eine geringere Luftgeschwindigkeit erhöht sich die Verweildauer der Trocknungsluft, welche höhere

Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

Trocknungslufttemperaturen aufweist. Dadurch reduziert sich die Trocknungsdauer signifikant und die Stromkosten können gering gehalten werden. Im worst case (siehe Messung 7) umfasst das Strom-/Wärme-Verhältnis bei niedrigen Trocknungstemperaturen und hohen Luftmengen einen hohen Betrag (Messung 7: 0,51). Aufgrund der hohen Stromkosten wird die Trocknung unwirtschaftlich.

Bei den Feldmessungen konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den verwendeten Material (G30 und G50) festgestellt werden. Dies entspricht auch den Ergebnissen der Labormessungen.

5 Bereitstellung und Integration der Trocknungsenergie

Für die Bereitstellung der Trocknungsenergie kommen verschiedene Möglichkeiten in Frage. In dieser Arbeit werden beispielhaft die Möglichkeit der Solarthermie sowie der industriellen Abwärmenutzung untersucht. Dazu werden unterschiedliche Lastgänge dargestellt und verglichen.

5.1 Solarthermie

Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass kaum Überschusswärme aus Solarthermie für die Hackguttrocknung in einem Heizwerk zur Verfügung steht, da die Auslegung der Solarthermieanlage im Hinblick auf die Erfordernisse des Nah- bzw. Fernwärmenetzes erfolgt. Problematisch an der Verwendung von Solarthermie ist neben der ungleichmäßigen Sonneneinstrahlung und der daraus resultierenden ungleichmäßigen Lieferung von Solarthermie auch die Ungewissheit über die Menge und den Anfall der Solarthermie. Des Weiteren wird ein optimaler Standort für die Anlage benötigt. Neben diesen Nachteilen bietet Solarthermie aber signifikante Vorteile. Dazu zählen die Bereitstellung einer günstigen Trocknungsenergie und die Nachhaltigkeit dieser Energiequelle.

Auch wurde eine grobe Investitionskostenabschätzung für die Errichtung bzw. Erweiterung einer Solarthermieanlage vorgenommen, wobei anzumerken ist, dass die Kosten stets auf den jeweiligen Anwendungsfall adaptiert werden müssen (Individualbetrachtung). Es erfolgte eine Variantenrechnung für zwei unterschiedliche Kollektorflächen: (1) 500 und (2) 1.000 m²

Für die Investitionskosten wurden repräsentative Angebote herangezogen:

- Angebot 1: 400 EUR/m² +/- 70 EUR; für Montage, Einbindung in den Primär- bzw. Sekundärkreis und Pufferspeicher;
- Angebot 2: 230 EUR/m²; Kosten für den Kollektor (ohne Einbindung und Speicher)

In Tabelle 5-1 sind die Investitionskosten für eine Solarthermiekollektorgesamtfläche von 500m² und 1.000m² von zwei unterschiedlichen Angeboten dargestellt. Für das Angebot 1 sind jeweils die geringsten und die höchsten Investitionskosten dargestellt.

Tabelle 5-1 Investitionskosten für unterschiedliche Solarthermiekollektorgrößen

Quelle:[eigene Darstellung]

Investitionskosten	[€/m ²]	500 m ² Kollektorfläche	1.000 m ² Kollektorfläche
Angebot 1 (Minimum)	€ 330	€ 165.000	€ 330.000
Angebot 1 (Maximum)	€ 470	€ 235.000	€ 470.000
Angebot 2	€ 230	€ 115.000	€ 230.000

Als Basis für die Erlösbestimmung bei Verwendung von Solarthermie als Wärmequelle wird eine jährliche Wärmemenge aus Solarthermie von 424.290 kWh/Jahr für die Hackguttrocknung angenommen (entspricht der jährlichen Wärmemenge des involvierten Heizwerkes aus Solarthermie). Mit dieser Wärmemenge wird die Menge des trockenbaren Hackgutes errechnet, wobei das Hackgut von einem Anfangswassergehalt von 50% auf einen Endwassergehalt von 25% getrocknet werden soll. Für die Berechnung werden unterschiedliche thermische Wirkungsgrade der Trocknung herangezogen und die entsprechende trockenbare Hackgutmenge mit einem Anfangswassergehalt von 50 [%] bestimmt:

- η_{th} = 40 % : 764 [t] (ergibt getrocknet 509 [t] mit 25 [%] Wassergehalt)
- η_{th} = 50 % : 955 [t] (ergibt getrocknet 637 [t] mit 25 [%] Wassergehalt)
- η_{th} = 60 % : 1.146 [t] (ergibt getrocknet 764 [t] mit 25 [%] Wassergehalt)

5.2 Abwärmenutzung zur Hackguttrocknung in einem Heizwerk

Die Nutzung von betrieblicher/industrieller Abwärme zu Trocknungszwecken, im vorliegenden Fall zur Hackguttrocknung in einem Heizwerk, ist grundsätzlich möglich und kann auch wirtschaftlich sinnvoll sein. Allerdings ist jedes Projekt individuell auf seine technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit hin zu überprüfen. Die Nutzung von Abwärme zur Hackguttrocknung in einem Heizwerk wird nur dann sinnvoll sein, wenn eine Wärmeeinspeisung in das Nah- bzw. Fernwärmenetz unter den vorherrschenden Rahmenbedingungen nicht möglich ist [Theißing et al., 2009] über die Integration von industrieller Abwärme in externe Wärmeversorgungsnetze). Nachfolgend werden Aspekte der Abwärmenutzung für Trocknungszwecke näher betrachtet.

5.2.1 Örtliche Gegebenheiten

Für eine Lieferung von Abwärme zu Trocknungszwecken an ein Heizwerk in unmittelbarer Nähe sprechen Faktoren wie die vorhandene Infrastruktur zur Hackgutmanipulation und –lagerung. Für jedes spezifische Projekt müssen dabei die Investitions- und Betriebskosten für Wärmetransport und -einbindung den erwarteten höheren Erlösen für ein qualitativ höherwertiges Hackgut gegenübergestellt werden. Das Ergebnis daraus kann sein, dass eine direkte Trocknung im Betrieb, in dem die Abwärme anfällt technisch und wirtschaftlich günstiger ist als im benachbarten Heizwerk.

5.2.2 Temperaturniveau der Abwärmelieferung

Da der Trockenprozess bei höheren Temperaturen schneller abläuft, sollte die Vorlauftemperatur der Abwärmelieferung für die Hackguttrocknung mindestens 40 [°C] betragen, da im Temperaturbereich von 20 bis 40 [°C] mit einer deutlich längeren Trocknungsdauer zu rechnen ist (vgl. Abschnitt 3). Die obere Grenze für eine Nutzung zu Trocknungszwecken ist dann erreicht, wenn das Temperaturniveau der Abwärmelieferung der Vorlauftemperatur des Wärmeversorgungsnetzes entspricht, da in diesem Fall eine Einspeisung in das Wärmeversorgungsnetz wirtschaftlich sinnvoller sein wird.

5.2.3 Art der Abwärmelieferung

Die Abwärmelieferung kann stationär, d.h. Abwärme wird kontinuierlich geliefert (Bandlastcharakteristik), oder instationär erfolgen. Die Nutzung stationärer Abwärme zur Hackguttrocknung ermöglicht grundsätzlich eine kontinuierliche Trocknung über das Jahr. Falls die Abwärmecharakteristik jedoch so beschaffen ist, dass eine Einspeisung in das Wärmeverteilnetz möglich ist, wird diese wirtschaftlich sinnvoller sein. Die direkte Nutzung von instationärer Abwärme für Trocknungszwecke ist nur möglich wenn die zeitlichen Perioden ohne Abwärmelieferung relativ kurz sind, ansonsten ist ein Pufferspeicher zur Glättung der unregelmäßigen Liefercharakteristik nötig. Darüber hinaus ist zu klären, ob eine Trocknung in dem Betrieb, in dem die Abwärme anfällt, realisierbar ist, da in diesem Fall Aufwand und Kosten für Wärmetransport und –einbindung reduziert werden können.

5.2.4 Abschätzung eines Potentials zur Wärmenutzung für die Hackguttrocknung am Beispiel eines Heizwerkes

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde erhoben, welche Möglichkeiten zur Einbindung von am Heizwerk erzeugter Wärme für die Hackguttrocknung vorhanden sind. Zu diesem Zweck wurde die Wärmeliefercharakteristik des Heizwerks analysiert. Es wurden die erzeugten Jahreswärmemengen von Kessel, Solaranlage und Rauchgaskondensation sowie die an das Fernwärmenetz gelieferte jährliche Wärmemenge betrachtet. Grundsätzlich steht nur jene Wärmemenge für die Trocknung zur

Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

Verfügung, die nicht für eine Lieferung ins Fernwärmenetz benötigt wird, wie zum Beispiel überschüssige Wärme aus der solarthermischen Erzeugung. In Abbildung 5-1 findet sich der Jahreslastgang der Wärmelieferung aus Kessel, Solaranlage und Rauchgaskondensation, in Abbildung 5-2 ist die entsprechende Jahresdauerlinie dargestellt.

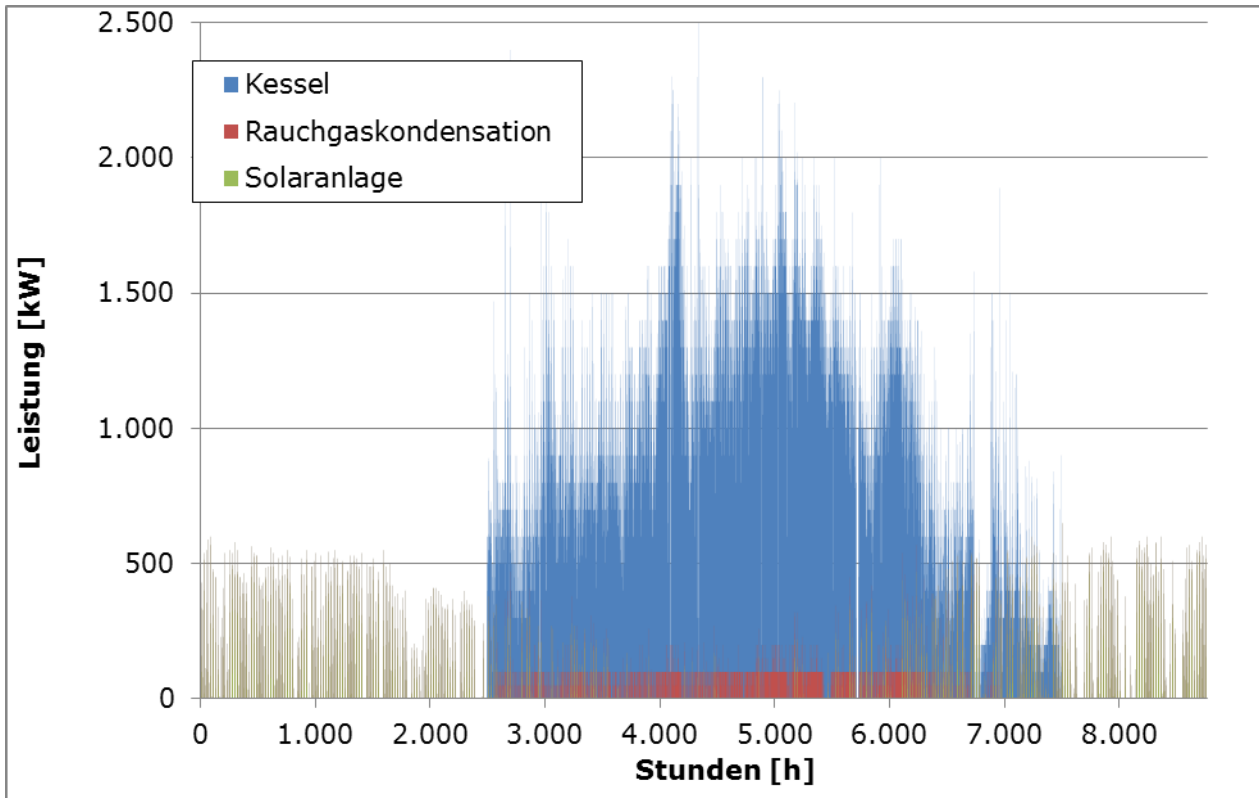


Abbildung 5-1 Jahreslastgang des betrachteten Heizwerks (1.7.2009 bis 30.6.2010)

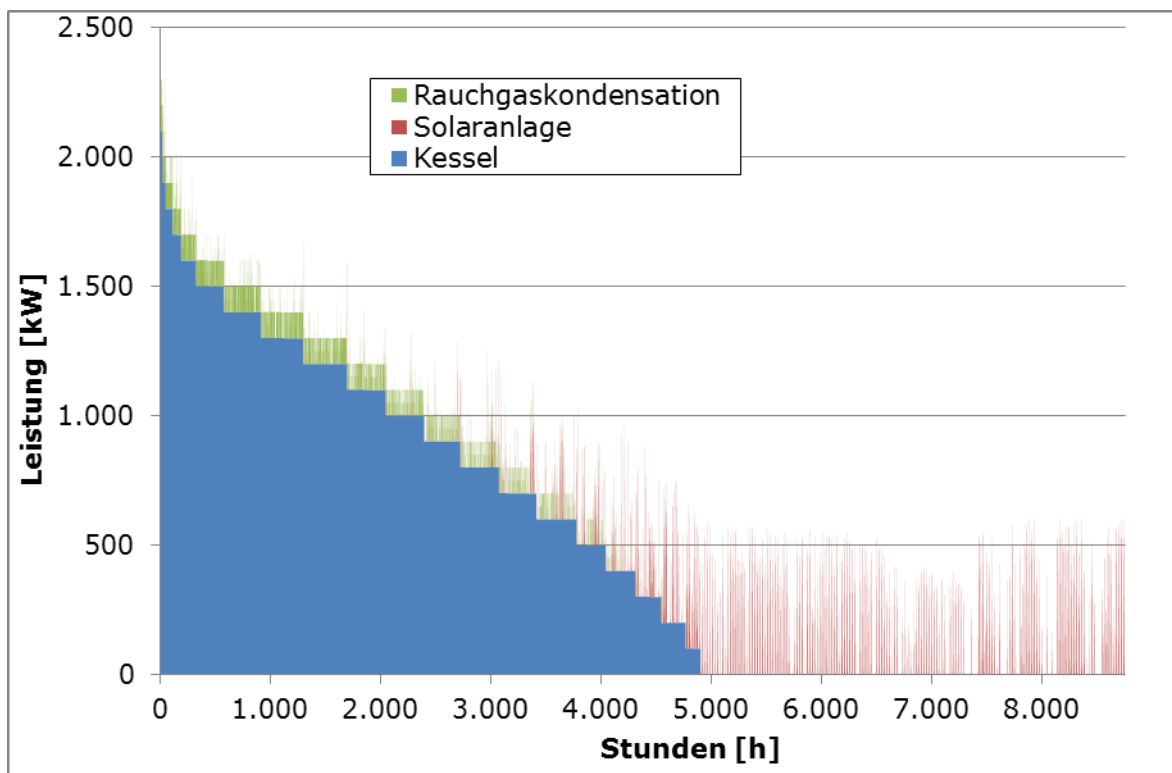


Abbildung 5-2 Jahresdauerlinie des betrachteten Heizwerks

In Abbildung 5-3 ist dem Jahreslastgang der Wärmelieferung der einzelnen Aggregate des Heizwerks der Lastgang der Wärmelieferung in das Fernwärmenetz beigelegt. Daraus ist ersichtlich, dass die im Heizwerk produzierte Wärme nahezu zur Gänze ans Fernwärmenetz geliefert wird, und daher keine Überschusswärme zur Hackguttrocknung vorhanden ist. Für eine Kontrollrechnung wurden die von der Solaranlage erzeugten und an das Fernwärmenetz gelieferten Wärmemengen während der Stehzeiten des Kessels in den Sommermonaten aufsummiert. Daraus ergibt sich eine geringfügig höhere Erzeugungsmenge der Solaranlage von rund 40.000 [kWh] pro Jahr.

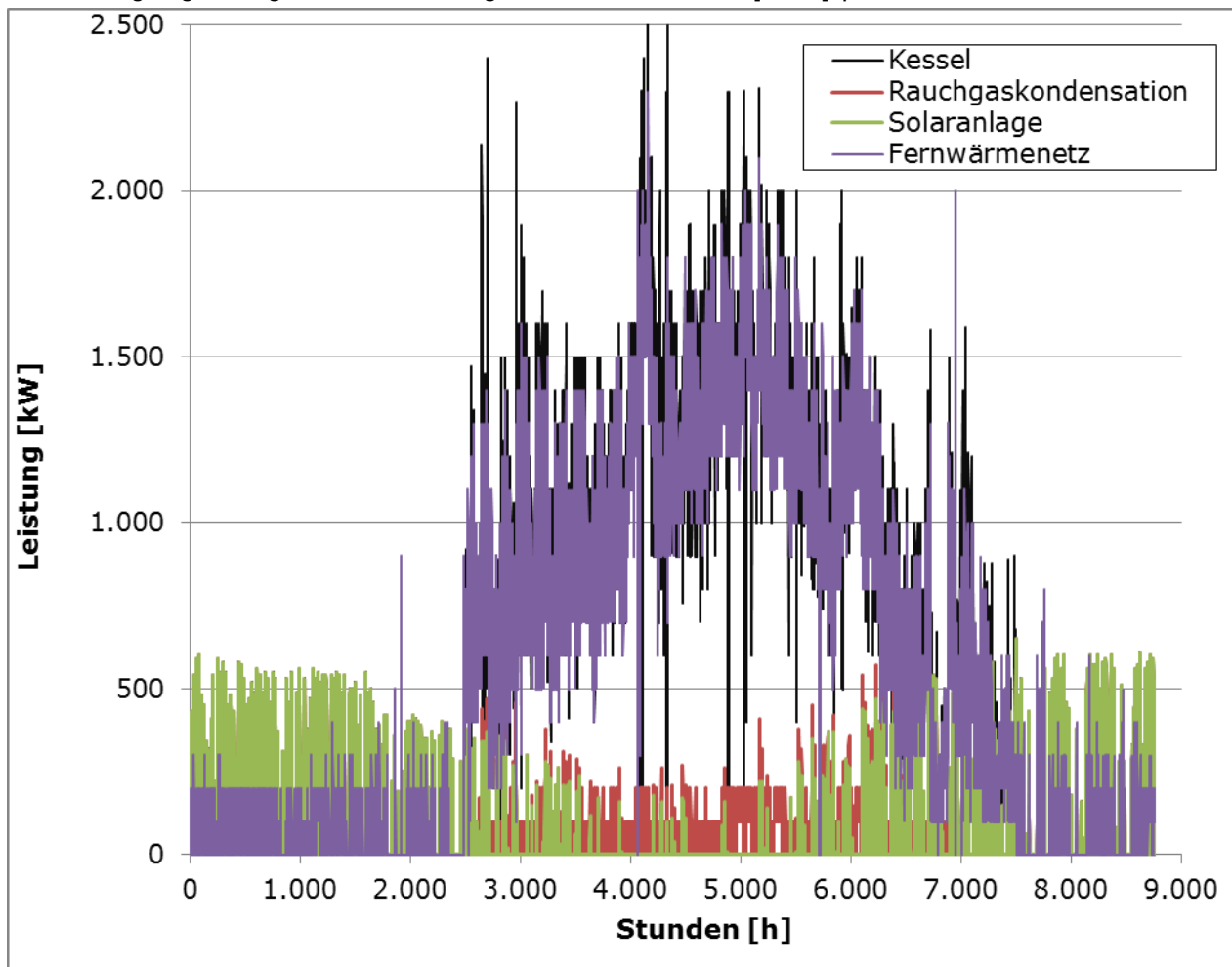


Abbildung 5-3 Jahreslastgang des Heizwerks und Fernwärmelieferung an das Netz

5.2.5 Möglichkeiten zur Hackguttrocknung durch zusätzliche Wärmeerzeugung im Biomassekessel

In der Literatur finden sich Hinweise, dass der Wirkungsgrad von Biomassekesseln im niedrigen Lastbereich (unter 30 [%]) signifikant niedriger ist, als im empfohlenen Lastbereich (über 30 [%]). Es könnte daher auf Grund des höheren Wirkungsgrades wirtschaftlicher sein, den Biomassekessel nicht unter 30 [%] Kessellast zu betreiben und die dadurch produzierte Wärme, die nicht für das Fernwärmenetz benötigt wird, zur Hackguttrocknung zu nutzen. Eine Absenkung des Wirkungsgrades im Lastbereich unter 30 [%] kann als sehr wahrscheinlich angenommen werden, es bestehen jedoch keine offiziellen Angaben über den Wirkungsgrad im Lastbereich unter 30 [%]. Ein Betrieb unter 30 [%] stellt ein Notbetrieb zur Gluterhaltung dar, für den keine Emissionsgrenzwerte garantiert werden können. Aus diesem Grund sollte der Kessel mit mindestens 30 [%] Teillast

betrieben werden. Aus dem zu Grunde liegenden Heizwerk wurde der Verlauf der Kessellast dargestellt (siehe Abbildung 5-4) und somit der Lastbereich unter 30 [%] bestimmt.

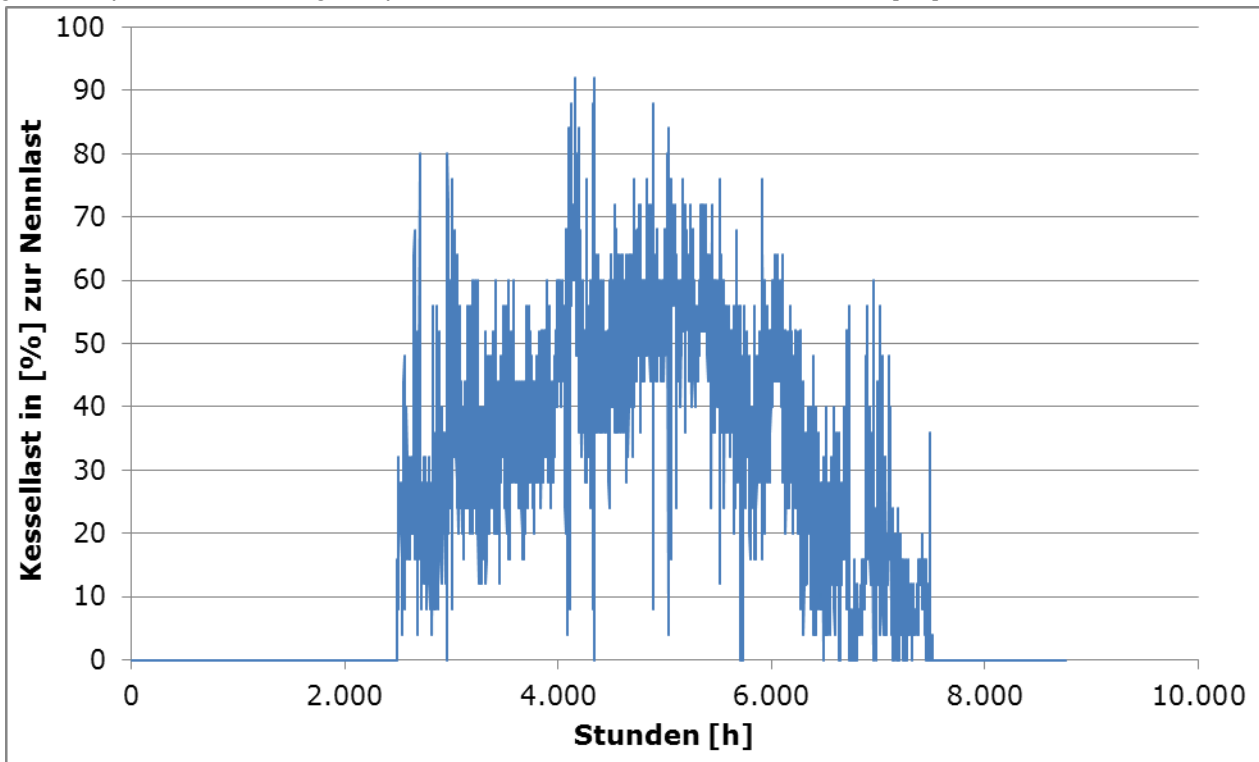


Abbildung 5-4 Jahresverlauf der Kessellast

Zur Bestimmung eines Trocknungspotentials wurde die Kesselmindestlast auf 30 [%] begrenzt. Durch die Vermeidung eines Betriebsregimes mit Gluterhaltung kommt es bei unveränderten Betriebszeiten des Kessels durch die eingehaltene Mindestlast von 30 [%] zu einem gesteigerten Wärmeoutput. Die Differenz aus dieser errechneten Wärmemenge und der tatsächlich gelieferten ergibt die für eine Trocknung nutzbare Wärmemenge. Für das betrachtete Jahr 2009/2010 ergibt sich eine zusätzlich Wärmemenge von 546.975 [kWh], die zur Trocknung genutzt werden können. Damit könnten abhängig vom Wirkungsgrad der Trocknung die in Tabelle 5-2 dargestellten Hackgutmengen in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad getrocknet werden (Annahme Anfangswassergehalt des Hackguts 50 [%], Endwassergehalt des Hackguts 25 [%], Verdampfungswärme 2.400 [kJ/kg]).

Tabelle 5-2 Hackgutrocknungsmengen für unterschiedliche Wirkungsgrade bei Vermeidung des Gluterhaltungsbetriebes

$\eta_{\text{Trocknung}}$ [-]	Hackgut [t]
0,4	985
0,5	1.231
0,6	1.477
0,7	1.723

Da keine Herstellerdaten zum Wirkungsgradverlauf bei Niedrigkessellast verfügbar sind, wurden zur Ermittlung des Brennstoffeinsatzes bei Begrenzung der Mindestkessellast auf 30 [%] (Vermeidung des Gluterhaltungsbetriebes) mittlere Wirkungsgrades des Heizwerks für das Jahr 2009/2010 herangezogen. Dabei beträgt der Wirkungsgrad im Lastbereich unter 30 [%] 64,2 [%], im Teillastbereich ab 30 [%] 80,3 [%]. Der errechnete Brennstoffeinsatz im derzeitigen Betrieb beträgt

Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

5.891.588 [kWh]. Zur Ermittlung des Brennstoffeinsatzes bei Begrenzung der Mindestkessellast auf 30 [%] wird der mittlere Wirkungsgrad für den Teillastbereich von 80,3 [%] herangezogen. Der errechnete Brennstoffeinsatz für das geänderte Betriebsregime beträgt 6.315.426 [kWh]. Somit beträgt der Brennstoffmehraufwand durch die Vermeidung des Gluterhaltungsbetriebes 423.838 [kWh]. Mit diesem zusätzlichen Brennstoffeinsatz von 423.838 [kWh] kann ein zusätzlicher Wärmeoutput von 546.975 [kWh] (im Vergleich zur Betriebsweise mit Schwachlast in der Übergangszeit) generiert werden, der zur Hackguttrocknung genutzt werden kann. Somit kann die Hackguttrocknung vor allem in der Übergangszeit erfolgen, die momentan durch eine schlechte Kesselausnutzung gekennzeichnet ist.

6 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

6.1 Schlussfolgerungen hinsichtlich des Trocknungsbetrieb-Einflusses

Viele bzw. ein Großteil der bislang errichteten Hackguttrocknungsanlagen werden ineffizient mit sehr niedrigen thermischen Wirkungsgraden (Verhältnis der Verdampfungswärme des Wassers zur eingesetzten Wärme) betrieben.

Der Verlauf der Temperaturen und der relativen Luftfeuchte folgen unabhängig von der Trocknungslufttemperatur sowie dem -massenstrom den gleichen Gesetzmäßigkeiten bzw. in verschiedenen Trocknungsphasen. Je höher diese Parameter sind, desto kürzer sind die einzelnen Trocknungsphasen ausgebildet. Die Wasseraufnahme aus dem Hackgut erfolgt insbesondere bei der von unten durchströmten Rosttrocknung in vertikalen Schichten, wobei die darüber liegende Schicht erst nach dem Abtrocknen der unteren Schicht auf einen bestimmten Wassergehalt zu steigen beginnt. Die Hackguttrocknung dauert in den oberen Schichten tendenziell länger, wobei das Trocknungsvermögen der Luft zunehmend geringer wird. Die oberste Schicht bleibt signifikant feuchter und es würde wesentlich länger dauern diese auf ein gleiches Niveau zu trocknen. Der Trocknungsprozess findet daher stets in einer Schicht statt. Das Material darunter ist bereits bis auf die hygroskopische Gleichgewichtsfeuchte getrocknet. Das Material darüber befindet sich noch im Ausgangszustand. Dadurch kommt es auch zu einer Inhomogenität des Trocknungsmaterials und es bilden sich im oberen Bereich Kondensationszonen.

Die Rosttrocknung stellt im Hinblick auf eine gleichmäßige Trocknung nicht die ideale Technologie dar (Nachteil durch inhomogenes Trockenmaterial). Die Vorteile der Rosttrocknungsanlage sind die leichte Installation und der einfache Betrieb. Der unterschiedliche vertikale Trocknungsverlauf im Schüttgut durch diese Technologie ist insbesondere dann nachteilig, wenn eine einheitliche Produktqualität, wie für Haushalte, notwendig ist. Eine gleichmäßige Durchtrocknung der gesamten Schichten ist aufgrund des beobachteten Rückgangs des Wirkungsgrades mit Fortdauer der Trocknung mit einem signifikanten Energieeinsatz und geringerer Wirtschaftlichkeit verbunden. Eine Möglichkeit besteht darin, dass das getrocknete Material nach dem Trocknungsvorgang durchmischt wird (entsprechende Technologien stehen zur Verfügung), um einen einheitlichen Wassergehalt zu gewährleisten. Jedoch gilt es hier zu beachten, dass es bei einer ungenügenden Durchmischung zu Feuchtenestern kommen kann sowie dieser Vorgang einen hohen Personaleinsatz für eine nachträgliche Hackgutmanipulation erfordert. Auch könnte die Kondensationszone bei der Rosttrocknung nachträglich (od. in regelmäßigen Abständen) abgenommen werden, wobei wiederum ein höherer Personaleinsatz erforderlich ist.

Wesentlich für einen nachhaltigen Hackguttrocknungsbetrieb ist stets die Wirtschaftlichkeit: Wärmebereitstellungskosten und Strompreis (für den Hilfsenergieeinsatz) müssen stets parallel betrachtet werden. So könnte es beispielsweise sinnvoller sein, dass mehr (billigere) Trocknungswärme bereitgestellt wird, sofern weniger Strom (für den Gebläsebetrieb) benötigt wird.

Auf den Trocknungsbetrieb haben vor allem die Trocknungslufttemperatur, die -feuchte sowie der Luftmassenstrom einen signifikanten Einfluss, welche durch Variation zum selben Ergebnis hinsichtlich Trocknungsdauer und Hackgut-Wassergehalt führen können. Soll beispielsweise bei geringerer Trocknungslufttemperatur die gleiche Trocknungsdauer erzielt werden, ist der Luftmassenstrom entsprechend zu erhöhen. Die schnellste Trocknung erfolgt bei den höchstmöglichen Temperaturen mit maximalem und trockenem Luftmassenstrom, wobei der Wirkungsgrad bei diesen Parametern nicht im optimalen Bereich wäre. Bei geringerem Luftmassenstrom wäre weniger Hilfsenergie, wie Strom für den Betrieb des Ventilators / Gebläses, notwendig. Idealerweise liegen die Temperaturen im Sinne einer niedrigen Trocknungsdauer und

geringen Wärmeverlusten im moderaten Temperaturbereich (20 – 40 °C). Zu niedrige Temperaturen bewirken eine lange Trocknungsdauer, höhere Temperaturen größere Wärmeverluste. Dennoch wird der thermische Wirkungsgrad η_R von der Trocknungslufttemperatur und dem Luftmassenstrom nur gering beeinflusst. Den größeren Einfluss auf diesen Wirkungsgrad hat die Aufwärmspanne. Dies bedeutet, je höher die Temperaturdifferenz zwischen der Außen- und der Trocknungsluft ist, desto höher ist der Energieeintrag. Es wird daher empfohlen nicht mit einer absoluten, sondern mit einer in Abhängigkeit von der Außentemperatur variierenden Trocknungstemperatur zu trocknen. Wenn es die Anlagensteuerung und das Temperaturniveau zulassen sollte eine Aufwärmspanne von 20 bis 30 K erreicht werden, da bei dieser Temperaturdifferenz auch bei schlechten Außenbedingungen (warm und feucht) eine relativ schnelle und effiziente Trocknung gewährleistet werden kann. Beispielsweise reduzieren sich bei dieser Betriebsweise an warmen und trockenen Tagen die Aufwärmspanne und der zugeführte Energieeinsatz.

Folgende weitere Einflüsse auf den Trocknungsbetrieb wurden festgestellt:

- Die Trocknungsdauer ist geringer je höher die Trocknungslufttemperatur ist.
- Über alle Versuche zeigt sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Luftmassenstrom und der Trocknungsdauer. Die Trocknungsdauer ist umso geringer, je höher der Luftmassenstrom ist.
- Das Trocknungsvermögen der Luft ist von der Trocknungslufttemperatur abhängig und steigt mit höherer Temperatur an.
- Die Trocknungsdauer sinkt mit zunehmendem Luftmassenstrom signifikant. Die Trocknungsdauer wird jedoch auch von anderen Parametern beeinflusst.
- Die Trocknungsdauer steigt an, umso feuchter die Trocknungsluft ist.
- Bei niedrigen Trocknungslufttemperaturen (20 °C) hat die Trocknungsluftfeuchte einen besonders signifikanten Einfluss auf die Trocknungsdauer.
- Eine Beschränkung der Hackgutschütthöhe für die Rosttrocknung sollte stets erfolgen und auf die jeweilige Anlage abgestimmt werden, da sonst unverhältnismäßig mehr Trocknungsenergie und insbesondere Strom bereit gestellt werden muss sowie die Inhomogenität gefördert wird (der optimale Luftdurchsatz des analysierten Feldbetriebes korreliert mit einer max. Schütthöhe von 1 m).
- Bei einer Trocknung mit relativ höheren Trocknungslufttemperaturen (40 °C) hat die Trocknungsluftfeuchte keinen wesentlichen Einfluss auf die Trocknungsdauer. Dies bedeutet für den Praxisbetrieb, dass die Luftfeuchte umso geringer sein soll, je niedriger auch die Trocknungslufttemperatur ist. Wird ein bestimmter Feuchtwert der Luft überschritten, soll von einer Trocknung Abstand genommen werden (sofern keine Entfeuchtung erfolgt).
- Eine Erhöhung der Trocknungslufttemperatur sowie des Luftmassenstroms führt zu einer wesentlichen Reduktion der Trocknungsdauer. Durch eine Verdoppelung der Trocknungslufttemperatur wird die Trocknungsdauer um annähernd die Hälfte reduziert. Bei Betrachtung des Luftmassenstroms verhält es sich ähnlich. Auch hier führt eine Verdoppelung der Luftmenge zu einer annähernden Halbierung der Trocknungsdauer. Es besteht also ein indirekter linearer Zusammenhang.
- Es soll nicht unter 25 % Wassergehalt getrocknet werden, da dies mit einem unnötig höheren Energieeinsatz verbunden ist (Wirkungsgrad wird immer schlechter und der spezifische Energieeinsatz wird immer größer).
- Bei der Rosttrocknung ist es besser, wenn „breiter als höher“ aufgeschüttet wird.
- Je knapper bei der Rosttrocknung auf einen optimalen, durchschnittlichen Wassergehalt getrocknet wird, umso besser muss das Hackgut nachher durchmischt werden.

Für den Wirkungsgrad konnten folgende Einflüsse festgestellt werden:

- Die isolierte Betrachtung der Trocknungslufttemperatur hat keinen signifikanten Einfluss auf den Wirkungsgrad der Trocknung.
- Die isolierte Betrachtung Trocknungsluftmenge hat keinen signifikanten Einfluss auf den Wirkungsgrad der Trocknung.
- Zwischen dem Wirkungsgrad und der Außentemperatur besteht der Zusammenhang, dass bei steigender Außenlufttemperatur auch der Wirkungsgrad steigt.
- Zwischen dem Wirkungsgrad und der Außenluftfeuchte besteht der Zusammenhang, dass der Wirkungsgrad mit steigender Außenluftfeuchte sinkt.
- Anhand der Darstellung über alle Temperaturen und Luftmassenströme ist für die Aufwärmspanne kein linearer Zusammenhang auf den Wirkungsgrad zu erkennen.
- Bei niedrigen Trocknungstemperaturen (20 °C) zeigt sich ein großer Zusammenhang zwischen der Aufwärmspanne und dem Wirkungsgrad. Je höher die Aufwärmspanne ist, desto geringer ist der Wirkungsgrad.
- Bei einer Trocknung mit höheren Trocknungslufttemperaturen (40 °C) zeigt sich, dass der Wirkungsgrad mit steigender Aufwärmspanne sinkt.
- Der thermische Wirkungsgrad der Trocknung liegt in einem Bereich zwischen 26 und 39 % und ist bei mittleren Trocknungstemperaturen tendenziell höher.
- Der Wirkungsgrad sinkt unabhängig von der Trocknungslufttemperatur sowie dem -massenstrom über die Dauer der Trocknung. Aufgrund der Abnahme des Wirkungsgrades ist es nicht sinnvoll Hackgut bis zu einem wesentlich niedrigen Wassergehalt zu trocknen. Bei einem Endhackgutwassergehalt von 20 % liegen die Wirkungsgrade in den Beispielen bei ca. 20 % (Trocknungslufttemperatur: 40 °C; Luftmassenstrom: 1.000 m³/h) sowie 18 % (Trocknungslufttemperatur: 20 °C; Luftmassenstrom: 500 m³/h). Dies bedeutet, dass eine Trocknung unter 20 % Wassergehalt im Hinblick auf den Wirkungsgrad nicht zu empfehlen ist.

Auf Basis der präsentierten Einflüsse kann abgeleitet werden, dass der Trocknungsbetrieb durch eine abgestimmte Regelung der variablen Trocknungsparameter (Trocknungsluftmassenstrom und –temperatur) wesentlich optimiert werden könnte. Der Wirkungsgrad wird jedoch auch von vielen kaum oder schwer regelbaren Parametern beeinflusst (z. B. Außenlufttemperatur und –feuchte). Hier könnte variabler Trocknungsbetrieb in Abhängigkeit von den Außenbedingungen wesentliche Verbesserungen bringen.

6.2 Schlussfolgerungen hinsichtlich des Material-Einflusses

Bei den verschiedenen Trocknungsversuchen mit unterschiedlichen Materialien konnte kein für die Praxis relevanter Einfluss zwischen der Art des Materials bzw. der Korngröße und den relevanten Trocknungsparametern identifiziert werden, sofern stets auf die jeweilige zu trocknenden Hackgut-Trockenmasse referenziert wurde (Normierung). Es wurden stets unabhängig vom eingesetzten Material ähnliche / gleiche Sachverhalte bei sämtlichen Materialvarianten festgestellt. Eine Siebung des Materials vor der Trocknung wird jedoch empfohlen, da der Feinanteil im Hackgut führt zu einem vermehrten Staubaustrag führt und die Hackgutmanipulation bei gesiebttem Material (bessere „Rieselfähigkeit“) besser ist. Diese Faktoren sind vor allem für die weitere Verwendung als Brennstoff für private Haushalte von großer Bedeutung.

6.3 Schlussfolgerungen hinsichtlich der sinnvollen Integration nachhaltig bereitgestellter Trocknungsenergie

Bei der sinnvollen Integration von nachhaltig bereitgestellter Trocknungsenergie sollte darauf geachtet werden, dass es sich um eine günstige Trocknungsenergie handelt, damit die Kosten niedrig bleiben und die Trocknung möglichst wirtschaftlich betrieben werden kann. Um günstige Trocknungsenergie verwenden zu können, sollte man versuchen nachhaltige Energieformen, wie zum Beispiel kombinierter Solarthermie-Heizwerkbetrieb oder verschiedene Formen der Abwärme, zu integrieren.

Bei der Integration von Solarthermie an einem bestehenden Heizwerk muss beachtet werden, dass diese alleine nicht als Trocknungsenergie geeignet ist, weil bei guter Auslegung der größte Teil der Solarthermie in das Fernwärmenetz eingespeist wird. Solarthermie kann als unterstützende Trocknungsenergie insbesondere im Sommer eingesetzt werden, wenn es einen Überschuss an Solarthermie gibt, welche nicht in das Fernwärmenetz eingespeist werden kann. Auch ist die Verwendung von Solarthermie stark vom Wetter und der Sonneneinstrahlung abhängig. Ein Speicher kann den Solarthermieanteil zur Hackguttrocknung wesentlich steigern. Sie hat den großen Vorteil, dass die Trocknungsenergie nachhaltig und kostenlos zur Verfügung steht. Für Integrationsüberlegungen muss in der Praxis stets herausgefunden werden, wie viel der Solarthermie für die Trocknung verwendet werden kann und wie viel Trocknungsenergie aus einer anderen Energiequelle stammen muss (jeder Anwendungsfall muss spezifisch untersucht werden).

Eine weitere nachhaltige Energiequelle, die in der Praxis integriert werden könnte, ist die (industrielle) Abwärme, wobei drei Arten der Abwärme zu unterscheiden sind: (1) stationäre, (2) instationäre und (3) Abwärme aus einem Batchbetrieb. Die entsprechenden Charakteristika der verschiedenen Abwärmequellen erfordern auch eine unterschiedliche Art der Integration. Während die Integration von stationären Abwärmequellen idR einfach zu realisieren ist (eignet sich gut für eine gleichmäßige und optimierte Hackguttrocknung), trifft dies für die instationäre Abwärmenutzung nicht zu. Ein Speicher kann den Integrationsanteil an instationärer Abwärme signifikant erhöhen, während sich ohne Speicher die Trocknungsdauer verlängert. Auch bei der Integration von Abwärme aus einem Praxisbetrieb mit Batch-Charakteristik kann ohne Speicher nur eine geringere Trocknungswärmebereitstellung erfolgen (längere Trocknungsdauer). Die Verwendung eines Speichers wird insbesondere für diese Abwärmequelle empfohlen, da der Trocknungsprozess außerhalb des Batches verlagert werden kann und eine annähernde Trocknungskontinuität gewährleistet werden kann. Instationäre und Batch-bedingte Abwärme sind ohne Speichereinsatz nur bedingt oder unter reduzierter Wärmebereitstellung als Trocknungsenergie geeignet. Für den Praxisbetrieb gilt, dass stets untersucht werden soll, welche Art der Abwärme zur Verfügung steht und in wie weit diese integriert werden kann.

Eine weitere Bereitstellung von Trocknungswärme könnte direkt über den Heizkessel durch eine Begrenzung der Kesselmindestlast mit 30 % der Nennleistung (Vermeidung eines Betriebsregimes mit Gluterhaltung) erfolgen. Dadurch steigt der Kesselwirkungsgrad, die Verbrennung verläuft optimierter und für das Trocknen des Hackgutes könnte der zusätzliche Brennstoffbedarf dadurch minimiert werden bzw. einen ökologischen und wirtschaftlichen Vorteil mit sich bringen.

7 Ausblick

Im offenen Trocknungsbetrieb bei den Heizwerken, gibt es bisher für ein Online-/ Echtzeitmonitoring des Trocknungsprozesses keine praktischen Erfahrungen. Im Zuge des Projektes wurde eine anwendungsgerechte Methode für das Monitoring in der Praxis erarbeitet. Der Hackgut-Trocknungsprozess zeichnet sich durch unterschiedliche Trocknungsphasen im Schüttgut aus. Es konnte festgestellt werden, dass bei Erreichen eines charakteristischen Wassergehaltes des Schüttguts bei konstanten Trocknungsbedingungen (Temperaturniveau und Massenstrom der Trocknungsluft...) ein Knickpunkt im Temperaturverlauf auftritt. Dieser charakteristische Wassergehalt entspricht dem Wassergehalt für lagerfähiges Hackgut. Durch eine vertikale Temperaturmessung im Schüttgut kann dieser Knickpunkt identifiziert werden und auch in einem offenen System ein Monitoring erfolgen. Die Abluft müsste nicht erfasst werden. Diese Monitoringvariante würde signifikante Vorteile für einen wirtschaftlichen und effizienten Trocknungsbetrieb mit sich bringen, wobei die Nachrüstkosten gering sind. Da dies nicht unmittelbarer Bestandteil des Projektes war, fehlt es an fundierten Informationen und Erfahrungen hinsichtlich dieser Methode. Ein Monitoring des Trocknungsprozesses sowie eine Regelung von Temperatur und Luftmassenstrom in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen könnten daher entwickelt werden und würden die Voraussetzungen für eine Effizienzsteigerung bilden. Beispielsweise können durch ein stufenlos verstellbares Gebläse die Stromkosten signifikant reduziert werden. Dies setzt aber, für die Erarbeitung optimierter Luftmengen je nach Trocknungsfortschritt, ein begleitendes Anlagenmonitoring voraus.

Kleinere Biomasse-Heiz(kraft)werke (< 5 MW) haben das Problem, dass durch zu nasses Hackgut im Schwachlastbereich (v. a. in den Sommermonaten; Schwachlast unter 30 % Kessellast sollte allgemein laut Herstellerangaben stets vermieden werden) der Kessel nicht optimal betrieben werden kann (schlechter Wirkungsgrad, Versottung, Anrainerbeschwerden durch Geruchsbelästigung, unvollständige Verbrennung, große Emissionsbelastung etc.) und im Winterbetrieb dadurch ein überfahren der Kesselleistung ebenfalls nicht möglich ist. Beide Betriebszustände könnten mit einem trockenen Hackgut verbessert werden, wobei im Schwachlastbetrieb eine vollständigere und stabilere Verbrennung möglich ist, sowie im Winterbetrieb durch entsprechend trockenes Material eine Substitution von meist ölbefeuerten Feuerungsanlagen zur Spitzenlastabdeckung erfolgen könnte (eine kurzfristige bis zu 20 %-ige Überschreitung der Kessel-Nennleistung bringt in der Regel keine Probleme mit sich). Zusätzlich zu diesem ökologischen Vorteil der CO₂-Reduktion können als Grenzkosten die teureren Öl-Brennstoffkosten gegen gerechnet werden, wodurch sich auch eine andere Wirtschaftlichkeit ergibt. Die Bereitstellung eines trockenen Hackgutes ist jedoch durch die natürliche Trocknung nur bedingt möglich. Eine natürliche Trocknung dauert signifikant länger und demnach wäre bei Vernachlässigung des energetischen Abbaus sowie des gebundenen Kapitals (durch die Vorfinanzierung) ein wesentlich größerer Platzbedarf (und dadurch wiederum höhere Investitionskosten) am Lagerplatz erforderlich. Die natürliche Trocknung von Hackgut kann daher aus wirtschaftlichen Aspekten nur in beschränktem Ausmaß erfolgen. Auf Basis des vorhandenen Temperaturniveaus beim Heizwerkbetrieb ist daher die Technische Hackguttrocknung eine sinnvolle Alternative zur natürlichen Trocknung. Durch einen zusätzlichen Wärmebedarf insbesondere im Schwachlastbetrieb (Sommerhalbjahr), welcher über einen Trocknungsbetrieb gewährleistet wird, hätten Biomasseanlagen im Sommer einen höheren Wärmebedarf und könnten den Kessel besser und effizienter betreiben. Dies hat zahlreiche Vorteile wie bessere Verbrennung, geringere

Emissionen, effizienteren Betrieb, höhere Wirtschaftlichkeit, geringeren Ascheanfall, höhere Energiedichte, Verringerung des Transportgewichtes etc.. Das trockene Hackgut vorrangig beim jeweiligen Heizwerk direkt verheizt werden. Zur Behandlung dieser Möglichkeiten sind jedoch noch umfassende Entwicklungsarbeiten notwendig.

Biogasanlagen haben das Problem, dass sie im Sommerhalbjahr aufgrund des stromgeführten KWK-Betriebes Überschusswärme produzieren, welche bei fehlender Wärmeabnahme weg gekühlt werden müsste. Sinnvollerweise suchen daher viele BiogasanlagenbetreiberInnen nach sinnvollen Möglichkeiten der zusätzlichen Wärmenutzung. Da diese im Gegensatz zu mit fester Biomasse betriebenen Anlagen in der Regel ein für Trocknungszwecke vorteilhaftes höheres Abwärm-Temperaturniveau (der Kondensationsbereich der Trocknungsluft kann dadurch wesentlich überschritten werden) haben, stellen Trocknungsanlagen eine interessante Möglichkeit der zusätzlichen Wärmenutzung dar. In Österreich sind bereits zahlreiche Trocknungsanlagen bei Biogasanlagen in Betrieb.

Gas- und holzbetriebene Biomasse-Anlagen haben eine unterschiedliche Lastcharakteristik, wobei sich die Möglichkeit einer sinnvollen Kombination dieser Technologien ergibt. So kann im Sommer die Abwärme aus Biogasanlagen zur Trocknung des Brennstoffs für die Biomassefeuerung genutzt werden. Durch eine sinnvolle Trocknung am eigenen Standort kann eine neue Form eines „Saisonalspeichers“ geschaffen werden (Trocknung im Sommer-, Verfeuerung im Winterhalbjahr).

Unter Berücksichtigung, des dargestellten Ausblicks ergeben sich jedoch offene Fragestellungen, welches es zu klären gilt:

Fragestellungen hinsichtlich des optimalen Betriebes der Hackgut-trocknungsanlagen:

- Welche betriebsbedingten Möglichkeiten bestehen für die Reduktion oder Umgehung der Kondensationszone bei einer Schüttgut-trocknung (in Trocknungsboxen, Containern, Tagesbunkern oder Hauptlagerbereichen)?
- Welche Trocknungssysteme passen zu den jeweiligen Anforderungen (Bestandsaufnahme von derzeit in Betrieb befindlichen Trocknungsanlagen zur Erarbeitung einer Grundlage für ein späteres Qualitätsmanagement sowie insbesondere zur Veranschaulichung / Illustration von ineffizienten und effizienten Anlagen / Best-Practice-Beispielen)?
- Welche Synergien bestehen zwischen Biogas- und Hackgut-Heiz(kraft)werken bei unterschiedlichen Anwendungsfällen?
 - o Anwendungsfall 1: Die Anlagen befinden sich auf einem Standort (Hackgutmanipulation ist einfach)
 - o Anwendungsfall 2: Die Anlagen befinden sich auf getrennten Standorten (Hackgutmanipulation ist aufwendiger).
- Welche praxisgerechten Hinweise / Empfehlungen für einen effizienten Betrieb der unterschiedlichen Anlagen bestehen (insbesondere abseits von reinen Rost-trocknungsanlagen)?
- Welche Mischungsvarianten sind für den jeweiligen Betriebszustand (Teil-, Nenn- und Spitzenlastbetrieb) optimal?
- Welche Empfehlungen bestehen für die Integration von Hackgut in den eigenen Heizwerkbetrieb, insbesondere hinsichtlich
 - o Hackgut-Manipulation,
 - o Prozess-Empfehlung (manuelle versus automatisierte Anwendung),
 - o erforderliche Betriebsmittel und

- o notwendige Zeit- und Platzkapazitäten.

Fragestellungen hinsichtlich der Errichtungsentscheidung von Hackguttrocknungsanlagen:

- Wie wirkt sich die Integration der Hackguttrocknungsanlagen auf die Gesamteffizienz von Heizwerksystemen aus (z. B. trockenes Hackgut zur Spitzenlastabdeckung)?
- Welche Wärmekosten können für einen wirtschaftlichen Betrieb der Holztrocknung angesetzt werden?
- Unter welchen Bedingungen sollte der Trocknungsbetrieb eingestellt werden?
- Welche Investitions- und Betriebskosten entstehen bei einem Umbau auf einen Technischen Hackguttrocknungsbetrieb (inkl. Monitoringsystem)?
- Es soll stets das jeweilige Gesamtsystem des Anwendungsfalls betrachtet werden (Berücksichtigung der gesamtbetrieblichen Investitions- und Betriebskosten; z. B. etwaige Opportunitätskosten eines Ölkessels).

Fragestellungen hinsichtlich des Anlagendesigns:

- Welche anlagenbedingten Möglichkeiten bestehen für die Reduktion oder Umgehung der Kondensationszone bei einer Schüttguttrocknung (in Trocknungsboxen, Tagesbunkern oder Hauptlagerbereichen)?
- Wie kann die Verweildauer der Trocknungsluft im Hackgut erhöht werden, ohne dass die Kondensationstemperatur unterschritten wird (die zum Trocknen notwendige Heizenergie ist umso geringer, je höher die Heißlufttemperatur und niedriger die Ablufttemperatur ist; daher sollte der Trocknungsprozess beim Eintritt eine hohe Temperatur und beim Austritt eine an der Kondensationstemperatur nahe liegende Ablufttemperatur aufweisen; durch eine Erhöhung der Verweildauer kann diese Temperaturdifferenz maximiert werden und möglichst viel Feuchte durch nahezu gesättigte Abluft abtransportiert werden).
- Wie kann der (thermische) Wirkungsgrad anlagenbedingt erhöht werden?
- Wie kann das Staubproblem der Abluft berücksichtigt werden?
- Trocknungsanlagen könnten insbesondere bei Biogasanlagen auch für andere Güter (z. B. landwirtschaftliche, saisonale Produkte) eingesetzt werden. Welches Anlagendesign lässt eine große Flexibilität hinsichtlich des zu trocknenden Materials zu und wie könnten diese Anlagen gestaltet werden?
- Kann mittels eines Luft-Luftwärmetauschers die erforderliche Trocknungsenergie aus dem Rauchgas gewonnen werden (Berücksichtigung von Verschmutzung, des Kondensationspunktes, der erforderlichen höheren Saugleistung des Rauchgasventilators,...), da diese Maßnahme kostengünstig zu realisieren wäre und für Nachrüstungen interessant wäre?
- Welche Möglichkeiten gibt es um die erhobenen betriebsbedingten Einflussfaktoren bestmöglich beim Anlagendesign zu berücksichtigen (z. B. durch den gezielten Betrieb eines Schubboden-Containers)?
- Wie könnte das Trocknungsmonitoring für die unterschiedlichen relevanten Anlagenarten anwendungsgerecht erfolgen?
- Wie könnte die Trocknung des Hackgutes im bestehenden Tagesbunker insbesondere im Schwachlastbetrieb erfolgen oder könnte die Trocknung auch beim Mehrtageslager sinnvoll möglich sein (beide Fragestellungen sind für Nachrüstungen relevant)?
- Welche Empfehlungen können für eine optimale Regelung der Trocknungsanlagen abgeleitet werden? Welche Temperaturen und Luftmassenströme sollen in Abhängigkeit von den

Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

Umgebungsbedingungen (unter Berücksichtigung der bestehenden Temperaturen und bestehenden rel. Luftfeuchte) eingestellt werden?

Hackgut kann insbesondere im walddreichen Österreich bei entsprechender Trocknung zu einem hochwertigen, multifunktionalen Biomassebrennstoff aufsteigen, wobei das zugrunde liegende Projekt eine fundierte Basis zur Verfügung gestellt hat. Aus den präsentierten offenen Problem- und Fragestellungen ist jedoch erkennbar, dass im Bereich der Technischen Hackguttrocknung noch ein wesentliches Optimierungs- und Verbesserungspotenzial besteht. Es gilt noch umfassende Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten durchzuführen.

8 Verzeichnisse

8.1 Literaturverzeichnis

Christen, 2010

CHRISTEN D. (2010): „Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik“, 2.bearbeitete und ergänzte Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010

CONA, 2011

CONA (2011): „Solare Hackguttrocknung“, www.cona.at/hackschnitzeltrocknung_hackgut/, (abgerufen am 11.12.2011)

Deimling et al., 2000

DEIMLING S., KALTSCHMITT M., SCHNIEDER B., RÖSCH C., JAHRAUS B., HEINRICH P., HARTMANN H., LEWANDOWSKI I., SIEGLE V., SPLIETHOFF H., OBERNBERG I. (2000): Leitfaden Bioenergie - Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Gülzow; Germany: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR)

Eberl GmbH, 2011(a)

EBERL TROCKNUNGSANLAGEN GMBH (2011): „Hackschnitzeltrockner“, www.eberl-trocknungsanlagen.de/Hackschnitzeltrockner.212.0.html, (abgerufen am 04.07.2011)

Eberl GmbH, 2011(b)

EBERL TROCKNUNGSANLAGEN GMBH (2011): E-Mail Interview vom 04.07.2011 mit Frau Feuerecker

Enercont, 2011(a)

ENERCONT GMBH (2011): „Trocknungscontainer“, www.enercont.at/content/view/22/36/, (abgerufen am 04.07.2011)

Enercont, 2011(b)

ENERCONT GMBH (2011): E-Mail Interview vom 06.07.2011 mit Frau Edith Seiwald

Forstverwaltung Stift Lambach, 2011

FORSTVERWALTUNG STIFT LAMBACH (2011): „Ofenholz- und Hackgutpreise – 1.Halbjahr 2011“, www.stift-lambach.at/PDF/ForstPreisliste.pdf, (abgerufen am 21.12.2011)

Gaderer et al., 2007

GADERER M., LAUTENBACH M., FISCHER T., RBERTSCH G. (2007): Wärmenutzung bei kleinen landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Augsburg; Germany: Barisches Landesamt für Umwelt

Golser et.al, 2004

GOLSER M., NEMESTOTHY K., SCHNABEL R. (2004): „Methoden zur Übernahme von Energieholz“, Holzforschung Austria, 2004

Kaltschmitt & Hartmann, 2001

KALTSCHMITT M. & HARTMANN H. (2001): "Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren", Springer Verlag Berlin – Heidelberg – New York, 2001

Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

Kaltschmitt & Hartmann, 2009

KALTSCHMITT M. & HARTMANN H. (2009): „Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren“, 2. Auflage, Berlin 2009

Kneule, 1975

KNEULE F. (1975): Das Trocknen - Band 6 von Grundlagen der chemischen Technik, Ausgabe 3, Sauerländer-Verlag

Kollmann, 1982

KOLLMANN F. (1982): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Berlin; Germany: Springer

Krischer & Kast, 1992

KRISCHER O. & KAST W. (1992): Trocknungstechnik – Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin; Germany: Springer

Kröll & Kast, 1989

KRÖLL K. & KAST W. (1989): Trocknungstechnik – Trocknen und Trockner in der Produktion. Berlin; Germany: Springer

Neue Statistik, 2003

PROJEKT NEUE STATISTIK (2003): Die Empirische Regression. Freie Universität Berlin, web.neuestatistik.de/inhalte_web/content/files/modul_37161.pdf, (abgerufen am 17.05.2011)

Roth, 1989

ROTH H. (1989): Trocknungsprozesse. Berlin; Germany: Akademie Verlag Berlin

RTS, 2011(a)

RTS TROCKNUNGSTECHNIK GMBH (2011): Bereich Hackgut, www.heutrocknung.at/inhalt-b.htm, (abgerufen am 05.07.2011)

RTS, 2011(b)

RTS TROCKNUNGSTECHNIK GMBH (2011): E-Mail Interview vom 24.07.2011 mit Herrn Unterguggenberger

Schaller GmbH, 2009

MESSTECHNIK SCHALLER GMBH (2009): „Hackgut-Hackschnitzel Feuchtemessung“, www.schaller-gmbh.at/prospekte.php, (abgerufen am 11.12.2009)

Schmidt & Grigull, 1989

Schmidt E., Grigull U. (1989): Properties of water and steam in SI-units: 0-800 C, 0-1000 bar, Springer-Verlag

Stela, 2011

STELA TROCKNUNGSTECHNIK (2011): E-Mail Interview vom 05.07.2011 mit Frau Diana Obermeier-Hein und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Bernhard Stummer,

Stichlmair et al., 2005

STICHLMAIR, J., MERSMANN, A. & KIND, M. (2005) Thermische Verfahrenstechnik – Grundlagen und Methoden. Berlin; Germany: Springer

Theißing et al., 2009

THEIßING M., KRAUßLER A., MUSTER M., SCHLOFFER M., TRAGNER M., WANEK M. (2009): Instationarität von industrieller Abwärme als limitierender Faktor bei der Nutzung und Integration in Wärmeverteil- und Wärmenutzungssystemen, Projektbericht im Rahmen der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 34/2009, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2009

Thienel, 2009

THIENEL K. (2009): Bauchemie und Werkstoffkunde des Bauwesens – Holz, München; Germany, www.unibw.de/bauv3/lehre/skripten/holz2009.pdf, (aufgerufen am 10.01.2010)

Wernecke, 2003

WERNECKE R. (2003): Industrielle Feuchtemessungen – Grundlagen, Messmethoden, technische Anwendungen. Weinheim; Germany: Wiley-VCH

Wild et al., 1999

WILD C., FELLER S., WEBENAU B., WEIXLER H., KRAISENBÖCK B., GÖLDNER A. (1999): Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln. Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft; Germany

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Versuchsanlage	14
Abbildung 1-2 Schemabild des Laboraufbaus	15
Abbildung 1-3 Anbringung der Messtechnik an der Trockenboxrückwand	22
Abbildung 2-1 Heiz- und Brennwert von Holz in Abhängigkeit vom Wassergehalt.....	25
Abbildung 2-2 Wasserbewegung in den Kapillaren	27
Abbildung 2-3 Luft-, Wärme- und Dampfstrom bei der Konvektionstrocknung	28
Abbildung 2-4 Schematischer Verlauf der Trocknungsfunktion $X(t)$	29
Abbildung 2-5 Theoretischer Verlauf der Gutsfeuchte X in verschiedenen Schichten einer Schüttung.....	31
Abbildung 2-6 Feuchtigkeitsgehalt sowie Temperatur über den Trocknungsverlauf in verschiedenen Höhen einer 100 cm hohen Schüttung.....	32
Abbildung 2-7 Trocknungsverlauf von Luzernen in 5 gleichen Schichten einer 15 cm hohen Schicht bei einer Trocknungstemperatur von 80 °C mit verschiedenen relativen Luftfeuchten	33
Abbildung 2-8 Verfahren der Hackguttrocknung	36
Abbildung 2-9 Temperaturverlauf bei Gleich- und Gegenstrom von Gut und Luft im Konvektionstrockner; I: 1.Trocknungsabschnitt, II: 2. Trocknungsabschnitt.....	38
Abbildung 2-10 Grundaufbau eines Satz Trockners.....	39
Abbildung 2-11 Schaltbild einer Satz Trocknungsanlage.....	39
Abbildung 2-12 Funktionsweise eines Einbandtrockners.....	40

Abbildung 2-13 Funktionsweise Drehrohrtrockner	40
Abbildung 2-14 Schema der solaren Hackguttrocknung	41
Abbildung 2-15 Container	42
Abbildung 2-16 Innenraum von Container mit Lochboden	43
Abbildung 2-17 Trocknungsbox Schema	43
Abbildung 2-18 Funktionsschema des Bandtrockners	44
Abbildung 2-19 Funktionsschema des Trommeltrockners	45
Abbildung 3-1 Verlauf der Temperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit bei einer Trocknungstemperatur von 20 °C und einem Luftmassenstrom von 570 m ³ /h	50
Abbildung 3-2 Verlauf der Temperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit bei einer Trocknungstemperatur von 40 °C und einem Luftmassenstrom von 1.000 m ³ /h	52
Abbildung 3-3 Verlauf der Wasseraufnahme der Luft bei einer Trocknungstemperatur von 20 °C und einem Luftmassenstrom von 500m ³ /h	53
Abbildung 3-4 Verlauf der Wasseraufnahme der Luft bei einer Trocknungstemperatur von 40 °C und einem Luftmassenstrom von 1.000 m ³ /h	54
Abbildung 3-5 Verlauf der mittleren relativen Luftfeuchtigkeit und des Hackgutwassergehaltes bei einer Trocknungstemperatur von 20 °C und einem Luftmassenstrom von 500 m ³ /h	56
Abbildung 3-6 Verlauf der mittleren relativen Luftfeuchtigkeit und des Hackgutwassergehaltes bei einer Trocknungstemperatur von 40 °C und einem Luftmassenstrom von 1.000 m ³ /h	56
Abbildung 3-7 Charakteristischer Verlauf des Wirkungsgrades bei einer Trocknung mit 20 °C Trocknungslufttemperatur und 500 m ³ /h Luftmassenstrom	57
Abbildung 3-8 Charakteristischer Verlauf des Wirkungsgrades bei der Trocknung mit 40 °C Trocknungslufttemperatur und 1.000 m ³ /h Luftmassenstrom	58
Abbildung 3-9 Verteilung des Wassergehalts in den einzelnen Schichten bei einem Gesamtwassergehalt von 21 %	59
Abbildung 3-10 Trocknungsdauer unterschiedlicher Versuche mit Material 1	61
Abbildung 3-11 Sektorale Trocknungsdauer in % der Gesamttrocknungsdauer von Material 1	61
Abbildung 3-12 Trocknungsvermögen der Versuchsserien von Material 1	63
Abbildung 3-13 Eingebraachte Energiemenge und Wirkungsgrade der Versuchsserien von Material 1	64
Abbildung 3-14 Eingebraachte Wärmemenge je kg Wasseraustrag der Versuchsserien von Material 1	65
Abbildung 3-15 Trocknungsdauer unterschiedlicher Versuche mit Material 2	66
Abbildung 3-16 Sektorale Trocknungsdauer in % der Gesamttrocknungsdauer von Material 2	67
Abbildung 3-17 Trocknungsvermögen der Versuchsserien von Material 2	68
Abbildung 3-18 Eingebraachte Energiemenge und Wirkungsgrade der Versuchsserien von Material 2	69
Abbildung 3-19 Eingebraachte Wärmemenge je kg Wasseraustrag der Versuchsserien von Material 2	70
Abbildung 3-20 Trocknungsdauer unterschiedlicher Versuche mit Material 3	71
Abbildung 3-21 Sektorale Trocknungsdauer in % der Gesamttrocknungsdauer von Material 3	72
Abbildung 3-22 Trocknungsvermögen der Versuchsserien von Material 3	73
Abbildung 3-23 Eingebraachte Energiemenge und Wirkungsgrade der Versuchsserien von Material 3	74

Abbildung 3-24 Eingebraachte Wärmemenge je kg Wasseraustrag der Versuchsserien von Material 3	75
Abbildung 3-25 Darstellung der unterschiedlichen Trocknungszeiträume in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur	80
Abbildung 3-26 Darstellung der Trocknungszeiträume bei Luftmassenströmen zwischen 8 und 10 m ³ /h/kg_TS in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur	80
Abbildung 3-27 Darstellung der Trocknungszeiträume bei Luftmassenströmen zwischen 12 und 14 m ³ /h/kg_TS in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur	81
Abbildung 3-28 Darstellung der Trocknungszeiträume in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom	82
Abbildung 3-29 Darstellung der Trocknungszeiträume bei einer Trocknungslufttemperatur von 20 °C in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom	82
Abbildung 3-30 Darstellung der Trocknungszeiträume bei einer Trocknungslufttemperatur von 40 °C in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom	83
Abbildung 3-31 Darstellung der Trocknungszeiträume in Abhängigkeit von der Trocknungsluftfeuchte	84
Abbildung 3-32 Darstellung der Trocknungszeiträume bei 20 °C Trocknungslufttemperatur in Abhängigkeit von der Trocknungsluftfeuchte	84
Abbildung 3-33 Darstellung der Trocknungszeiträume bei 20 °C Trocknungslufttemperatur und einem Luftmassenstrom zwischen 8 und 10 m ³ /h/kg_TS	85
Abbildung 3-34 Darstellung der Trocknungsdauer bei 40 °C Trocknungslufttemperatur in Abhängigkeit von der Trocknungsluftfeuchte	86
Abbildung 3-35 Darstellung der Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur.....	87
Abbildung 3-36 Darstellung der Wirkungsgrade in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom	87
Abbildung 3-37 Darstellung der Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur	88
Abbildung 3-38 Darstellung der Wirkungsgrade bei 20 °C Trocknungslufttemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur	88
Abbildung 3-39 Darstellung der Wirkungsgrade bei 40 °C Trocknungslufttemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur	89
Abbildung 3-40 Darstellung der Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Außenluftfeuchte	89
Abbildung 3-41 Darstellung der Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Aufwärmspanne	90
Abbildung 3-42 Darstellung der Wirkungsgrade für 20 °C Trocknungslufttemperatur in Abhängigkeit von der Aufwärmspanne.....	91
Abbildung 3-43 Darstellung der Wirkungsgrade für 40 °C Trocknungslufttemperatur in Abhängigkeit von der Aufwärmspanne.....	91
Abbildung 3-44 Temperaturanstieg in den obersten zwei Sensorreihen der Labormessungen	94
Abbildung 4-1 Schaltbild Feldmessung	96
Abbildung 4-2 Sensoren Feldmessung	97
Abbildung 4-3 Anordnung der Temperatur- und Feuchtesensoren im Schüttgut	99
Abbildung 4-4 Schüttung Feldmessung.....	99
Abbildung 4-5 Verlauf der Außenluft- sowie der Trocknungslufttemperatur	100
Abbildung 4-6 Verlauf der Temperaturen der Sensoren 2, 3 ,4 (Sensorreihe 1) und 5 (Sensorreihe 2)	101
Abbildung 4-7 Verlauf der Temperaturen der Sensoren 6, 7, 8 (Sensorreihe 3) und 9 (zw. Sensorreihe 3 und 4)	101

Abbildung 4-8 Verlauf der relativen Luftfeuchte der Sensoren 2, 3, 4 (Sensorreihe 1) und 5 (Sensorreihe 2)	102
Abbildung 4-9 Verlauf der relativen Luftfeuchte Sensoren 7, 8 (Sensorreihe 3) und 9 (zw. Sensorreihe 3 und 4)	102
Abbildung 4-10 Trapezförmige Hackgutschüttung	104
Abbildung 4-11 Anordnung der Temperatur- und Feuchtesensoren im Schüttgut	105
Abbildung 4-12 Verlauf der Außenluft- und der Trocknungslufttemperatur	105
Abbildung 4-13 Verlauf der Temperaturen der Sensorreihe 1	106
Abbildung 4-14 Verlauf der Temperaturen der Sensorreihe 2	106
Abbildung 4-15 Verlauf der relativen Luftfeuchte der Sensorreihe 2	107
Abbildung 5-1 Jahreslastgang des betrachteten Heizwerks (1.7.2009 bis 30.6.2010)	112
Abbildung 5-2 Jahresdauerlinie des betrachteten Heizwerks.....	112
Abbildung 5-3 Jahreslastgang des Heizwerks und Fernwärmelieferung an das Netz.....	113
Abbildung 5-4 Jahresverlauf der Kessellast	114

8.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1 Parameter und Verstellbereiche der Trocknungsanlage	16
Tabelle 1-2 Grundlagenversuche der Hackguttrocknung	19
Tabelle 2-1 Bindung von Wasser im Holzkörper	26
Tabelle 2-2 Indirekte Verfahren zur Bestimmung der Gutsfeuchte von Hackgut	35
Tabelle 2-3 Vergleich der Hackgutmanipulation und der Betriebsweise	46
Tabelle 2-4 Vor- und Nachteile der einzelnen Trocknungsanlagen	46
Tabelle 2-5 Vergleich der Investitions- und Betriebskosten	47
Tabelle 3-1 Messungen zur Bestimmung der allgemeinen Trocknungscharakteristik	49
Tabelle 3-2 Trocknungsparameter zur Darstellung der allgemeinen Trocknungscharakteristik	49
Tabelle 3-3 Anfangs- und Endwassergehalt in den einzelnen Schichten	59
Tabelle 3-4 Trocknungsparameter der Trocknungsserie mit Material 1.....	60
Tabelle 3-5 Anteil der Trocknungsabschnitte an der Gesamtdauer der Trocknung von Material 1	62
Tabelle 3-6 Mittlere Trocknungsdauer und mittlerer Luftmassenstrom der Versuchsserien des Materials 1.....	62
Tabelle 3-7 Trocknungsvermögen der Versuchsserien von Material 1	63
Tabelle 3-8 Eingebraachte Energiemengen und Wirkungsgrade der Versuchsserien von Material 1	64
Tabelle 3-9 Trocknungsparameter der Trocknungsserie mit Material 2.....	66
Tabelle 3-10 Anteil der Trocknungsabschnitte an der Gesamtdauer der Trocknung von Material 2	67
Tabelle 3-11 Mittlere Trocknungsdauer und mittlerer Luftmassenstrom der Versuchsserien des Materials 2.....	67
Tabelle 3-12 Trocknungsvermögen der Versuchsserien von Material 2.....	68
Tabelle 3-13 Eingebraachte Energiemengen und Wirkungsgrade der Versuchsserien von Material 2	69
Tabelle 3-14 Trocknungsparameter der Trocknungsserie mit Material 3.....	71
Tabelle 3-15 Anteil der Trocknungsabschnitte an der Gesamtdauer der Trocknung von Material 3	72

Tabelle 3-16 Mittlere Trocknungsdauer und mittlerer Luftmassenstrom der Versuchsserien des Materials 3	72
Tabelle 3-17 Trocknungsvermögen der Versuchsserien von Material 3	73
Tabelle 3-18 Eingebraachte Energiemengen und Wirkungsgrade der Versuchsserien von Material 3	74
Tabelle 3-19 Vergleich normierter Trocknungsversuche bei 20 °C Trocknungslufttemperatur	76
Tabelle 3-20 Außenbedingungen der Versuchsserie mit einer Trocknungslufttemperatur von 20 °C und einem Luftmassenstrom zwischen 7 und 10 m ³ /h/kg	76
Tabelle 3-21 Außenbedingungen der Versuchsserie mit einer Trocknungslufttemperatur von 20 °C und einem Luftmassenstrom zwischen 12 und 14 m ³ /h/kg	77
Tabelle 3-22 Vergleich normierter Trocknungsversuche für 40 °C	77
Tabelle 3-23 Außenbedingungen der Versuchsserie mit einer Trocknungslufttemperatur von 40 °C und einem Luftmassenstrom zwischen 8 und 10 m ³ /h/kg	78
Tabelle 3-24 Außenbedingungen der Versuchsserie mit einer Trocknungslufttemperatur von 40 °C und einem Luftmassenstrom zwischen 11 und 12 m ³ /h/kg	78
Tabelle 3-25 Außenbedingungen der Versuchsserie mit einer Trocknungslufttemperatur von 40 °C und einem Luftmassenstrom zwischen 14 und 15 m ³ /h/kg	78
Tabelle 3-26 Ausgewählte Parameter im Zusammenhang mit der Knickpunktmethode	94
Tabelle 4-1 Parameter Feldmessungen	98
Tabelle 4-2 Detailergebnisse der Feldmessung 1	98
Tabelle 4-3 Energieeinsatz der Feldmessung 1	103
Tabelle 4-4 Wassergehaltsmessungen an ausgewählten Bereichen der Feldmessung 1	103
Tabelle 4-5 Detailergebnisse der Feldmessung 9	104
Tabelle 4-6 Energieeinsatz der Feldmessung 9	107
Tabelle 4-7 Wassergehaltsmessungen an ausgewählten Bereichen der Feldmessung 9	108
Tabelle 5-1 Investitionskosten für unterschiedliche Solarthermiekollektorgößen	110
Tabelle 5-2 Hackguttrocknungsmengen für unterschiedliche Wirkungsgrade bei Vermeidung des Gluterhaltungsbetriebes	114

8.4 Formelverzeichnis

Formel 2.1 Thermischer Wirkungsgrad der Trocknung	34
---	----