

Technische Universität München
Lehrstuhl für Thermische Kraftanlagen
mit Heizkraftwerk

Nutzung von Abwärme aus einem Dampf-Heizkraftwerk
zur energieoptimierten Trocknung von Grüngut

Florian J. Straub

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hein
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roland Meyer-Pittroff

Die Dissertation wurde am 16.02.2002 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 22.04.2002 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand aus einer Zusammenarbeit des Lehrstuhls Thermische Kraftanlagen mit Heizkraftwerk der Technischen Universität München und dem Ingenieurbüro *h s energieanlagen*, Freising.

Sehr herzlich danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hein für seine stets wohlwollende Unterstützung und Förderung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.- Roland Meyer-Pittroff danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates und Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer für den Vorsitz.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hein und Herrn Dr.-Ing. Thomas Steer für die vielen Hinweise zum Verständnis der thermodynamischen Vorgänge bei der Trocknung und die intensive fachliche Auseinandersetzung und Beschäftigung mit Kraftwerken als Wärmelieferanten für Prozess- und Heizwärme. Ebenso sei allen Mitarbeitern des Institutes für Thermische Kraftanlagen und meinen Kollegen für ihre Unterstützung und fachliche Diskussion gedankt.

Dem Institut für Landtechnik der Technischen Universität München und seinen Mitarbeitern danke ich für die Unterstützung bei der Inbetriebnahme eines Hordentrockners und bei der Durchführung von Trocknungsversuchen.

Im besonderen sei Herrn Landwirtschaftsdirektor J. Mayer von der Landesanstalt für Tierzucht in Grub für seine wertvollen Hinweise bezüglich der Problematik der Grüngutttrocknung und seine persönliche Unterstützung bei den Messungen an der Trocknungsanlage in Altenstadt sowie für die großzügige Bereitstellung von zahlreichen Messinstrumenten gedankt.

Mein Dank gilt auch den Trocknungsgenossenschaften in Bayern, an deren Anlagen umfangreiche Messungen zum Verständnis des Verfahrensablaufs zur Trocknung von Grüngut durchgeführt werden konnten. Stellvertretend seien hier die Grünfütterttrocknungen Altenstadt, Wolfratshausen-West, Kiefersfelden, Kempten und Mindelheim erwähnt.

Besonders bedanken möchte ich mich für die Unterstützung durch meine Frau Tania, meine Familie und Freunde.

München, Januar 2002

Florian J. Straub

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung..... | 10 |
| 1.1 | Idee und Motivation..... | 10 |
| 1.2 | Zielsetzung der Arbeit | 11 |
| 2 | Heizkraftwerke als Wärmeerzeuger und Trocknungswerke für Grüngut als Wärmeverbraucher / Stand des Wissens..... | 15 |
| 2.1 | Wärmebereitstellung aus einem Dampfkraftprozess..... | 15 |
| 2.1.1 | Strom- und Wärmeerzeugung / Kraft-Wärme-Kopplung..... | 15 |
| 2.1.2 | Abwärmenutzung zur Trocknung / Schaltungsvarianten..... | 16 |
| 2.1.3 | Direkte Befeuerung..... | 18 |
| 2.1.4 | Dampferzeuger | 19 |
| 2.1.5 | Dampferzeuger mit Gegendruckdampfturbine | 20 |
| 2.1.6 | Dampferzeugung mit Entnahme-Kondensationsturbine | 21 |
| 2.2 | Wärmebedarf von Trocknungsanlagen für Grüngut..... | 23 |
| 2.2.1 | Allgemeines zur Trocknung | 23 |
| 2.2.2 | Grünguttrocknung in der Landwirtschaft | 24 |
| 2.2.3 | Kenndaten für Trocknungsanlagen..... | 25 |
| 2.2.4 | Grünguttrocknung mit dem Heißlufttrocknungsverfahren | 26 |
| 2.2.5 | Auslastung und Betriebszeit von Trocknungsanlagen..... | 28 |
| 2.2.6 | Wärme- und Strombedarf der Heißlufttrocknung..... | 29 |
| 2.2.7 | Jahresdauerlinien | 30 |
| 2.2.8 | Bewertung des Energiebezugs..... | 31 |
| 2.2.9 | Kosten der Heißlufttrocknung von Grüngut..... | 32 |
| 2.2.10 | Emissionen bei der Heißlufttrocknung | 34 |
| 3 | Trocknung von Grüngut..... | 36 |
| 3.1 | Definitionen zum Trocknungsgut..... | 36 |
| 3.1.1 | Feuchtegrad, Feuchte..... | 36 |
| 3.1.2 | Wassergehalt..... | 36 |
| 3.1.3 | Trockensubstanz | 37 |
| 3.1.4 | Wasserentzug..... | 37 |
| 3.1.5 | Aktivität des Trocknungsgutes | 38 |
| 3.1.6 | Trocknungszeit | 39 |
| 3.1.7 | Wasserverdampfungsrate..... | 39 |
| 3.2 | Eigenschaften von Grüngut | 40 |
| 3.2.1 | Zusammensetzung und Aufbau | 40 |
| 3.2.2 | Dichte, Schüttdichte und Feuchte..... | 40 |
| 3.2.3 | Wassergehalt und Gleichgewichtsfeuchte | 41 |
| 3.2.4 | Trocknungszeiten von Grüngut | 42 |
| 3.3 | Trocknung hygroskopischer Stoffe | 43 |
| 3.3.1 | Bindung der Feuchte im Trocknungsgut / Bindungsenergie | 43 |
| 3.3.2 | Nicht-hygroskopische Stoffe | 43 |
| 3.3.3 | Bindungsmechanismen / Bindungskräfte hygroskopischer Stoffe | 44 |
| 3.3.4 | Sorptionsverhalten | 46 |
| 3.3.5 | Sorptionsisothermen verschiedener Biomassen | 47 |
| 3.3.6 | Sorptionsisothermen für Grüngut | 48 |
| 3.3.7 | Bindungs-, Verdampfungs- und Sorptionsenthalpie..... | 49 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3.8 | Trocknungsverlauf / Trocknungsgeschwindigkeit..... | 50 |
| 3.3.9 | Kühlgrenztemperatur | 52 |
| 3.3.10 | Obere Produkttemperatur..... | 53 |
| 4 | Thermodynamische Grundlagen der Trocknungstechnik..... | 55 |
| 4.1 | Definitionen zum Trocknungsmedium | 55 |
| 4.1.1 | Dichte und Partialdruck | 55 |
| 4.1.2 | Relative Luftfeuchte des Trocknungsgases | 56 |
| 4.1.3 | Absolute Feuchte des Trocknungsgases | 56 |
| 4.1.4 | Gasmischung..... | 57 |
| 4.1.5 | Dichte des Gasgemisches..... | 58 |
| 4.1.6 | Spezifische Wärmekapazität des Gasgemisches..... | 58 |
| 4.1.7 | Viskosität des Gasgemisches | 60 |
| 4.2 | Bilanzen für den konvektiven Trockner | 61 |
| 4.2.1 | Bilanzgleichung Trocknungsmedium | 64 |
| 4.2.2 | Bilanzgleichung verdampftes Wasser..... | 66 |
| 4.2.3 | Bilanzgleichung Trocknungsgut..... | 67 |
| 4.2.4 | Wasseraufnahme und Wasserbeladung..... | 67 |
| 4.2.5 | Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs | 69 |
| 4.2.6 | Berechnung des Nutzungsgrades | 71 |
| 4.2.7 | Berechnung der Wasserverdampfungsleistung..... | 74 |
| 4.2.8 | Druckabfall im Trocknungssystem, Gebläseleistung..... | 75 |
| 5 | Messungen an einem Horden- / Satzrockner | 76 |
| 5.1 | Beschreibung der Versuchsanlage | 76 |
| 5.1.1 | Kontinuierliche Erfassung des Trocknungsverlaufs | 77 |
| 5.1.2 | Messtechnik | 78 |
| 5.2 | Durchgeführte Versuche | 82 |
| 5.3 | Auswertung der Versuche..... | 83 |
| 5.3.1 | Trocknungszeit / Ausgangs- und Endfeuchte | 83 |
| 5.3.2 | Ideale Trocknungszeit und Umsetzungsgrad | 84 |
| 5.4 | Ergebnisse aus den Trocknungsversuchen | 87 |
| 5.4.1 | Druckabfall über der Schüttung..... | 87 |
| 5.4.2 | Strömungsgeschwindigkeit, Eintrittstemperatur und Trocknungszeit | 88 |
| 5.4.3 | Umsetzungsgrad | 90 |
| 5.4.4 | Langware / Kurzware..... | 91 |
| 5.4.5 | Aufbereitung des Trocknungsgutes | 91 |
| 5.4.6 | Weitere Einflüsse auf den Trocknungsverlauf..... | 93 |
| 6 | Energieoptimierte Niedertemperaturtrocknung..... | 94 |
| 6.1 | Auswahl des Niedertemperatur - Trocknungssystems | 94 |
| 6.1.1 | Auswahlkriterien..... | 94 |
| 6.1.2 | Trocknungssysteme mit niedriger Verdampfungsleistung | 95 |
| 6.1.3 | Trocknungssysteme mit hoher Verdampfungsleistung..... | 96 |
| 6.1.4 | Sonderarten von Trocknungssystemen | 97 |
| 6.2 | Energieoptimierung beim Niedertemperaturtrockner..... | 98 |
| 6.2.1 | Niedertemperaturtrockner im Durchluftbetrieb | 98 |
| 6.2.2 | Niedertemperaturtrockner im Umluftbetrieb | 100 |
| 6.2.3 | Energieoptimierter Bandrockner für Niedertemperatur..... | 104 |
| 6.2.4 | Sensibilitätsbetrachtungen zur optimalen Umlaufzahl | 105 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 6.3 | Messungen an einem Bandtrockner | 109 |
| 6.3.1 | Beschreibung des Versuchsbandtrockners | 109 |
| 6.3.2 | Beschreibung der Messtechnik | 111 |
| 6.3.3 | Versuchsdurchführung | 112 |
| 6.3.4 | Ergebnisse | 114 |
| 6.4 | Auslegung eines Bandtrockners | 118 |
| 6.4.1 | Verweildauer des Trocknungsproduktes im Bandtrockner | 118 |
| 6.4.2 | Trocknerlänge | 118 |
| 6.4.3 | Flächenbezogene Wasserverdampfung im Bandtrockner | 119 |
| 6.4.4 | Schütthöhe und Bandgeschwindigkeit | 121 |
| 6.4.5 | Sättigung der Abluft / Produktumwurf | 123 |
| 6.4.6 | Strömungsführung im Trocknungssystem | 126 |
| 7 | Bandtrockner für Grüngut / Maße und Kosten | 128 |
| 7.1 | Dimensionen einer Bandtrocknungsanlage | 128 |
| 7.2 | Aufbau und Funktion | 130 |
| 7.3 | Herstellungskosten | 135 |
| 7.4 | Betriebskosten | 136 |
| 7.5 | Wirtschaftliche Gesamtbewertung | 138 |
| 7.6 | Gegenüberstellung wichtiger Kennzahlen | 140 |
| 8 | Verbund von Heizkraftwerk und Niedertemperaturtrockner | 141 |
| 8.1 | Technische Gestaltung des Verbundsystems | 141 |
| 8.2 | Energienutzung | 142 |
| 8.3 | Spezifische Kohlendioxidemissionen | 144 |
| 8.4 | Wärmegestehungskosten für Dampf | 145 |
| 8.5 | Wärmekosten in Abhängigkeit vom Dampfantnahmedruck | 148 |
| 8.6 | Verbundsystem Heizkraftwerk - Niedertemperaturtrockner | 150 |
| 9 | Zusammenfassung und Ausblick | 151 |
| 10 | Literaturverzeichnis | 154 |
| 11 | Anhang | 157 |
| 11.1 | Stoffwerte einiger Brennstoffe und Luft | 157 |
| 11.2 | Berechnungsbeispiele zu Trocknungsanlagen | 159 |
| 11.3 | Zuordnungsübersicht Produkt / Trockner | 160 |
| 11.4 | Versuchsergebnisse Hordentrockner | 162 |
| 11.5 | Versuchsbandtrockner | 173 |
| 11.5.1 | Heißgaserzeuger | 173 |
| 11.5.2 | Emissionsmessung | 174 |

Nomenklatur

| | | |
|------------|---|----------------------------|
| A | Fläche | $[m^2]$ |
| a | Aktivität | $[-]$ |
| c_p | spezifische Wärmekapazität, gewichtsbezogen | $[\frac{kJ}{kg \cdot K}]$ |
| C | spezifische Wärmekapazität, volumenbezogen | $[\frac{kJ}{m^3 \cdot K}]$ |
| C_W | Strömungswiderstandsbeiwert | $[-]$ |
| E | Energie | $[kJ]$ |
| e_{el} | spezifische elektrische Leistung | $[\frac{Wh}{kg}]$ |
| H, B, L | Höhe, Breite, Länge | $[m]$ |
| h | Enthalpie | $[\frac{kJ}{kg}]$ |
| Δh | Verdampfungsenthalpie | $[\frac{kJ}{kg}]$ |
| m | Masse | $[kg]$ |
| \dot{m} | Massenstrom | $[\frac{kg}{s}]$ |
| M | molare Masse | $[\frac{kg}{mol}]$ |
| p | Druck | $[bar]$ |
| p'_D | Sättigungsdampfdruck | $[mbar]$ |
| p_D | Wasserdampfpartialdruck | $[mbar]$ |
| P | elektrische Leistung | $[kW]$ |
| Q | Wärmemenge | $[kJ]$ |
| \dot{Q} | Wärmeleistung | $[W]$ |
| q | spezifische Wärmemenge | $[\frac{kJ}{kg}]$ |
| \dot{q} | Wärmestrom (spezifisch) | $[\frac{W}{kg}]$ |
| R | spezielle Gaskonstante | $[\frac{J}{kg \cdot K}]$ |
| T | Temperatur | $[^\circ C]$ |
| t | Zeit | $[sec], [min]$ |
| τ | ideale Trocknungszeit | $[sec]$ |
| TS | Trockensubstanz | $[\frac{kg}{kg}; \%]$ |
| U | Wassergehalt des Gutes | $[\frac{kg}{kg}; \% - WG]$ |
| \dot{V} | Volumenstrom | $[\frac{m^3}{sec}]$ |
| v | Strömungsgeschwindigkeit | $[\frac{m}{sec}]$ |
| w | Bandgeschwindigkeit | $[\frac{m}{min}]$ |
| X | Feuchte des Gutes | $[\frac{kg}{kg}; \% - FG]$ |
| x | Feuchtigkeitsbeladung des trockenen Gases | $[\frac{g}{kgtr.G.}]$ |
| α | Wärmeübergangskoeffizient | $[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$ |
| β | Stoffübergangskoeffizient | $[\frac{m}{s}]$ |
| λ | Wärmeleitkoeffizient | $[\frac{W}{m \cdot K}]$ |

| | | |
|----------------|--|---------------------------|
| η | dynamische Viskosität | $[\frac{N \cdot s}{m^2}]$ |
| $\eta_{S,T,G}$ | System-, Trocknungs-, Gesamtnutzungsgrad | $[-; \%]$ |
| ε | Wirkungsgrad | $[-; \%]$ |
| Φ | Umsetzungsgrad | $[-; \%]$ |
| ρ | Dichte | $[\frac{kg}{m^3}]$ |
| σ | Stromkennzahl | $[-]$ |
| ν | kinematische Viskosität | $[\frac{m^2}{s}]$ |
| φ | relative Feuchte | $[\%]$ |

Indizes

| | | | |
|------------------|--|------|------------------|
| FG | Feuchtgut (feuchtes Trocknungsgut) | | |
| TS | Trockensubstanz (absolut trocken) | | |
| TG | Trockengut (getrocknetes Material mit Restfeuchte) | | |
| Gut | Trocknungsgut (zu trocknendes Material) | | |
| Gas | Trocknungsgas, Gasmischung | | |
| tr.L | trockene Luft | tr.G | trockenes Gas |
| H ₂ O | Wasser | W | Wasser (flüssig) |
| D | Wasserdampf | K | Kondensat |
| el | elektrisch | th | thermisch |
| Verd | Verdampfung, verdampft | | |
| Br | Brennstoff | | |
| ein, zu | Zustand vor dem Prozess, zugeführte Menge (Masse, Energie, ...) | | |
| aus, ab | Zustand nach dem Prozess, abgeführte Menge (Masse, Energie, ...) | | |
| max | maximal | | |
| min | minimal | | |
| Δ | Delta, Differenz | | |
| - | Mittelwert, Integralwert | | |
| ~ | Näherungswert, Gemischwert | | |

Konstanten und Normzustand

| | |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| $\bar{g} = 9,81 \frac{m}{s^2}$ | Fallbeschleunigung auf der Erde |
| $R_m = 8,314 \frac{J}{mol \cdot K}$ | allgemeine Gaskonstante |
| $p_{Norm} = 1013,25 \text{ hPa}$ | Normzustand Druck |
| $T_{Norm} = 273,15 \text{ K}$ | Normzustand Temperatur |

1 Einleitung

1.1 Idee und Motivation

Thermische Trocknungsverfahren für stark wasserhaltige Produkte benötigen zur Verdampfung der Feuchtigkeit erhebliche Mengen an Wärme. Die Wärme muss dabei auf einem Temperaturniveau vorliegen, das eine Überführung der Energie an die zu verdampfende Flüssigkeit zulässt. Zudem wird mechanische Energie für die Durchströmung des Trocknungsproduktes und dem dabei stattfindenden Stoffaustausch mit dem Trocknungsmedium benötigt. Der Wärmebedarf und die Strömungsenergie sind maßgebliche Betriebskosten einer Trocknungsanlage.

Bei der thermischen Trocknung von Grüngut und anderen Futtermitteln wird die Überführung des Wassers im Ausgangsprodukt von der flüssigen in die gasförmige Phase als alleiniger Nutzen bewirkt. Daher ist es sinnvoll, für diesen einfachen, aber energieintensiven Verfahrensschritt möglichst niederwertige Energie einzusetzen.

Solche Energie mit niedriger Temperatur in Form von „Rest-“ Wärme steht beim Dampfkraftprozess in großen Mengen zur Verfügung. Es soll daher ein Heizkraftwerk mit einem Trocknungsprozess kombiniert werden, so dass der Brennstoffnutzungsgrad gesteigert und durch die zusätzliche Wärmeabgabe eine höhere Anlagenauslastung des Kraftwerks erreicht wird.

Da Trocknungssysteme für Grüngut auf Basis von Niedertemperatur bisher nicht verwirklicht worden sind, wird ein optimiertes Trocknungssystem entwickelt, bei dem der Trocknungsprozess mit „Rest-“ Wärme erfolgt. Für das gefundene System soll dann eine Abschätzung zeigen, bei welchen Kosten und Erlösen eine Kombination von Trocknungsanlage und Kraftwerk wirtschaftlich sinnvoll ist.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Futtermittel, wie Wiesengräser oder Leguminosen, im Folgenden Grüngut genannt, weisen bei der Ernte typischerweise einen hohen, meist über 60 % liegenden Wassergehalt auf. Daher ist bei vielen landwirtschaftlichen Produkten zu Beginn der technischen Verarbeitung die Trocknung der erste Verfahrensschritt, um eine konservierende Lagerung zu erreichen und eine anschließende Veredelung zu ermöglichen.

In dieser Arbeit wird ausschließlich die thermische Trocknung durch Verdunsten oder Verdampfen von Wasser unter Zuführung von Wärme untersucht. Ein Wasserentzug ohne einen Verlust von wichtigen Pflanzeninhaltsstoffen ist durch mechanische Verfahren wie Pressen, Zentrifugieren, Sieben oder Filtern kaum möglich und hat daher für die hier behandelten Produkte nur eine geringe Bedeutung.

Bei den heute üblichen direkten Trocknungsverfahren für Grüngut ist ein hoher Primärenergiebedarf erforderlich. Eine Wärmerückgewinnung aus der Abluft ist bei den dabei eingesetzten einfachen Trommeltrocknern nicht oder nur mit einem erheblichen Aufwand und auch nur zu einem kleinen Teil möglich /10/. Ein dabei anfallendes Kondensat ist meist belastet und verursacht bei der Entsorgung Kosten. Eine Verringerung des Energieeinsatzes durch Optimierung an den heute üblichen Trocknungsanlagen kann daher nur mit erheblichem zusätzlichem verfahrenstechnischen Aufwand erreicht werden und ist aus ökonomischer Sicht nur bei hohen Primärenergiepreisen und unter optimalen Systembedingungen wirtschaftlich sinnvoll. Bei vielen Trocknungsanlagen für landwirtschaftliche Produkte wird in Deutschland, wie auch in anderen Industrieländern, hochwertige und saubere Primärenergie, vor allem Erdgas, Heizöl, Flüssiggas etc. eingesetzt. In weniger dicht besiedelten und weniger entwickelten Regionen kommen auch unedlere Energieträger wie Schweröl, Kohle und Holz zum Einsatz.

Der Anteil der Kosten für die eingesetzte Energie macht zwischen 40-50 % der Betriebskosten einer Trocknungsanlage aus. Diese Energie wird bei der thermischen Trocknung zum überwiegenden Teil dazu gebraucht, um das flüssige Wasser aus dem Ausgangsprodukt zu verdampfen. Die Verdunstung der Flüssigkeit kann thermodynamisch fast auf jedem beliebigen Temperaturniveau geschehen, so dass es aus energetischer Sicht vorteilhaft ist, hierfür möglichst niederwertige Energie einzusetzen. Primärenergie ist so gesehen für den Einsatz in einem einfachen Trocknungsprozess zu wertvoll.

Niedertemperaturwärme steht zum Beispiel bei jedem Dampfkraftprozess in großen Mengen zur Verfügung. Zur Aufrechterhaltung des Druckes am Turbinenende muss dort der Dampf unter Abgabe der Verdampfungswärme wieder kondensiert werden. Die Kondensationswärme, die je nach Turbinentyp, Schaltung und Umgebungsbedingungen bei unterschiedlich hoher Temperatur anfällt, muss, wenn kein entsprechender Wärmeabnehmer vorhanden ist, über ein Rückkühlwerk ohne weiteren Nutzen an die Umgebung abgegeben werden. Ziel dieser Arbeit ist es, die Möglichkeit der Wärmebereitstellung aus einem Dampfkraftwerk für eine Trocknungsanlage zu untersuchen, bei der die aus dem Dampfprozess vorhandene „Rest-“Wärme effektiv in einem Trocknungsprozess eingesetzt werden soll.

Für die Auswahl eines Trocknungssystems ist es notwendig, das Trocknungsmaterial festzulegen. Da sich Grüngut aus einer Mischung von verschiedensten Pflanzen zusammensetzt, können aufgrund der Vielfalt und Inhomogenität des Materials die Eigenschaften nur mit großer Spannweite angegeben werden. Entsprechend stark schwankt die benötigte Trocknungszeit. Zur Auslegung des Trocknungssystems wurde daher für diese Arbeit ein Mono-Grüngut aus nur einer Pflanzenart gewählt. Dieses Material in Form von gehäckseltem Gras, hat eine enge Bandbreite in der Zusammensetzung, Geometrie, Materialdichte, Schüttdichte und Ausgangsfeuchte und wird als Referenzprodukt in dieser Arbeit verwendet.

Aus den in der Trocknungstechnik gängigen Trocknersystemen wurde das Prinzip der Bandtrocknung als das aussichtsreichste Niedertemperatursystem für das Produkt Grüngut ausgewählt. Zur Festlegung der Ausführung des Bandtrocknersystems werden im Folgenden die speziellen Anforderungen für die Trocknung des Produktes Grüngut bei Niedertemperatur untersucht.

Die thermodynamischen Vorgänge während der Trocknung bestimmen die Trocknungszeit und Höhe des Energiebedarfs. Die Grundlagen hierfür werden wegen der Wichtigkeit für die Auslegung des Trocknungssystems in Kapitel 4 dargestellt, sind aber auch aus anderen hierzu erschienenen Veröffentlichungen hinreichend bekannt /4/, /31/. Die Trocknung selbst ist ein komplizierter Wärme- und Stofftransportprozess mit einer Vielzahl von gekoppelten Parametern /30/. Auch sind sämtliche für die Trocknung bedeutsamen Stoffwerte sowohl von der Temperatur des Trocknungsmediums als auch von der Feuchte des Trocknungsgutes abhängig /18/. Für den in dieser Arbeit interessanten Niedertemperaturbereich zwischen 50–180 °C sind Daten zur Dynamik der Trocknung von Grüngut aus der Literatur nicht bekannt.

Diese Werte wurden in eigenen Versuchen ermittelt.

- Trocknungsverlaufskurven konnten an einem Hordentrockner gemessen werden. Für diese diskontinuierlichen Trocknungsversuche wurde am Institut für Landtechnik Weihenstephan ein Satzrockner mit einer Heizleistung bis zu 25 kW_{el} in Betrieb genommen. Als sehr homogenes Trocknungsgut stand u.a. Welsches Weidelgras aus einer Reinsaat am Versuchsgut Dürenast bei Freising zu Verfügung. Unter Variation der Parameter von Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit wurden Trocknungsverläufe aufgenommen und der Strömungswiderstand der Schüttung ermittelt. Aus den kontinuierlich erfassten Messwerten können Trocknungszeiten, Abluftsättigung und Umsetzungsgrad berechnet werden.
- In weiteren Versuchen mit einem kontinuierlich durchströmten Bandrockner konnten die in den Satzrocknungsversuchen ermittelten Werte unter stationären Versuchsbedingungen überprüft werden. Diese Versuche wurden an der Futtertrocknung Altenstadt mit Grüngut aus dem laufenden Produktionsprozess durchgeführt. Dabei konnten auch die Auswirkungen auf die Endfeuchte bei Schwankungen der Produktbeschaffenheit und beim Einsatz verschiedener Grüngutarten untersucht werden. Weiter wurden wertvolle Erkenntnisse zur Luftführung, zur Verschmutzung und zum verfahrenstechnischen Ablauf von der Produktaufgabe und -verteilung bis zum Produktaustrag aus den Versuchen gewonnen.

Mit den Versuchsergebnissen wurde für das Trocknungssystem Bandrockner eine Optimierung in Abhängigkeit von Eintrittstemperatur, Abgassättigung, Strömungswiderstand und Kostenfaktor Wärme/Strom durchgeführt. Dabei wurde die Umluftzahl für den optimalen Betriebszustand bestimmt, bei dem der Energieverbrauch minimal wird und das gefundene System als energieoptimierter Niedertemperaturtrockner bezeichnet werden kann. Die Energiekosten können für dieses Trocknungssystem sehr genau abgeschätzt werden.

Für eine Anlagenleistung von 15 t Wasserverdampfung in der Stunde wurden aus den Versuchen und Berechnungen die Dimensionen eines Bandrockners ermittelt. Über die Material- und Fertigungskosten sowie mit Herstellerangaben zu einzelnen Komponenten (Ventilator, Motoren, usw.), konnten die Kosten für den Bau eines Bandrockners abgeschätzt werden.

Für die Wärmeversorgung einer Trocknungsanlage aus einem Dampfkraftwerk bilden Kraftwerk und Trockner einen Verbund, wobei beide Anlagen weiterhin als eigene Betriebsstätten geführt werden, so dass klare Schnittstellen zur Kostenabgrenzung vorhanden sind. Für den Trocknungsbetrieb sind die Betriebskosten aufgrund der vom Abnahmezeitraum unabhängigen Verträge für Strom- und Wärmelieferung relativ klar und einfach festzustellen und ein Vergleich mit reinen Trocknungswerken ist möglich. Das Kraftwerk hingegen unterliegt auf der Abgabenseite meist einem komplizierten Vertragswerk, das

auch den Zeitraum und die Zuverlässigkeit für die Stromeinspeisung genau zu berücksichtigen hat. Eine Aussage, wie hoch Wärmeerlöse sein müssen, um eine verringerte Stromproduktion durch Wärmeauskopplung auszugleichen, ist daher ohne konkretes Vertragswerk nicht möglich und sinnvoll. Möglich ist allerdings eine Abschätzung der Grenzkosten für die Wärmeherzeugung. Diese Grenzkosten stellen das Limit dar, zu denen eine Wärmeabgabe noch kostendeckend möglich ist.

Beim Verbund eines Kraftwerkes und einer Trocknungsanlage muss der Wärmepreis einerseits die Wärmegestehungskosten decken, andererseits mit marktnahen Preisen von gleichartigen Produkten wie z.B. Primärenergie konkurrieren können. Gegenüber der getrennten Betriebsführung sollte der Zusammenschluss beider Produktionsanlagen zu Synergieeffekten führen, um den wirtschaftlichen Fortbestand beider Einheiten sichern zu können.

Darüber hinaus bekommen zunehmend ökologische Aspekte größere Bedeutung. Bei Trocknungsprozessen von Grüngut müssen die meist als negative Begleiterscheinungen auftretenden Aromastoffe, der organischen Schadstoffe und die Staubemissionen in die Bewertung mit einbezogen werden, während der Brennstoffnutzungsgrad sowie die Kohlendioxidemissionen vor allem bei Kraftwerken berücksichtigt werden müssen. Es ist abzusehen, dass zukünftig neben den technischen und ökonomischen Anforderungen immer häufiger auch diese Qualitätsparameter bei System- und Investitionsentscheidungen beachtet werden müssen.

2 Heizkraftwerke als Wärmeerzeuger und Trocknungswerke für Grüngut als Wärmeverbraucher / Stand des Wissens

Die Auskopplung von Heiz- und Prozesswärme aus einem Kraftwerk ist üblich und kann über mehrere Anlagenschaltungen erfolgen. Schaltungsvarianten mit einer gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung haben in Bezug auf die Ausnutzung des Brennstoffs das höchste Potential. Trocknungsanlagen sind unter diesem Gesichtspunkt nur die Abnehmer der Prozesswärme, allerdings mit besonderen Anforderungen. In der Futtermittelproduktion ist die Trocknung von Grüngut sehr energieintensiv und wird heute noch in der Landwirtschaft mit einer direkt-befeuchten Heißlufttrocknungstechnik durchgeführt. Der hohe Energiebedarf über den Jahresgang eines Trocknungswerkes und die Emissionen über das Abgas der Heißlufttrocknung sind dabei oft problematisch.

2.1 Wärmebereitstellung aus einem Dampfkraftprozess

2.1.1 Strom- und Wärmeerzeugung / Kraft-Wärme-Kopplung

Krafterzeugende¹ Maschinen, wie Motoren, Gasturbinen oder Dampfturbinen arbeiten meist mit einer Verbrennung bei hohen Temperaturen und können daher Wärme auf einem Temperaturniveau abgeben, das eine weitere Nutzung dieser Energie als Prozesswärme ermöglicht. Dabei fallen bei einfachen Systemen praktisch immer Kraft und Wärme in einem festen Verhältnis an. Diese gleichzeitige Gewinnung von mechanischer Arbeit und nutzbarer Wärme aus fossilen oder nachwachsenden Energieträgern mittels eines thermodynamischen Prozesses in einer technischen Anlage wird als Kraft-Wärme-Kopplung bezeichnet. Kraft und Wärme werden Koppelprodukte genannt, da sie gleichzeitig in einem Produktionsgang anfallen. /44/

Die mechanische Energie wird heutzutage bei fast allen Anwendungen, wegen der breiten Einsatzmöglichkeit der elektrischen Energie, über einen Generator in elektrischen Strom umgewandelt. Im Folgenden wird daher der Begriff Stromerzeugung gleichbedeutend mit dem allgemeineren Begriff der mechanischen Energieerzeugung verwendet.

Die Erzeugung von elektrischem Strom bietet die Möglichkeit der jederzeitigen Einspeisung der erzeugten Arbeit in ein Stromverbundnetz. Bei einer Netzkopplung entscheiden Lieferverträge zusammen mit der Vergütung für den

¹ Der Begriff „Kraft“ wird anstatt des physikalisch richtigen Begriffes der „mechanischen Arbeit“ in der Fachliteratur in diesem Zusammenhang häufig verwendet, wie z.B. die Terminologie Kraft-Wärme-Kopplung.

Strom über die Höhe der getätigten Stromeinspeisung. Während der erzeugte Strom aus einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage aus technischer Sicht durch Einspeisung praktisch immer genutzt werden kann, ist die Höhe der Wärmeabnahme durch den zeitlichen Bedarf der angeschlossenen Wärmenutzer begrenzt. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen müssen daher sehr oft wärmeorientiert betrieben werden. Eine wärmeorientierte Fahrweise bedeutet Einschränkungen z.B. bei den Betriebsstunden der Anlage, so dass eine Variation zwischen Strom- und Wärmeerzeugung wünschenswert ist. Eine größere Flexibilität lässt sich durch Investitionen in verschiedene Zusatzanlagen wie Rückkühlwerk oder Kondensationsturbine erreichen. Erlangt man dadurch eine weitgehende unabhängige Strom- und Wärmeproduktion, ist ein zusätzlicher Freiheitsgrad gewonnen, der zu einem wirtschaftlicheren Betrieb der Anlage beitragen kann.

Eine zusätzliche Wärmenutzung als Prozess- oder Heizwärme aus einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage erhöht die Anlagenauslastung. Die höhere Volllaststundenzahl senkt die spezifischen kapitalgebundenen Kosten.

Ein weiterer wirtschaftlicher Vorteil der KWK liegt in dem geringeren Brennstoffeinsatz, gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom in einem Kraftwerk und Wärme in einem Heizwerk.

2.1.2 Abwärmenutzung zur Trocknung / Schaltungsvarianten

Für feste Brennstoffe, wie nachwachsende Rohstoffe und stofflich nicht weiterverarbeitbare Biomasse, ist die direkte Verbrennung und anschließende Energienutzung in einem Dampferzeuger die bewährte Technologie. Dabei wird Heißdampf über einen Wasser-Dampfkreislauf erzeugt. Der Brennstoff, die Feuerung und die Art des Dampferzeugers legen den Betriebsdruck und die Frischdampf Temperatur fest. Der Heißdampf wird zur Krafterzeugung meist in einer Dampfturbine entspannt. Die benötigten Prozessdampf-Temperaturen und die zur Verfügung stehende Kühlmöglichkeit bestimmen die Art der verwendeten Dampfturbine und den weiteren Dampf- und Kondensatkreislauf. Dampfkraftwerke eignen sich aufgrund der Eigenschaften des Mediums Dampf besonders gut zur Bereitstellung von Prozesswärme.

Ein Dampfkraftprozess mit Wärmenutzung bietet sich bevorzugt an, wenn

- feste Brennstoffe eingesetzt werden sollen,
- eine Prozesswärme von mittlerer oder niedriger Temperatur benötigt wird, so dass sogenannte „Rest“-Wärme nach der Dampfturbinennutzung eingesetzt werden kann,

- der Heißdampfstrom vor der Turbine möglichst eine Leistung von ca. $10 \text{ MW}_{\text{th}}$ nicht unterschreitet,
- die Wärmeabgabe ungefähr um den Faktor 4 höher wie die erzeugte Strommenge liegt und
- der höchste Wärmebedarf zu Zeiten mit geringem Strombedarf (Sommer) und der höchste Strombedarf zu Zeiten mit geringem Wärmebedarf (Winter) auftreten.

Als Wärmenutzer bietet sich die energieintensive, thermische Trocknung an. Trocknungsanlagen können als direkt befeuerte Systeme ebenso wie als Wärmebezieher aus einem Heizwerk oder Heizkraftwerk vorkommen. Im Folgenden sollen vier grundsätzlich mögliche Schaltungen zur Wärmebereitstellung aus festen Brennstoffen, wie Kohle, Holz oder sonstiger Biomasse, mit

- direkter Befeuerung,
- Dampferzeuger,
- Dampferzeuger mit Gegendruckdampfturbine und
- Dampferzeuger mit Entnahme-Kondensationsturbine

verglichen werden. Eine Strom- und Wärmeerzeugung ist dabei nur mit den zwei letztgenannten Schaltungen möglich.

2.1.3 Direkte Befeuerung

Die einfachste Schaltung stellt eine Verbrennung mit nachgeschalteter direkter Wärmenutzung der heißen Rauchgase in einer Trocknungsanlage (Bild 1) dar. Das Abgas aus der Feuerung, das je nach Anlagensystem Temperaturen von 300 – 1000 °C aufweist, nimmt in der Trocknungsanlage durch den Kontakt mit dem Trocknungsgut Wasser auf und kühlt sich dabei ab.

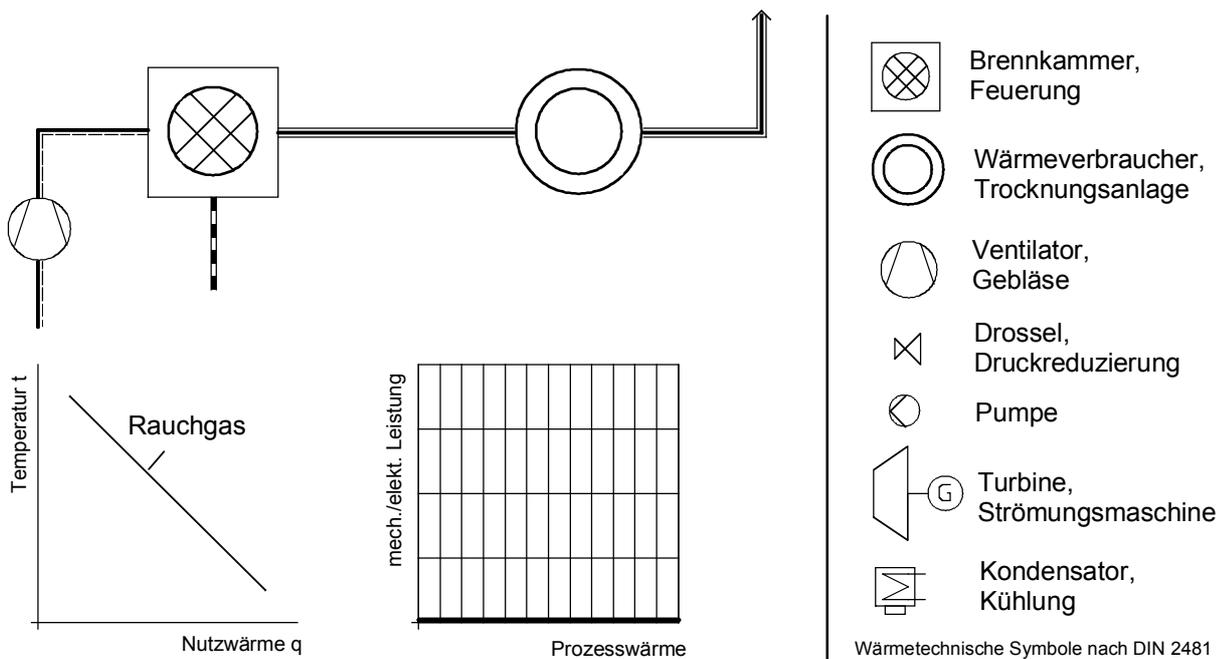


Bild 1 Direkte Wärmenutzung von Rauchgasen in einer Trocknungsanlage

Dieser einfache Aufbau ist für viele Anwendungen geeignet, hat aber den Nachteil, dass das Temperaturniveau der Trocknungswärme sich kontinuierlich mit der Abkühlung der Rauchgase ändert. Für Prozesse, bei denen über längere Zeit eine bestimmte Temperatur beibehalten werden sollte, ist diese Schaltung ungeeignet. Auch sind viele Stoffe auf eine spezielle Trocknungsatmosphäre angewiesen und der direkte Kontakt mit Verbrennungsabgasen, deren vollständige Umsetzung schon aus physikalisch-chemischer Sicht nicht gegeben sein kann, ist zudem nur für wenige Produkte zugelassen.

Eine kombinierte Stromerzeugung wäre bei der direkt-befeuerten Trocknung durch die Vorschaltung einer Gasturbine möglich. Da hier nur Wärmeerzeugungsanlagen mit Festbrennstoffen betrachtet werden sollen, Gasturbinen bisher aber nur für gasförmige oder flüssige Brennstoffe zur technischen Einsetzbarkeit entwickelt wurden, werden Systeme mit Beheizung aus einer Gasturbine nicht behandelt.

Tabelle 1 Wärmeträger mit Einsatztemperaturbereich

| Wärmeträger | Einsatztemperaturbereich | Nutzung |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Hochdruckdampf 20 – 60 bar | 210 – 400 °C | Kondensation bei T_S |
| Dampf 1,5 – 20 bar | 112 – 210 °C | Kondensation bei T_S |
| Niederdruckdampf 0,2 – 1,5 bar | 60 – 112 °C | Kondensation bei T_S |
| Heißwasser (Überdruck) | 90 – 120 °C | Abkühlung $T_1 \rightarrow T_2$ |
| Heißwasser (drucklos) | 40 – 90 °C | Abkühlung $T_1 \rightarrow T_2$ |
| Thermoöl | ~ 300 °C | Abkühlung $T_1 \rightarrow T_2$ |

Die feste obere Trocknungstemperatur macht das System aus Bild 2 praktisch für eine Großzahl von Produkten einsetzbar und die indirekte Beheizung erlaubt die Einstellung einer optimalen Trocknungsatmosphäre. Der Dampferzeuger und die Trocknungsanlage sind über eine Rohrleitung direkt aneinandergeschlossen. Die Feuerung muss dabei, wie auch bei der Schaltung von Bild 1, die Trocknungswärme im benötigten Umfang bereitstellen.

2.1.5 Dampferzeuger mit Gegendruckdampfturbine

Bei der Schaltung in Bild 2 ist noch keine Stromerzeugung realisiert, aber mit der Erzeugung von Dampf wurde eine wesentliche Voraussetzung dafür geschaffen.

Ausgehend von der Schaltung in Bild 2 lässt man zur Stromerzeugung den unter Druck stehenden Dampf in einer Dampfturbine soweit Arbeit verrichten, bis das gewünschte Temperaturniveau für die Trocknungsanlage erreicht ist. Die Kondensation des Dampfes findet, wie in Bild 3 dargestellt, dann im Wärmetauscher der Trocknungsanlage statt. Um im Fall eines Ausfalls der Turbine die Wärmeversorgung auch weiterhin bereitstellen zu können, kann eine Drosselung (Dampfumformung) zur Druckreduzierung und Umfahrung der Dampfturbine vorgesehen werden. Eine Reduzierung von Hochdruckdampf auf Niederdruckdampf ohne Stromproduktion führt zu einem Verlust an Exergie, ist dann aber notwendig, da der zulässige Betriebsdruck in dem Trocknersystem nicht überschritten werden darf.

Eine Einschränkung bei diesem System ist vor allem dahingehend gegeben, dass für die Stromproduktion die Wärmeabnahme der Trocknungsanlage zwingend notwendig ist. Hier liegt eine starre Kopplung der Stromproduktion an die Wärmeabnahme vor. Diese inflexible Kopplung drückt sich anhand der festen Stromkennzahl z.B. $\sigma \approx 0,2$ aus.

Die Stromkennzahl σ ist das Verhältnis der elektrischen Leistung P_{el} zur ausgekoppelten Wärmeleistung \dot{Q}_{th} .

$$\sigma = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{th}} \quad \text{in [-]} \quad (1)$$

Eine feste Stromkennzahl bedeutet, dass Strom und Wärme stets nur im vorgegebenen Verhältnis erzeugt werden können. Bei Systemen nach Bild 3 besteht auch wenig Flexibilität im Betrieb bezüglich einer Verschiebung des Druck- und Temperaturniveaus am Übergabepunkt zwischen Turbine und Wärmeverbraucher. Der bei der Konzeption der Turbine festgelegte Entspannungsverlauf lässt eine Variation der Austrittszustände nur mit Wirkungsgradabfall an der Turbine und nur in einem kleinen Arbeitsbereich zu.

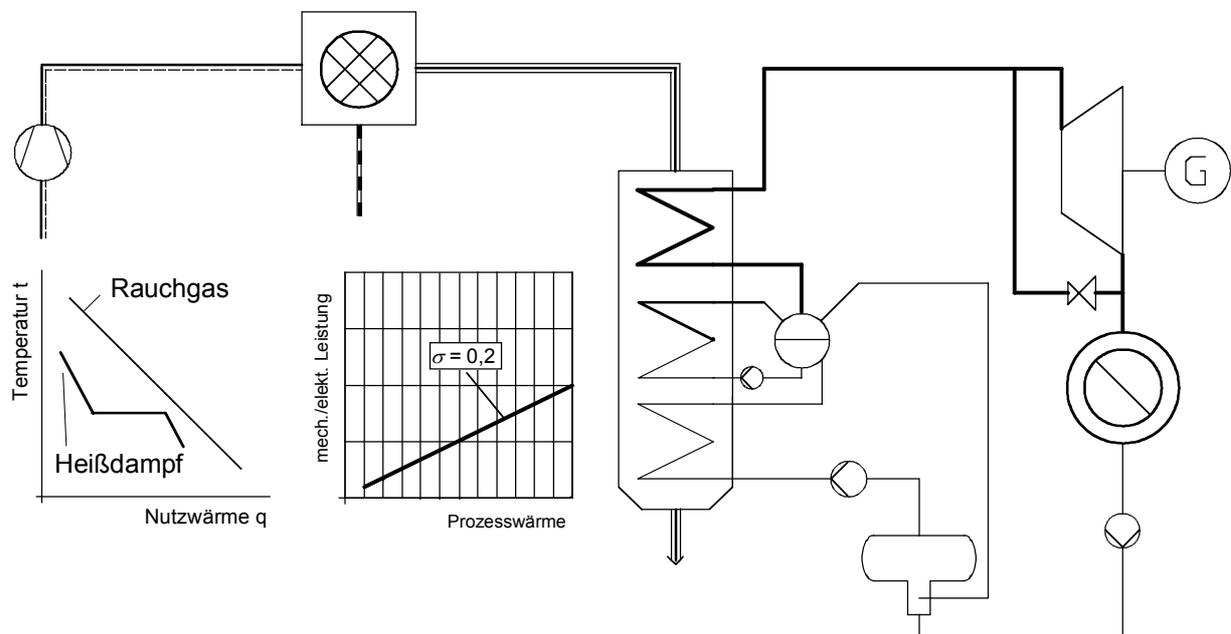


Bild 3 Dampferzeuger mit Gegendruckturbine und gekoppelter Wärmenutzung

2.1.6 Dampferzeugung mit Entnahme-Kondensationsturbine

Wirkliche Flexibilität zwischen Strom- und Wärmeerzeugung erhält man mit der Dampfturbine erst, wenn die Dampfturbine als Entnahme-Kondensationsturbine ausgeführt wird. Hierbei muss, wie in Bild 4 dargestellt, ein zusätzlicher Kondensator vorgesehen werden. Der Kondensator ist an ein Rückkühlsystem gebunden, über das die Niedertemperaturwärme aus dem Wasserdampfkreislauf entnommen und an die Umgebung (Luft oder Kühlwasser) abgegeben wird.

Von der Art und der Güte der Rückkühlung hängt der sich einstellende Kondensationsdruck ab. Je niedriger dieser liegt, desto größer ist die nutzbare Enthalpiedifferenz und damit die Stromausbeute in der Turbine. Da der

Kondensationsdruck meist unter dem Umgebungsluftdruck liegt, ist das Niederdrucksystem im Unterdruck zu betreiben. Der höhere Ertrag bei der Stromerzeugung erfordert daher zusätzliche Investitionskosten für Kondensator, Rückkühlwerk und Niederdruckteil der Turbine.

Tabelle 2 Rückkühlung für Dampfturbinen /45/

| Art der Kühlung | Kondensationsdruck | Kondensationstemperatur |
|----------------------------|--------------------|-------------------------|
| Ventilator – Trockenkühler | ~ 200 mbar | 60 °C |
| Naturzug – Nasskühlturm | ~ 53 mbar | 34 °C |
| Ventilator – Nasskühlturm | ~ 47 mbar | 32 °C |
| Frischwasser – Kühlung | ~ 30 mbar | 24 °C |

Die in Bild 4 dargestellte Kraft-Wärme-Kopplungsanlage erlaubt es, die Erzeugung von Strom und Wärme in einem Bereich von ungefähr $\sigma \approx 0,2 - 0,4$ zu verschieben. Damit kann sehr gut auf eine sich ändernde Wärmeabnahme und sogar auf eine Abschaltung oder Ausfall des Wärmeverbrauchers seitens des Kraftwerks reagiert werden. Das Druckniveau, auf dem der Dampf an der Entnahmestelle der Turbine entnommen wird, lässt sich in einem engen Bereich um den Auslegungsdruck variieren. Damit kann die Kondensationstemperatur für den Heizdampf voreingestellt werden; die exakte Temperatur- und Leistungsregelung muss vor Ort an der Trocknungsanlage über Regelventile erfolgen.

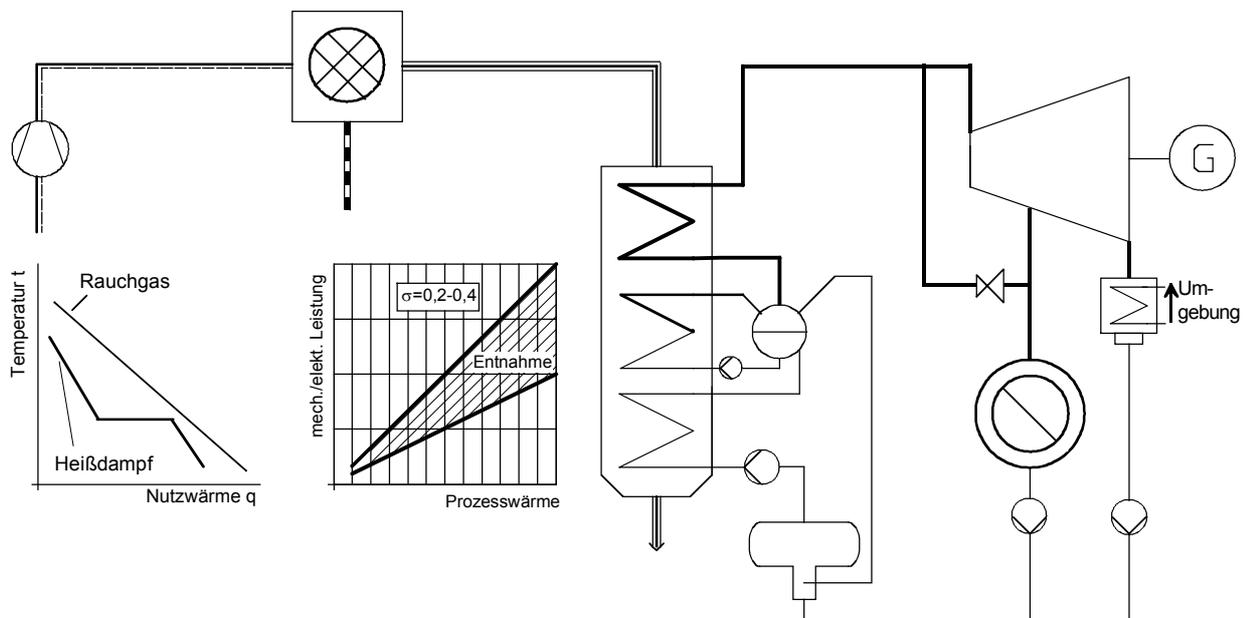


Bild 4 Dampferzeuger mit Entnahme-Kondensationsturbine zur Wärmenutzung in einer Trocknungsanlage

2.2 Wärmebedarf von Trocknungsanlagen für Grüngut

2.2.1 Allgemeines zur Trocknung

Den verfahrenstechnischen Vorgang, bei dem einem Stoff Feuchtigkeit entzogen wird, bezeichnet man als Trocknung. Die technische Trocknung durch Verdunsten oder Verdampfen von Wasser unter Zuführung von Wärme ist für landwirtschaftliche Materialien und deren Weiterverarbeitung als Lebens-/Nahrungsmittel oder auch als Futtermittel ein häufig eingesetzter Produktionsschritt. Um den Vorgang der Trocknung in einer technischen Anlage mit hoher Leistungsdichte durchführen zu können, ist zur Übertragung der benötigten Trocknungsenergie an das zu trocknende Gut ein entsprechend hohes Temperaturniveau der Wärme erforderlich. Andererseits ist die Höhe der Trocknungstemperatur durch die Wärmestabilität des Trocknungsgutes begrenzt.

Bei den meisten verfahrenstechnischen Trocknungsvorgängen, vor allem in der Lebens- und Nahrungsmittelproduktion, haben die Qualitätseigenschaften des trockenen Endproduktes bzw. die Erzeugung bestimmter Produkteigenschaften Vorrang.

Unter Produktqualität und -eigenschaften versteht man dabei unter anderem:

- Änderungen an der Struktur bzw. Konsistenz des Trocknungsmaterials,
- erwünschte Produktveränderung durch den Temperatureinfluss,
- Vermeidung von Überhitzung und Temperaturschäden an den Inhaltsstoffen,
- keine Übertrocknung von Teilen oder des gesamten Materials,
- gleichmäßige Durchtrocknung des Stoffes und
- stets gleiche Endfeuchte.

Neben den physikalischen und chemischen Anforderungen vom Endprodukt her gelten für die Klasse der Lebens- und Nahrungsmittelprodukte erhöhte hygienische Auflagen. Die Vorschriften und Verordnungen hierzu sind bei der Herstellung einzuhalten. Damit lassen sich die Trocknungsprodukte aus der Landwirtschaft in zwei große Gruppen unterteilen:

- Produkte mit erhöhten Anforderungen:
Lebens- / Nahrungsmittel z.B. Kartoffeln, Mais, Getreide, usw.
- Materialien mit geringen oder keinen Anforderungen:
Grüngut als Futtermittel, lagerfähige Brennstoffe, usw.

Für Produkte mit erhöhten Anforderungen scheidet von vornherein Trocknungsverfahren mit direkter Feuerung aus.

Um in dieser Arbeit möglichst wenig Einschränkungen zu unterliegen und den Verbund eines Heizkraftwerkes mit einer Trocknungsanlage möglichst allgemeingültig behandeln zu können, wurde für die Untersuchungen Grüngut als Trocknungsmaterial gewählt. Grüngut hat einen hohen Anfangswassergehalt, ist in vielen Gegenden reichlich vorhanden und hat geringe Qualitätsanforderungen was den Trocknungsvorgang betrifft. Zur Trocknung von Grüngut ist eine ausgereifte Technik auf dem Markt vorhanden, nicht allerdings für eine Trocknung mit Niedertemperaturwärme aus einem Dampfkraftwerk.

2.2.2 Grünguttrocknung in der Landwirtschaft

Grüngut ist der Sammelbegriff für einen großen Bereich an Pflanzen, wie Gräser, Luzerne oder Grünroggen, die vorwiegend als Futtermittel für Wiederkäuer eingesetzt werden. Je nach Pflanzenart, Erntezeitraum oder Bestandsmischung unterscheidet sich die Beschaffenheit des Grüngutes stark, so dass auch der Wasserentzug beim Trocknungsvorgang sehr unterschiedlich ablaufen kann. Neben der Bodentrocknung ist die thermische Trocknung ein heute in der Landwirtschaft nicht mehr wegzudenkendes Konservierungsverfahren, das sich mit zunehmender Technisierung der landwirtschaftlichen Produktionstechnik mehr und mehr verbreitet hat. In Tabelle 3 sind die steigenden Produktionszahlen von Trockengrün in der Europäischen Union, in Deutschland und in Bayern von 1975 bis 2000 dargestellt. Die hohe Produktionssteigerung an Trockengrün liegt nicht zuletzt an der von der Europäischen Gemeinschaft gezahlten Trocknungsprämie. Die Prämie lag im Jahr 2000 beispielsweise über den Kosten für Heizwärme und Strom für Anlagen in Bayern, aber unter den gesamten Produktionskosten für Trockengrün.

Tabelle 3 Jahresproduktion an Trockengrün in [t/a] in der Europäischen Union, Deutschland und Bayern von 1975 bis 2000 /24/

| Trockengrün in [t/a] | 1975 | 1980 | 1985 | 1990 | 1995 | 2000 |
|-------------------------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Europ. Union | - | - | 1.331.856 | 3.128.119 | 4.158.644 | 4.719.524 |
| Deutschland | - | 87.739 | 114.162 | 281.119 | 362.900 | 356.535 |
| Bayern | 49.891 | 77.649 | 98.384 | 201.953 | 239.149 | 288.486 |

Erntefrisches Grüngut zeichnet sich durch einen meist sehr hohen Wasseranteil von 65 – 82 %-WG aus. Dieses Zellwasser ist möglichst rasch und produktschonend zu entfernen. Durch einen Wasserentzug bis auf ca. 14 %-FG Restfeuchte wird die mikrobielle Aktivität im Ausgangsstoff um ein Vielfaches verlangsamt und unerwünschte Zersetzungs- und Abbauvorgänge werden weitgehend eingeschränkt /14/. Auch das pflanzliche Enzymsystem selbst wird dabei deaktiviert und schließlich zerstört. Durch den Feuchtigkeitsentzug wird so

eine dauerhafte Konservierung der Nährstoffe erreicht, unabhängig davon, ob die Trocknung durch eine langsame Bodenwelkung auf dem Feld oder in einer Heißlufttrocknungsanlage stattfand.

Darüber hinaus werden der technischen Heißlufttrocknung von Grüngut noch weitere Produktveränderungen zugeschrieben, die hier kurz dargestellt werden sollen. Vom angewandten Trocknungsverfahren zusammen mit der weiteren Behandlung des Produktes hängt es ab, ob als Endprodukt Grund- oder Kraftfutter hergestellt wird. Grundfutter, das auch als Rauhfutter bezeichnet wird, ist von seiner Struktur her mechanisch nicht verändertes Futter, das dem Wiederkäuer als Hauptfutter angeboten wird. Es wird vorwiegend bei der Bodentrocknung produziert. Will man darüber hinaus z.B. eine weitere Steigerung der Milchleistung erreichen, kann man dem Wiederkäuer Kraftfutter in Form von gepressten Cobs oder Pellets zum Hauptfutter zugeben. Die Leistungssteigerung in der Milchproduktion wird durch die größtenteils direkte Verdauung des Kraftfutters im Dünndarm erreicht. Kraftfutter setzt dabei eine thermische Behandlung des Grüngutes bei erhöhten Temperaturen voraus, die eine Veränderung des Eiweißes in der Pflanze zu einem geschützten Protein bewirkt /42/.

Je nach Trocknungsverfahren können Produkte mit unterschiedlichen Eigenschaften hergestellt werden. Dies macht einen direkten Vergleich oder sogar eine Bewertung der angewandten Konservierungsmethode selbst in Bezug auf den erhaltenen Nährwert schwierig und muss stets mitberücksichtigt werden.

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht von Bewertungskriterien verschiedener in der Landwirtschaft angewandter Futterkonservierungsverfahren.

Tabelle 4 Landwirtschaftliche Konservierungsverfahren /22/, /23/, /29/ und /50/

| | aufzuwendende Energie | Erhaltener Futter-Nährwert | Emissionen (spez. Luftpfad) | Arbeitsaufwand | Lager-volumen | Grund-Kraft-Futter | Handels-ware | EG-Bei-hilfen |
|--------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------|---------------|--------------------|--------------|---------------|
| Bodentrocknung | 0 | - | 0 | ↑ | - | G | 0 | |
| Kaltlufttrocknung | - | 0 | 0 | 0 | - | G | 0 | |
| Warmlufttrocknung | --- | 0 | - | 0 | - | G | 0 | |
| Silagen | - | 0 | 0 | ↓ | 0 | G / K | 0 | |
| Heißlufttrocknung | -- | + | - | ↓ | + | K | + | ja |

(+), (↑) hoch, (0) neutral, (-), (↓) niedrig, (G) Grundfutter, (K) Kraftfutter

2.2.3 Kenndaten für Trocknungsanlagen

Trocknungssysteme für Stoffe mit hohem Wassergehalt werden durch die bereitstellbare Trocknungswärme und die damit mögliche Wasserverdampfung gekennzeichnet. Die Wasserverdampfung bestimmt sich nach Gleichung (2).

$$\frac{\Delta m_{H_2O\text{Overd}}}{\Delta t} \quad \text{in} \left[\frac{\text{kg}_{H_2O\text{Overd}}}{\text{h}} \right] \quad (2)$$

Je nach Feuchte des Trocknungsproduktes ergibt sich aus der Wasserverdampfungsleistung die Trockengutproduktion.

$$\frac{\Delta m_{TG}}{\Delta t} \quad \text{in} \left[\frac{\text{kg}_{TG}}{\text{h}} \right] \quad (3)$$

Als Maß für den thermischen Wirkungsgrad einer Trocknungsanlage kann der spezifische Energieverbrauch angesetzt werden. Typische Werte für den spezifischen Wärmebedarf von Trocknungsanlagen sind in Tabelle 13 aufgeführt.

$$q_{\text{Verd}} = \frac{\dot{q}_{\text{Gas}}(zu)}{\dot{m}_{H_2O\text{Overd}}} \quad \text{in} \left[\frac{\text{Wh}_{th}}{\text{kg}_{H_2O}} \right] \quad (4)$$

Daneben ist die Kennzahl des spezifischen elektrischen Energieverbrauchs als Maß für den mechanischen Wirkungsgrad (Antriebe und Strömungsenergie) einer Trocknungsanlage von Bedeutung.

$$e_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{m}_{H_2O\text{Overd}}} \quad \text{in} \left[\frac{\text{Wh}_{el}}{\text{kg}_{H_2O}} \right] \quad (5)$$

Für die Vorbehandlung des Feuchtgutes (Häckseln) und die Weiterverarbeitung des Trockengutes (Verpressen) ist zusätzlicher Kraftbedarf erforderlich. Dieser hängt maßgeblich von der trockenen Menge des durchgesetzten Materials ab. Ein Bezug, wie in Gleichung (5) auf die zu verdampfende Wassermenge, ist daher nicht sinnvoll.

Setzt man die Kennzahlen nach den Gleichungen (5) und (4) ins Verhältnis, erhält man den Strom- zu Wärmebedarf auf der Verbraucherseite.

$$\sigma_{el/th} = \frac{e_{el}}{\dot{q}_{zu}} \quad (6)$$

Eine entsprechende Kenngröße für Kraftwerke als Erzeuger von Strom und Wärme wurde mit der Stromkennzahl σ in Gleichung (1) vorgestellt.

2.2.4 Grüngutdrying mit dem Heißluftdryingverfahren

Als stationäres Dryingssystem im Grünfütterbereich wird überwiegend der direkt beheizte Trommelrockner, wie in Bild 5 gezeigt, eingesetzt.

In einem Heißgaserzeuger wird bei diesem Verfahren Primärenergie in Form von Erdgas oder Erdöl in einer offenen Flamme verbrannt. Die heißen Rauchgase werden mit Frischluft oder Brüdenluft abgekühlt und dieses Gasgemisch bei Temperaturen bis zu 1000 °C direkt zu dem sich in der drehenden Trommel befindlichen Produkt geführt. In der Trommel findet nun ein intensiver

Wärmeübergang vom heißen Trocknungsgas an das bewegte Produkt statt. Nach der Trocknung in der Trommel werden, z.B. in einem Zyklonabscheider, das Trocknungsprodukt und das Luft-Rauchgas-Gemisch getrennt und letzteres meist ohne weitere Abgasreinigung über den Schornstein an die Umgebung abgegeben. Das getrocknete Grüngut kann anschließend auf verschiedene Arten weiterverarbeitet werden; sehr oft wird es dabei zu Futtercobs verpresst /29/.

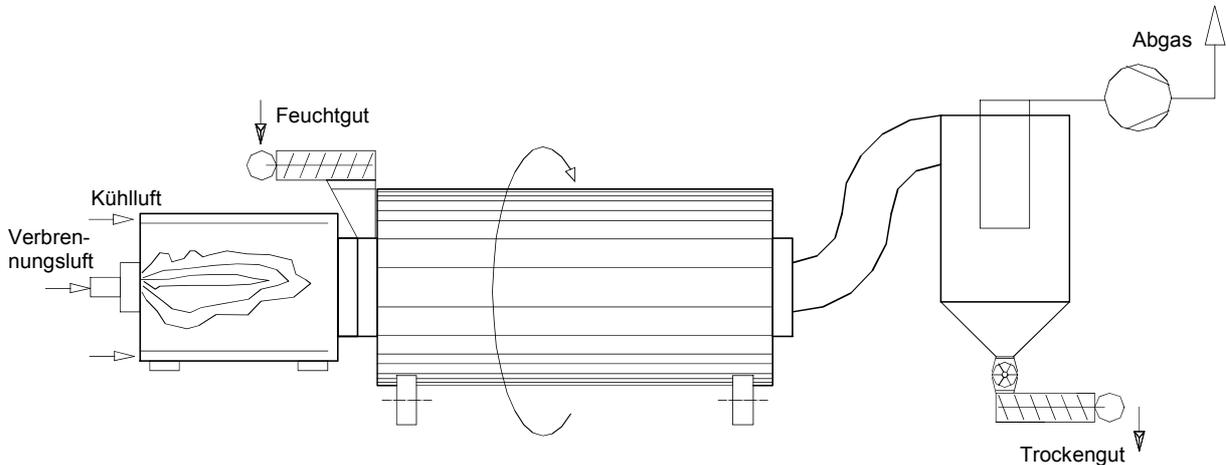


Bild 5 Heißlufttrocknung mit einem Trommeltrockner /23/

Zu den üblichen Systemen des Ein- und Dreizugtrommeltrockners für Grüngut sind in Tabelle 5 Anlagendaten zusammengestellt.

Tabelle 5 Anlagendaten zu Trommeltrocknern mit 15 t/h Wasserverdampfung /8/, /35/

| | |
|--|--|
| Trommeltyp – Geometrie | ca. 14 m - 16 m (Trommellänge) |
| Einzugtrommel / Dreizugtrommel | ca. Ø 5,3 m - Ø 6,0 m (Durchmesser) |
| Wasserverdampfungsleistung | 15 t/h (Wasser) |
| Brennerleistung | 12,6 MW _{th} (=1.260 m ³ /h Erdgas) |
| Verbrennungsluftvolumenstrom | ~12.000 m ³ /h (Normvolumen) |
| Kühlluftvolumenstrom | ~8.000 – 22.000 m ³ /h (Normvolumen) |
| Falschlufvolumenstrom | ~4.000 – 8.000 m ³ /h (Normvolumen) |
| Brüdevolumenstrom (Rückführung) | 0 - 30.000 m ³ /h (Normvol.) (je nach System) |
| Abgasvolumenstrom | 90.000 – 150.000 m ³ /h (Betriebsvolumen) |
| Trommeleintrittstemperatur | 450 – 900 °C |
| Trommelaustrittstemperatur | 90 – 130 °C |
| Wiesengras, Eingangsfeuchte | 70 – 86 %-WG |
| Wiesengras, Ausgangsfeuchte | 13 – 15 %-FG |
| spezifischer thermischer Energieverbrauch | 800 – 950 Wh _{th} /kg _{H2O} |
| spezifischer elektrischer Energieverbrauch | 15 – 25 Wh _{el} /kg _{H2O} |
| Strom- zum Wärmebedarf (nur Trocknung) | 0,02 bis 0,03 Wh _{el} /Wh _{th} |

2.2.5 Auslastung und Betriebszeit von Trocknungsanlagen

Die Trocknung von Grünfutter in Deutschland ist saisonbedingt auf sechs Monate von Mai bis Oktober beschränkt. Während dieser Zeit findet der Aufwuchs von Grüngut statt. Bild 6 zeigt die durchschnittliche monatliche Produktion der Trocknungsanlagen in Bayern /24/. In den Monaten Mai, September und Oktober ist meist eine 100 %-ige Auslastung der Trocknungskapazität gegeben. Hingegen ist in den Monaten Juni, Juli und August aufgrund von Aufwuchs und Witterung eine geringere Auslastung vorhanden. Die Landwirte weichen in diesem Zeitraum oft auf die gut mögliche und kostengünstigere Bodentrocknung aus.

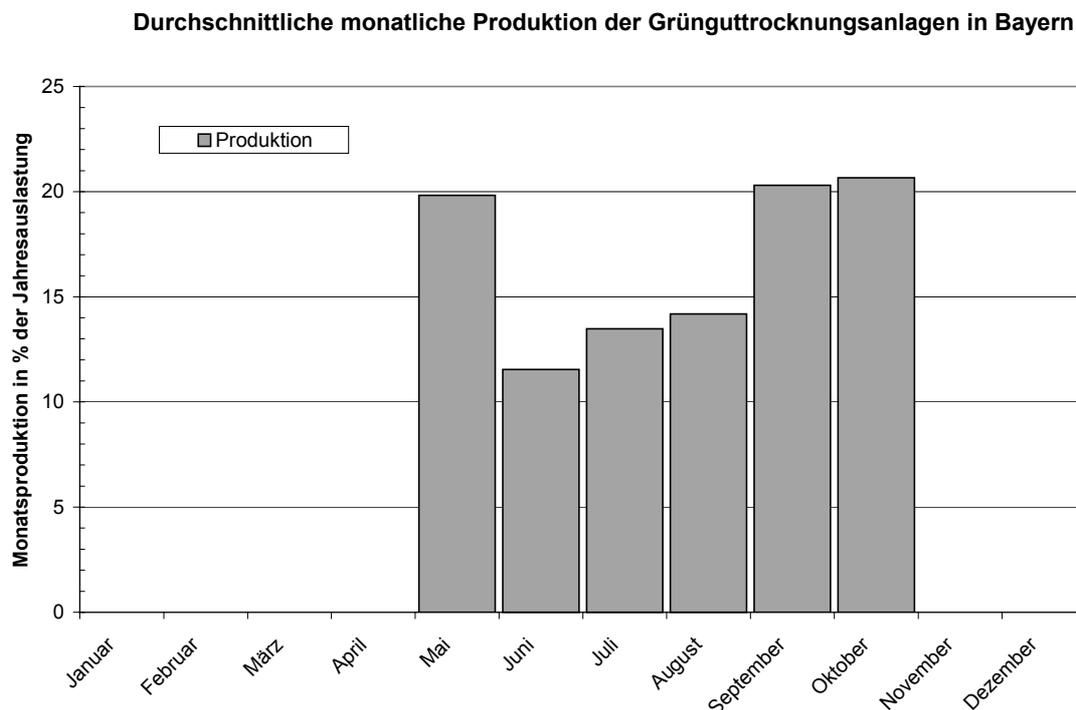


Bild 6 Durchschnittliche Produktion an Trockengrün in Bayern (1988 bis 2000) /24/

Je nach Witterung und Höhenlage des Einzugsgebietes beginnt die Trocknung in den ersten Maitagen. Ein hoher Trocknungsanfall ist dann den gesamten Mai über gegeben, währenddessen der erste Schnitt von Grüngut verarbeitet wird. Danach tritt oft eine Zwangspause mangels Anlieferung auf. Der weitere Verlauf der Auslastung der Trocknungsanlage hängt stark von der Witterung ab. Ist eine Schönwetterperiode angesagt, wird auf die Bodentrocknung ausgewichen. Ist es übermäßig feucht (häufig im Juni, Juli), können die Wiesen ohne Flurschädigung nur eingeschränkt befahren werden. Fallen wenig Niederschläge (oft im August, September) oder ist die Temperatur unterdurchschnittlich kühl (im Juni), verzögert sich der Grüngutaufwuchs. In trockenen Jahren kann es sogar zum Ausfall eines ganzen Schnittes kommen.

2.2.6 Wärme- und Strombedarf der Heißlufttrocknung

Der zeitliche Verlauf des Wärme- und Strombedarfs kann anschaulich über die Ganglinie anhand einer graphischen Darstellung verfolgt werden /44/. Die in Bild 7 dargestellte Saisonganglinie zeigt den Verlauf der energetischen Leistungsgrößen elektrischer und thermischer Bedarf über die gesamte Trocknungskampagne. Die schwarze Fläche unter der Kurve entspricht der während der Trocknungsaison benötigten Energiemenge.

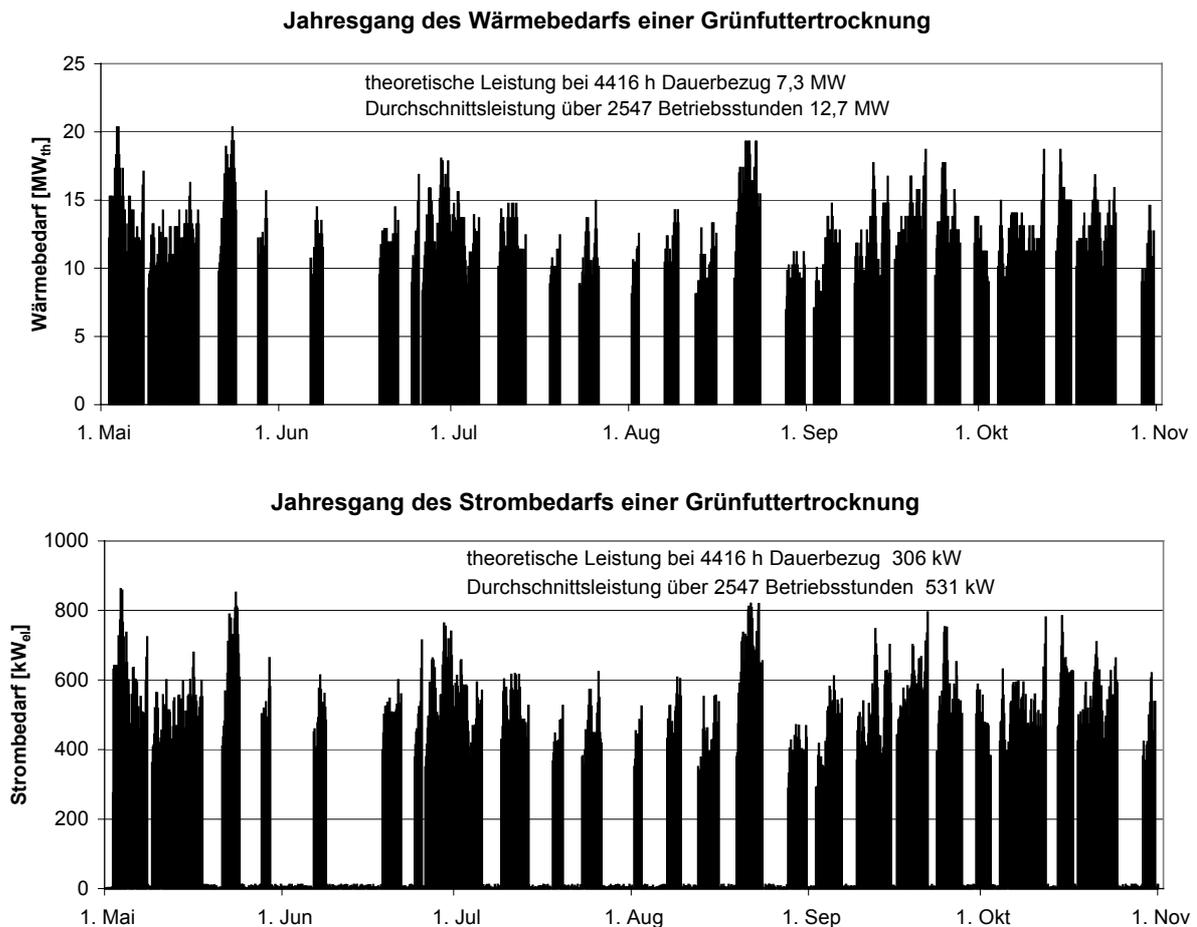


Bild 7 Jahresganglinie des Wärme- und des Strombedarfs einer Grünfüttertrocknungsanlage gebildet aus 3 h Mittelwerten /9/

Aufgrund der Anfahr- und Aufheizzeit von ca. 1 h und der langen Abkühlzeit von bis zu drei Stunden ist nur ein kontinuierlicher Betrieb über einen längeren Zeitraum wirtschaftlich sinnvoll. Entsprechend dem Aufwuchs und Anfall von Grüngut wird dann oft durchgehend Tag und Nacht getrocknet. Der in Bild 7 dargestellte Trocknungsbetrieb setzt sich aus ca. 24 Produktionszeiträumen von 2 bis 12 Tagen zusammen. Dazwischen liegen von der Zeitdauer etwas kürzere Stillstandsperioden. In der dargestellten Kampagne hat die Trocknung an 2547 Stunden stattgefunden. Dabei lagen die über die Betriebsstunden gemittelte durchschnittliche Heizleistung bei 12,7 MW_{th} und der gemittelte durchschnittliche

Strombezug bei 531 kW_{el}. Bedingt durch die Stillstandszeiten ergibt sich ein deutlich niedrigerer Leistungsbedarf bei einem theoretischen Dauerbezug. Hätte die Leistungsabnahme aus Bild 7 von Anfang Mai bis Oktober in Form eines Bandbezugs über 4416 h stattgefunden, läge die thermische Leistung bei 7,3 MW und die elektrische Leistung bei 306 kW.

Die meisten Trocknungsanlagen in Bayern haben für Strom und Brennstoff Sonderverträge mit Berücksichtigung des ausschließlichen Sommerbezugs. Ein hoher Leistungsbezug von Strom ist auf die Trocknungskampagne von 1. Mai bis 31. Oktober beschränkt, gleiches gilt für das meist eingesetzte Erdgas. Besondere Preisregelungen in Bezug auf Werktag- oder Wochenendabnahme sind nicht üblich. Der Strombezug wird aufgrund der Tarifordnung der Energieversorgungsunternehmen in Tag- bzw. Nachtbezug mit HT (Hochtarif) und NT (Niedertarif) Zeiten differenziert.

2.2.7 Jahresdauerlinien

Eine Dauerlinie ist die nach absteigender Höhe und Häufigkeit ihrer Werte geordnete graphische Darstellung einer Größe, wie der elektrische oder der thermische Leistungsbedarf. Aus der Dauerlinie lässt sich ablesen, wie lange ein bestimmter Wert der dargestellten Größe während der betrachteten Zeitspanne aufgetreten ist. Die Informationen über die zeitliche Abfolge der Werte gehen dabei verloren /44/. Bei einer Jahresdauerlinie beträgt die betrachtete Zeitspanne ein volles Jahr.

In Bild 8 ist der Übersichtlichkeit halber aber nur der Zeitraum 0 - 3000 h dargestellt, in dem ein Trocknungsbetrieb stattfand und Leistung bezogen wurde. Die restlichen Stunden des Jahres sind mit dem Leistungsbedarf von Null belegt. Die Darstellung basiert auf Mittelwerten über 3-Stunden aus Bild 7. Die Fläche unter der Funktion entspricht, wie schon bei der Ganglinie, der bezogenen Energiemenge.

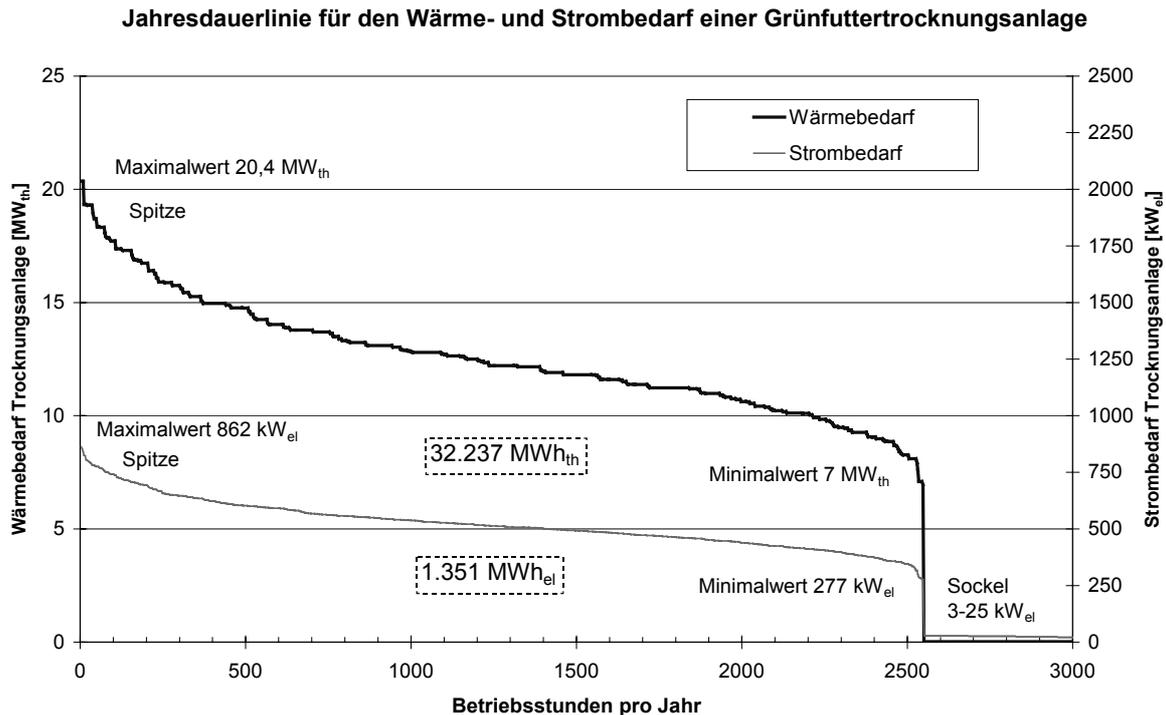


Bild 8 Jahresdauerlinie für den Wärme- und Strombedarf einer Trocknungsanlage

2.2.8 Bewertung des Energiebezugs

Durch einen Vergleich der Ganglinie und der Jahresdauerlinie für den Wärmeverbraucher Trocknungsanlage mit dem Versorgungsangebot und den Versorgungsmöglichkeiten lässt sich feststellen, ob und unter welchen Voraussetzungen und in welcher Größenordnung eine Wärmeversorgung z.B. über ein Heizkraftwerk technisch möglich und wirtschaftlich interessant ist.

So ist eine Versorgung mit Heiz- oder Prozesswärme über eine Dampflieferung stets dann gut möglich, wenn ein gleichmäßig hoher Wärmebedarf über eine lange Zeitdauer vorhanden ist. Spitzenwerte und Minimalauslastungen sind in der Versorgung teuer, ebenso wie ein häufiger Wechsel von Bezugs- und Nichtbezugszeiten.

Stillstandszeiten

Bei der Bewertung der Jahresganglinie aus Bild 7 muss berücksichtigt werden, dass die Daten aus dem Betrieb einer Heißlufttrocknungsanlage stammen, deren Leistungsbezug keinen vertraglichen Regulierungen unterlag. Der Energiebezug war dadurch von 24 Stillstandszeiten mit einer Dauer von 6 h bis zu 10 Tagen unterbrochen. Diese für eine Dampfversorgung über ein Wärmenetz ungünstige

Situation ließe sich durch entsprechende Anliefervereinbarungen ändern, die zu einer gleichmäßigeren Auslastung führen könnten.

Sommerbezug

Der reine Sommerbezug der Energie von Trocknungswerken für Grüngut fällt antizyklisch zum erhöhten Energiebedarf vieler sonstiger Wärme- und Stromverbraucher aus den privaten Haushalten und der Industrie an. Durch die Sommerabnahme erhöht sich damit die Auslastung des versorgenden Heizkraftwerks.

Neben dem Leistungsbedarf und den Energiemengen einer Trocknungsanlage muss zur Beurteilung der Machbarkeit eines Systemverbundes von Kraftwerk mit einer Trocknungsanlage zunächst das technische System für eine Niedertemperaturtrocknung bekannt sein. Hierauf wird in den nächsten Kapiteln eingegangen.

2.2.9 Kosten der Heißlufttrocknung von Grüngut

Betriebskosten

Die Kosten für Wärme und Strom machen bei größeren Trocknungsanlagen knapp 50 % der gesamten Produktionskosten aus. Die Heizkosten für die Trocknungswärme in Höhe von ca. 45,6 % der laufenden Kosten stellen dabei den wesentlichen Anteil dar. In Tabelle 6 sind Durchschnittswerte über 10 Jahre für die Aufteilung der Kosten eines Trocknungsbetriebes mit 15 t/h Wasserverdampfungsleistung angegeben.

Tabelle 6 Kostenaufteilung bei einer herkömmlichen Grünguttrocknung (1991-2000) /24/

| Kostenverteilung | Energiekosten | laufende Kosten | Gesamtkosten |
|--|----------------------|------------------------|---------------------|
| Wärmebedarf | ~ 83,5 % | ~ 45,6 % | ~ 39,6 % |
| Strombedarf (reine Trocknung) (Auf-/Weiterverarbeitung Grüngut) | ~ 9,9 % ~ 6,6 % | ~ 8,8 % | ~ 7,7 % |
| Personalaufwand | - | ~ 20,8 % | ~ 18,1 % |
| Instandhaltung | - | ~ 12,0 % | ~ 10,3 % |
| sonstige Betriebsstoffe | - | ~ 12,7 % | ~ 11,2 % |
| Abschreibungen | - | | ~ 13,1 % |

Von den Energiekosten fällt der größte Anteil mit 83,5 % auf die Trocknungswärme und der Rest von 9,9 % auf den eingesetzten Strom. Bei einer Optimierung muss daher neben dem Wärmebedarf auch der Bedarf an Gebläseleistung berücksichtigt werden.

Investitionskosten

Investitionsentscheidungen von Grünfütterttrocknungsbetrieben sind von folgenden Randbedingungen geprägt:

- Die Trocknung läuft als Saisonbetrieb nur während der Sommermonate.
- In dieser Zeit werden selten über 3000 Betriebsstunden pro Jahr erreicht.
- Das erzeugte Grüngut konkurriert direkt mit anderen Futtermitteln wie Getreide oder Sojaschrot, woraus sich der erzielbare Marktpreis bestimmt.
- An niederschlagreichen Tagen herrscht eine hohe Nachfrage nach Trocknungskapazität, während an sonnenreichen Tagen die Trocknungsanlage nur wenig in Anspruch genommen wird.

Die geringen Auslastungsstunden pro Jahr und der nur mäßige Produktwert des erzeugten Futtermittels lassen eine kostendeckende Produktion nur bei geringen Investitionskosten zu. Die Anlagen werden dann wiederum mit der maximal möglichen Leistung betrieben. Die maximale Leistung bei Trocknungsanlagen wird erreicht, wenn die Eintrittstemperatur für die Trocknung möglichst hoch gewählt wird. Limitierende Faktoren sind dabei die Materialbelastung der Ofenausmauerung, die Temperaturbelastung des Stahls, der mit den heißen Trocknungsgasen in Kontakt kommt sowie die zunehmend schlechtere Qualität des Trockengutes, die mit erhöhten Emissionen der Trocknungsanlage einhergeht.

Personaleinsatz und Verfügbarkeit

Aufgrund des stark vom Anfall des Grüngutes und den Wetterbedingungen abhängigen Trocknungsbetriebes, wird beim Personaleinsatz größtenteils auf stundenweise beschäftigte Hilfskräfte zurückgegriffen. Entsprechend wird eine hohe Automatisierung bei einfacher Anlagenbedienbarkeit gefordert.

Um Produktionsausfälle zu minimieren ist eine hohe Zuverlässigkeit der Trocknungsanlage als Teil in der Kette verfahrenstechnischer Produktionsabläufe erforderlich. Voraussetzung hierfür ist eine große Robustheit und ein geringer Verschleiß der Trocknungsanlage.

Flexibilität in der Produktion

Zur Sicherung einer hohen Auslastung der Trocknungsanlage muss ein breites Spektrum an Materialien verarbeitbar sein. Da bei der Grünguttrocknung oft kleine Produktchargen zu trocknen sind, müssen die Rüstzeiten für die erforderliche Umstellung oder Anpassung der Produktionsanlage kurz sein und wenn möglich ohne Betriebsunterbrechung erfolgen können.

2.2.10 Emissionen bei der Heißlufttrocknung

Trocknungsanlagen unterliegen zunehmend wegen der Schadstoff- und Geruchsemissionen erhöhten Umweltauflagen. Unter Emissionen versteht man die von einer Anlage ausgehende Verbreitung von Stoffen, insbesondere von Schadstoffen, in die Umwelt. Aus Gründen des Umweltschutzes sollten daher Emissionen stets minimiert werden.

Bei den meisten Trocknungssystemen werden Emissionen über die Trocknungsabluft an die Umwelt abgegeben. Bei Emissionen über einen Kamin tritt mit der Abgabe an die Atmosphäre eine Verdünnung der Schadstoffe mit der Umgebungsluft auf. Aber auch schon vor der Abgabe der Trocknungsgase an die Umgebung tritt je nach Produktionsprozess unterschiedlich konzentriertes Trocknungsgas auf. Daher sind für vergleichende Betrachtungen von verschiedenen Systemen neben den Emissionskonzentrationen in der Abluft stets auch die von einer Anlage insgesamt abgegebenen Emissionsfrachten zu betrachten.

Grünfütterttrocknungsanlagen emittieren vor allem Staub und organische Stoffe aus dem Trocknungsprodukt selbst. Bei direkter Trocknung mit Rauchgasen und hohen Temperaturen kommen noch weitere Emissionen aus der Verbrennung und eventuellen Verschmelzungen - z.B. durch Funkenflug infolge der direkten Trocknung mit den heißen Rauchgasen - hinzu. Dabei entstehen neben Kohlenmonoxid aus der Verbrennung, nachweislich weitere CO-Emissionen aus Verschmelzungsreaktionen am Produkt in den heißen Zonen am Anfang der Trommel. Eine Korrelation der CO-Emissionen mit der Eintrittstemperatur und den sonstigen Schadstoffemissionen ist feststellbar. Die Bestimmung aller organischen Emissionen ist wegen der großen Anzahl an verschiedenen Stoffen und der Nachweisverfahren für die Einzelsubstanzen technisch aufwendig. Daher bietet es sich an, einzelne „Haupt“-substanzen zu bestimmen und diese als sogenannte Leitwerte für ein Spektrum an Emissionen zu betrachten. Das einfach zu messende Kohlenmonoxid gilt dabei als Leitwert für die Qualität der Verbrennung und dem Aufspüren evtl. vorkommender Verschmelzungen im anschließenden Trocknungsprozess.

Die Bestimmung der einfachen Aldehyde (Formaldehyd und Acetaldehyd) kann als Leitwert für das gesamte Spektrum der Aldehydderivate herangezogen werden.

Begrenzung der Emissionen für Grünfütterttrocknung nach TA-Luft

Grünfütterttrocknungsanlagen müssen nach der Technischen Anleitung Luft (TA-Luft 1986) die in Tabelle 7 dargestellten Emissionen einhalten. Darüber hinaus kann die Genehmigungsbehörde schärfere Grenzwerte nach dem Stand der Technik festsetzen bzw. noch weitere Stoffe mit einem einzuhaltenden Grenzwert belegen.

Tabelle 7 Emissionsgrenzwerte und Messvorschriften bei Grünfüttertrochnungsanlagen

| Stoff | Grenzwert (TA-Luft 1986) | übliche Messvorschrift |
|--|--|--|
| Staub | 0,15 g/m ³ (Normz., feucht) | VDI-Richtlinien 2066, Blatt 1, 7 |
| Aldehyde (C ₁ -C ₄) | 20 mg/m ³ (Normz., trocken) bzw. 0,1 kg/t _{H₂O} verd | VDI-Richtlinien 3862, Blatt 2 (Entwurf) |
| CO, Kohlenmonoxid | Kein Grenzwert, aber oft als Betriebsleitwert zu bestimmen | IR-Analysator, VDI-Richtlinien 2459, Blatt 4 |
| C-Gesamt (Kohlenwasserstoffe) | Kein Grenzwert nach TA-Luft | Flammenionisationsdetektor, VDI-Richtlinien 3481, Blatt 1 |

Staubemissionen - Trennung von Produkt und Trocknungsgasstrom

Die Trennung von Produkt und Trocknungsgasstrom ist bei vielen konvektiven Trocknungsprozessen problematisch, da feine oder feinste Partikel aus Produktabrieb oder Verschmutzungen in Form von Staub über das Abgas ausgetragen werden. Das einfachste Verfahren zur Trennung eines Feststoffes aus einer Gasphase beruht auf dem Dichteunterschied beider Stoffe. Man nennt daher alle Abscheider, in denen durch massenproportionale Feldkräfte wie Schwerkraft, Trägheitskraft und Zentrifugalkraft die Trennung von Partikeln vom Gasstrom vorgenommen werden, Massenkraftabscheider. Neben den Massenkraftabscheidern sind filternde, elektrische und nassarbeitende Abscheider möglich.

Trommeltrockner für Grüngut funktionieren nach dem Prinzip der pneumatischen Produktförderung. Der Abgasstrom trägt dabei das Trocknungsprodukt aus dem Trockner aus. Zur Produktabtrennung und gleichzeitigen Staubabscheidung haben sich Zyklone bewährt. Die Druckverluste im Zyklon liegen dabei in Bereichen von 1.200 – 2.300 Pa bei einem Gesamtabscheidegrad von ~99,7 %.

3 Trocknung von Grüngut

Bei der Behandlung eines Trocknungsprozesses werden spezielle Begriffe und Definitionen verwendet. Diese beschreiben das Trocknungsprodukt und sollen im Folgenden erläutert werden. Anhand dieser Definitionen werden die Produkteigenschaften von Grüngut vorgestellt. Zum Vergleich werden auch Stoffwerte von ähnlichen Biomassen aufgeführt. Zum Verständnis des Trocknungsvorgangs muß auf die physikalische Bindung der Feuchtigkeit im Trocknungsmaterial eingegangen werden und die Gleichgewichtsfeuchtigkeit dargestellt in Form von Sorptionsisothermen wird behandelt.

3.1 Definitionen zum Trocknungsgut

Unter Feuchte versteht man ganz allgemein die in einem Gut enthaltene Flüssigkeit jeglicher Art. Bei der Trocknung fast aller Biomassen handelt es sich um Wasserfeuchte.

3.1.1 Feuchtegrad, Feuchte

Die Feuchte des zu trocknenden Gutes oder der Feuchtegrad wird als Produktfeuchte X bezeichnet. Die Feuchte gibt das Verhältnis Masse an Wasser im Gut m_{H_2O} zur Masse der trockenen Substanz m_{TS} an.

$$X = \frac{m_{H_2O}}{m_{TS}} \quad \text{in} \left[\frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{kg}_{TS}} \right] \text{ oder } [\% \text{-FG}] \quad (7)$$

m_{H_2O} Masse der im Gut enthaltenen Flüssigkeit in [g] oder [kg]
 m_{TS} Masse der Trockensubstanz (0 % Restfeuchte) in [g] oder [kg]

3.1.2 Wassergehalt

Der Wassergehalt U , auch mit Wasserbeladung bezeichnet, ist der Quotient aus der Flüssigkeitsmasse m_{H_2O} und der Masse m_{Gut} des feuchten Ausgangsgutes ($m_{TS} + m_{H_2O}$). Der Wassergehalt wird, wie die Feuchte, oft in Prozent angegeben.

$$U = \frac{m_{H_2O}}{m_{Gut}} = \frac{m_{H_2O}}{m_{TS} + m_{H_2O}} \quad \text{in} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right] \text{ oder } [\% \text{-WG}] \quad (8)$$

m_{Gut} Masse des feuchten Gutes in [g] oder [kg]

In wissenschaftlichen Arbeiten wird die Größe X bevorzugt verwendet, da

- die im Gut enthaltene Wassermenge m_{H_2O} und der Feuchtegehalt X während der Trocknung einander proportional sind und
- die Differenz des Feuchtegehaltes von X_{FG} nach X_{TG} nach Gleichung (12) entspricht der verdunsteten Wassermenge.

In der Praxis ist jedoch die Größe U gebräuchlicher, deren Wert zwischen 0 % und maximal 100 % liegt.

Beide Größen können mit den Gleichungen (9) und (10) ineinander umgerechnet werden. Bild 9 zeigt den Zusammenhang zwischen X und U grafisch auf.

$$U = \frac{X}{1+X} \quad \text{oder} \quad \frac{X}{100\% + X} \cdot 100\% \quad (9)$$

$$X = \frac{U}{1-U} \quad \text{oder} \quad \frac{U}{100\% - U} \cdot 100\% \quad (10)$$

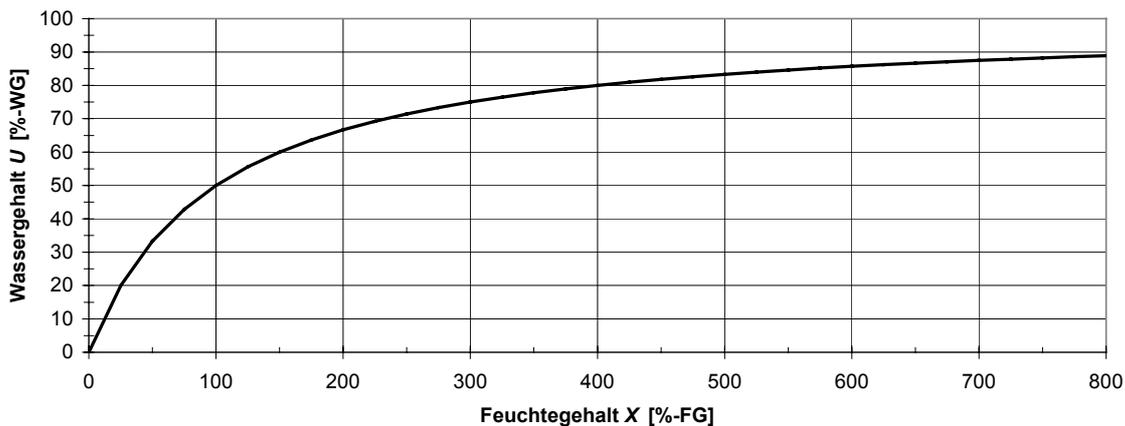


Bild 9 Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt X und Wassergehalt U

3.1.3 Trockensubstanz

In der Trocknungstechnik ist zusätzlich die Angabe der Trockensubstanz TS üblich. Darunter versteht man das Verhältnis aus Trockenmasse m_{TS} zur Gesamtmasse ($m_{TS} + m_{H_2O}$). Der Wert ist damit die Ergänzung des Wassergehaltes U zu 1.

$$TS = \frac{m_{TS}}{m_{Gut}} = \frac{m_{H_2O}}{m_{TS} + m_{H_2O}} = 1 - U \quad \text{in} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right] \text{ oder } [\%] \quad (11)$$

3.1.4 Wasserentzug

Da die Trocknung selten bis auf eine Restfeuchte von Null ($X=0$) durchgeführt wird, ist für die Trocknung die Berechnung des notwendigen Wasserentzuges vom Feuchtgut X_{FG} zum Trockengut X_{TG} notwendig. Dieser errechnet sich nach Gleichung (12) mit Bezug auf die Trockensubstanz.

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{U_{FG} - U_{TG}}{1 - U_{FG}} = X_{FG} - X_{TG} \quad \text{in} \left[\frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{kg}_{TS}} \right] \quad (12)$$

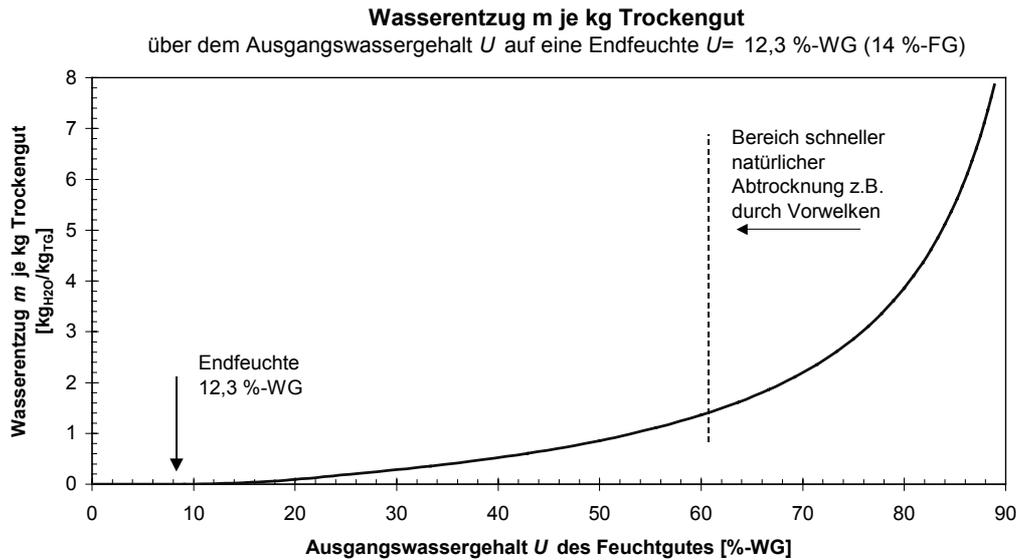


Bild 10 Wasserentzug \dot{m}_{H_2O} je kg Trockengut bis zu einer Endfeuchte von 14 %-FG

In Bild 10 ist der Wasserentzug \dot{m}_{H_2O} in $[\frac{kg_{H_2O}}{kg_{TG}}]$ für eine Trocknung auf die Feuchte von 14 %-FG (12,3 %-WG) dargestellt.

3.1.5 Aktivität des Trocknungsgutes

Unter der Aktivität a_w wird die Feuchte an der Produktoberfläche verstanden. Die Aktivität wird meistens nicht in Prozenten sondern als numerischer Wert zwischen 0 ... 1 angegeben.

$$a_w = \frac{p_D(\text{Oberfläche})}{p'_D(\text{Satttdampf})} = \varphi(\text{Produkt}) = f(X) \quad \text{in [-]} \quad (13)$$

Im Gleichgewichtszustand stimmen die Aktivität a_w und die relative Luftfeuchte φ überein. Der Stoffaustausch zwischen Umgebungsluft und Trocknungsgut ist ausgeglichen. Stimmen die Aktivität und die relative Feuchte der Umgebungsluft nicht überein, tauscht ein hygroskopes Trocknungsgut solange Feuchtigkeit mit der Umgebungsluft aus, bis die Gleichgewichtsfeuchte erreicht ist. Über die Sorptionsisotherme bei der Produktfeuchte X bestimmt sich die Aktivität und im weiteren der Dampfdruck p_D an der Gutoberfläche eines Stoffes. Während des Trocknungsvorgangs - bei dem es sich wegen der kontinuierlichen Wasserabgabe des zu trocknenden Stoffes um einen instationären Vorgang handelt - ist die Differenz zwischen der Aktivität a_w und der relativen Luftfeuchte φ die treibende Kraft für den Stofftransport.

3.1.6 Trocknungszeit

Unter der Trocknungszeit wird die benötigte Zeit zur Abtrocknung von einer festgelegten Anfangsfeuchte auf die gewünschte Endfeuchte verstanden. Damit ist die zu verdampfende Wassermenge pro Masse Trockenprodukt festgelegt und ein Vergleich von Trocknungszeiten zwischen verschiedenen Produkten wird möglich.

$$t = t(\text{Anfangsfeuchte}) - t(\text{Endfeuchte}) \quad \text{in [sec]} \quad (14)$$

Die Trocknungszeit gibt die Dauer für den Verbleib des Trocknungsgutes im Trockner an und ist die bestimmende Größe für die Auslegung von Trocknungsanlagen. Die Trocknungszeit wird bestimmt durch den kombinierten Wärme- und Stoffübergang und die Diffusion im Trocknungsgut. Da sich diese Stoffwerte bei Grüngut nur schwer bestimmen lassen, ist man auf Messungen der Trocknungszeit aus Versuchen angewiesen.

3.1.7 Wasserverdampfungsrate

Unter der Wasserverdampfungsrate \dot{m}_{H_2O} ist die dem Trocknungsgut entzogene Feuchtigkeit ∂m_{H_2O} pro Zeiteinheit ∂t zu verstehen. Sie wird auch Wasserverdampfungs geschwindigkeit bezeichnet und ist gleich der Massenänderung $\partial \dot{m}_{TG}$ des Trocknungsgutes.

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{\partial m_{H_2O}}{\partial t} \sim \frac{\partial m_{TG}}{\partial t} \quad (15)$$

Die Verdampfungsrate ist proportional der Gutoberfläche A_{Gut} bzw. der aktiv am Stoffaustausch beteiligten Oberfläche A_{eff} .

$$\frac{\partial m}{\partial t} \sim A_{Gut} \sim A_{eff} \quad (16)$$

Zudem gehen in die Wasserverdampfungsrate die Temperaturleitfähigkeit a des Trocknungsgases und der Diffusionskoeffizient δ für die Feuchtigkeit im Trocknungsgut ein. Der Quotient beider Größen bildet die Lewiszahl Le . Die Wasserverdampfungsrate hängt weiter vom Wärmeübergangskoeffizienten α sowie dem Stoffübergangskoeffizienten β ab.

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{\partial m}{\partial t} \sim f\{a, \delta, \alpha(\text{Gut, Oberfläche, } \vec{v}), \beta(\text{Gut, Oberfläche, } \vec{v})\} \quad (17)$$

Die Bestimmung der Stoffkoeffizienten ist bei Pflanzen in der Wachstumsphase und insbesondere bei Grüngut aufgrund des nicht definierten Zustandes der Biomasse schwierig. Auch zur Erfassung der Gutoberfläche sind keine Standardmessverfahren bekannt.

3.2 Eigenschaften von Grüngut

3.2.1 Zusammensetzung und Aufbau

Grüngut besteht zum überwiegenden Teil aus einer Mischung verschiedener pflanzlicher Gräser. Das Material der Pflanzen wird gemeinhin als Biomasse bezeichnet. Die Biomasse wird dabei in den Pflanzen im Rahmen der Photosynthese aus den anorganischen Molekülen Wasser H_2O und Kohlendioxid CO_2 und der Energie des Lichtes (Sonnenstrahlung) mit Hilfe von Chlorophyll gebildet. In Polymerisationsreaktionen und Umbauprozessen wandelt die Pflanze die bei der Photosynthese gebildeten Grundbausteine in höhere Molekülverbände um.

Die Struktur der pflanzlichen Biomasse setzt sich zum überwiegenden Teil aus Fasern zusammen. Diese Zellulose- und Holzstofffasern sind mit Bindern wie Stärke und höhere Polysacaride zu einer festen Struktur verwachsen. Die Zusammensetzung von Biomasse besteht fast ausschließlich aus den Elementen Kohlenstoff C, Wasserstoff H und Sauerstoff O, die sich mit der Summenformel $CH_{1,4}O_{0,6}$ ausdrücken lässt /39/. Der hohe Sauerstoff- und Wasserstoffgehalt spiegelt sich in einem hohen Gehalt an leichtflüchtigen Stoffen wieder, dem in Bezug auf die Temperaturbelastung bei der Trocknung Rechnung getragen werden muss. Daneben sind die Elemente Stickstoff N, Phosphor P und Schwefel S sowie Mineralstoffe und sonstige Spurenelemente je nach Art und Herkunft der Pflanzen in unterschiedlich hohen Anteilen enthalten.

3.2.2 Dichte, Schüttdichte und Feuchte

Die Dichte trockenen Grüngutes und vieler anderer Biomassen schwankt zwischen $0,4$ bis $1,5 \text{ kg/dm}^3$.

Tabelle 8 Dichte von Biomassen (trocken) /21/, /27/

| Art der Biomasse (trocken) | Dichte* in $[\text{kg/dm}^3]$ |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Gras, Luzerne (flachgepresst) | 0,7 – 0,8 |
| Stroh (flachgepresst) | 0,4 – 0,6 |
| Weizen, Roggen, Hafer (Korn) | 1,2 – 1,5 |
| Weichholz (Fichte, Birke) | 0,4 – 0,8 |
| Hartholz (Buche, Eiche) | 0,7 – 1,0 |

* Die angegebenen Dichten variieren stark, je nach Art und Behandlungsweise der Biomasse.

Die geometrischen Abmessungen von Biomasse sind je nach Art und Wachstum sehr verschieden. Für die Verarbeitung ist ein möglichst schütffähiger Zustand herzustellen. Die Oberfläche der Biomasse setzt sich dabei aus der natürlichen Oberfläche der Pflanze und den künstlichen Schnittflächen aus der Zerkleinerung

zusammen. Da die Schnitte überwiegend zur Längenkürzung verwendet werden, sind die Schnittflächen zur natürlichen Oberfläche klein.

In Tabelle 9 sind Anhaltswerte für die Schüttdichten verschiedener Biomassen aus dem landwirtschaftlichen Bereich angegeben.

Tabelle 9 Schüttdichten für verschiedene Biomassen (Nassgut und Trockengut) /27/

| Art der Biomasse | Schüttdichte in [kg/m ³] |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| Nassgut, Grüngut, Luzerne (Haufen) | 300 – 400 |
| Grüngut, Luzerne (Schüttung) | 150 – 250 |
| Kartoffeln, rein | 625 – 725 |
| Zuckerrübenschnitzel | ~ 1000 |
| Trockengut, Grünfutter, gemahlen | 300 – 400 |
| Heu, gehäckselt 60/40/20mm | 30 / 45 / 60 |
| Wiesenheu, lose | 10 – 25 |
| Grünfutter, gepresst | 700 – 750 |
| Zuckerrübenschnitzel | 270 – 390 |
| Kartoffelschnitzel | 430 – 450 |
| Getreide, lagertrocken | 600 – 750 |

3.2.3 Wassergehalt und Gleichgewichtsfeuchte

Je nach Erntezeitpunkt, Lagerung, Vortrocknung usw. können die Biomassen im Naturzustand unterschiedlich feucht sein. Beispielhaft ist der Wasser- und Feuchtegehalt einiger Biomassen in Tabelle 10 mit der Spannweite der auftretenden Feuchtebelastung angegeben.

Tabelle 10 Wassergehalt U bzw. Feuchtegehalt X verschiedener Biomassen

| Art / Zustand der Biomasse | Wassergehalt U in [%-WG] | Feuchtegehalt X in [%-FG] |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Grüngut (frisch geschnitten) | 80 – 70 | 400 – 233 |
| Grüngut (vorgewelkt) | 65 – 40 | 186 – 67 |
| Futtercobs aus Grüngut | 12 – 11 | 15 – 14 |
| frischgeerntetes Holz | 55 – 45 | 122 – 82 |
| Holzpellets als Brennstoff | 9 – 7 | 10 - 8 |

Bei der Aufbewahrung eines Produktes bei der Lagertemperatur T und der Luftfeuchte φ gibt die Sorptionsisotherme Auskunft über die sich einstellende Gleichgewichtsfeuchte. Die Bedeutung der Sorptionsisotherme für die Trocknung wird in den Kapiteln 3.3.4 bis 3.3.7 ausführlich behandelt. In Bild 11 sind beispielhaft die Sorptionsisothermen für Wiesen gras und Luzerne für die Temperaturen von 20, 25 und 30 °C dargestellt.

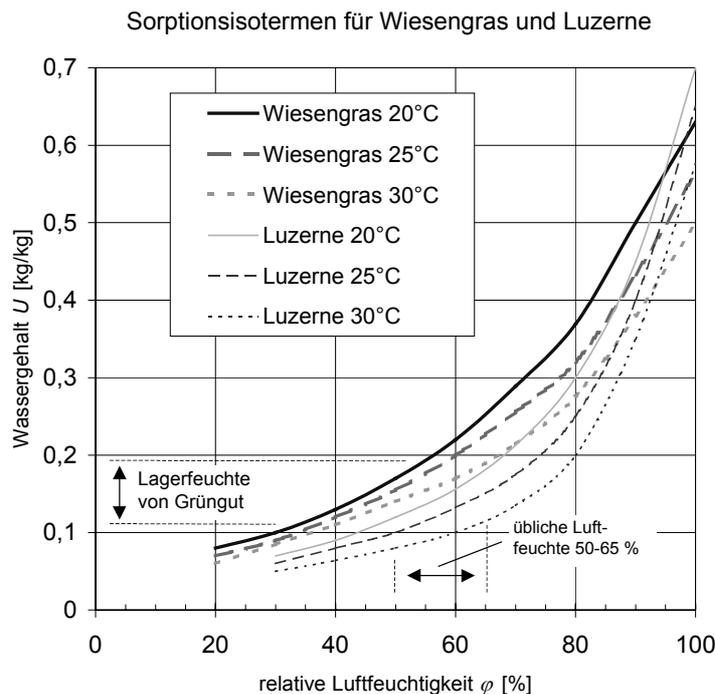


Bild 11
Sorptionisothermen von Wiesengras und Luzerne /49/

Bei der in Mitteleuropa üblichen Luftfeuchtigkeit von 50 – 65 % stellt sich bei Wiesengras und Luzerne ein Lagerwassergehalt zwischen 0,1 – 0,2 kg/kg ein. Der Wassergehalt U des Materials und die Wasseraktivität a_w an der Oberfläche bestimmen die physikalischen, mechanischen, chemischen und mikrobiologischen Eigenschaften eines Materials sowie Wechselwirkungsvorgänge wie z.B. Rieselfähigkeit, Klumpenbildung, Kohäsion. In der Lebensmittelindustrie ist

die Wasseraktivität ein wesentlicher Maßstab für die Haltbarkeit von Teil- und Fertigprodukten. Untersuchungen zu diesen Eigenschaften des Produktes Grüngut sind kaum bekannt.

3.2.4 Trocknungszeiten von Grüngut

Die Trocknungszeiten bei der thermischen Trocknung von Grüngut sind kurz, verglichen mit der Bodentrocknung auf dem Feld. In Tabelle 11 sind Trocknungszeiten für Grüngut bei Heißlufttrocknung, bestimmt über die Verweilzeit des Produktes in der Trocknungstrommel, dargestellt. Die kürzere Trocknungszeit bezieht sich auf Ausgangsfeuchten von 70 – 75 %-WG, während die längere Trocknungszeit für Wassergehalte von 80 – 84 %-WG ermittelt wurde.

Tabelle 11 Trocknungszeit von Grüngut - Praxiswerte /2/

| Art der Trocknungsanlage | Trocknungszeit |
|--------------------------------------|----------------|
| Heißlufttrocknung mit 800 – 1000 °C | 3 bis 5 min |
| Heißlufttrocknung mit 500 – 800 °C | 5 bis 7 min |
| Vortrockner mit 80 °C (extrapoliert) | 25 bis 35 min |
| Bodentrocknung bei 25 °C | 1 bis 2 Tage |

3.3 Trocknung hygroskopischer Stoffe

3.3.1 Bindung der Feuchte im Trocknungsgut / Bindungsenergie

Ausgangspunkt jedes Trocknungsprozesses ist ein Gut, an dem eine Flüssigkeit - meist Wasser - durch verschiedene Bindungskräfte haftet. Durch den Einsatz von Energie beim Trocknungsvorgang werden die Bindungskräfte zwischen dem Gut und der Flüssigkeit gelöst, so dass die Flüssigkeit von der Trockensubstanz getrennt werden kann.

Andererseits ist mit jeder Art von Bindung von Molekülen wegen der Verminderung der Bewegungsmöglichkeiten ein Energieverlust verknüpft, der in Form von Wärmefreisetzung erfolgt. Liegt die Gutfeuchte in ungebundener flüssiger Form vor, ist zur Überführung der Feuchte vom flüssigen in den dampfförmigen Zustand die Verdampfungsenergie zuzuführen. Ist die Feuchte zusätzlich durch innere Kräfte an den Feststoff gebunden, muss vor der Verdampfung der Flüssigkeit diese Bindungsenergie überwunden werden. Damit lassen sich Trocknungsgüter in:

- hygroskopische Güter und
- nicht-hygroskopische Güter

einteilen. Bei hoher Feuchtebelastung verhalten sich viele Stoffe nicht-hygroskopisch.

3.3.2 Nicht-hygroskopische Stoffe

Liegt ein Stoff in zwei Aggregatzuständen flüssig (f) und gasförmig (g) vor, so ist nach der Gibbs'schen Phasenregel der Druck, auch Satttdampfdruck genannt, durch die Temperatur des Stoffes eindeutig festgelegt. Nach dem Fundamentalsatz für Phasengleichgewichte herrscht zwischen den beiden Phasen dann Gleichgewicht, wenn die chemischen Potentiale gleich sind:

$$\mu_g = \mu_f \quad (18)$$

Bei konstanter Temperatur bedeutet dies, dass ebenso viele Moleküle verdampfen wie kondensieren. Im Gleichgewichtszustand gilt über den gesamten Stoff auch:

$$d\mu_g = d\mu_f \quad (19)$$

Außer von der Temperatur ist der Dampfdruck über Flüssigkeiten auch von den von außen oder innen auf die Flüssigkeit wirkenden Kräften abhängig. Diese Bindungskräfte treten bei niedriger Feuchte in den Vordergrund und geben dem Stoff seine hygroskopischen Eigenschaften.

3.3.3 Bindungsmechanismen / Bindungskräfte hygroskopischer Stoffe

Die Bindungskräfte lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

- chemische Bindung

Über Ionenbindung oder molekulare Bindung angelagertes Wasser (Hydrate, Kristallwasser) besitzt die höchsten Bindungskräfte. Dieses angelagerte Wasser entweicht nur bei hohen Temperaturen, z.B. Glühen. Bei Grüngut wie auch bei anderen Biomassen sind die molekularen Bindungen unbedeutend und auch der Anteil an Wasser, das so gebunden ist, ist sehr gering. Zudem treten bei den meisten organischen Stoffen schon ab Temperaturen um 100 °C Zersetzungsprozesse auf, die sich durch ein Austreiben von organischen und aromatischen Stoffen bemerkbar machen.

- physikalisch-chemische Bindung

Die Bindungsmechanismen sind adsorptiver (Feuchtigkeitsadsorption), osmotischer (semipermeable Wand) oder struktureller (Gelbildung) Art. Eine spürbare Wärmeentwicklung (Bindungswärme) ist in diesem Fall bei einer Wiederbefeuchtung festzustellen. Material und Flüssigkeit haben ein geringeres Volumen als die Einzelvolumina vor der Feuchtigkeitsanlagerung. Das adsorbierende Material vergrößert dabei zwar sein Volumen, die Volumenzunahme des gequollenen Materials ist jedoch kleiner als das Volumen des aufgenommenen Wassers.

- physikalisch-mechanische Bindung

Physikalisch-mechanisch gebundene Feuchtigkeit ist in den Kapillaren des Körpers (Mikro- und Makrokapillaren) oder über Benetzung an die Oberfläche des Körpers gebunden. Die Oberflächenspannung und die damit einhergehende Krümmung der Flüssigkeitsoberfläche bewirken die Bindung.

Zur Erklärung der Oberflächenspannung als Bindungskraft betrachte man die ebene Grenzfläche einer Flüssigkeit. In der Flüssigkeit unterliegt jedes einzelne Molekül der Anziehungskraft aller anderen Moleküle seiner unmittelbaren Umgebung. Diese Kräfte können mechanische (sog. Van der Waalssche) oder elektrische (Coulombsche - bei dissoziierten Stoffen) sein. Dabei muss die resultierende Kraft auf das betrachtete Molekül gleich Null sein. Im Inneren gewährleistet dies die gleichmäßige Molekülverteilung. Je näher aber das Molekül an die Oberfläche der Flüssigkeit kommt, um so mehr fehlen auf der einen Seite Moleküle, die Kraft auf das betrachtete Teilchen ausüben können. Das Ergebnis ist eine bei Flüssigkeitstropfen ins Innere der Flüssigkeit gerichtete Kraft, die eine konvexe Krümmung der Oberflächen bewirkt.

Die Wirkung des Kohäsionsdrucks führt zu einer Zugspannung in der Oberflächen'haut' der Flüssigkeit. Unter der Wirkung der Oberflächenspannung

scheint der durch die Benetzung gebundene Flüssigkeitstropfen wie von einer Haut umspannt.

Kapillarkräfte weisen, wegen der konkaven Krümmung, verglichen zum Feuchtigkeitstropfen eine noch höhere Bindungskraft auf. Der Randwinkel θ ist dabei, wie bei den meisten Flüssigkeiten, $< 90^\circ$ (eine Ausnahme bildet z.B. Quecksilber). Damit entsteht in den gefüllten Kapillaren ein Unterdruck, unter dessen Wirkung die Flüssigkeit in der Kapillare anzusteigen vermag.

Setzt man im Gleichgewichtszustand den hydrostatischen Druck gleich dem Kapillardruck, so ergibt sich die kapillare Steighöhe h , wobei h als gespeicherte Energie - Bindungsenergie- aufgefasst werden kann.

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r_M \cdot \bar{g} \cdot (\rho_F - \rho_D)} \quad (20)$$

| | | |
|----------|------------|--|
| h | in [J/kg] | potentielle Energie der Flüssigkeit |
| σ | in [N/m] | Oberflächenspannung |
| θ | in [°] | Randwinkel |
| r_M | in [m] | Krümmungsradius des Flüssigkeitsmeniskus |
| ρ_F | in [kg/m³] | Dichte der Flüssigkeit |
| ρ_D | in [kg/m³] | Dichte des Dampfes |

Näherungsweise entspricht bei kleinen Kapillaren der Meniskusradius r_M dem Kapillarradius r_K . Die Dampfdichte ρ_D darf bei kleinem Druck gegenüber der Flüssigkeitsdichte ρ_F vernachlässigt werden. So gilt angenähert:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r_K \cdot \bar{g} \cdot \rho_F} \quad (21)$$

r_K in [m] Kapillarradius

Unter dem Einfluss des Kapillardrucks im Meniskus der Flüssigkeitssäule ändert sich der Dampfdruck der gebundenen Flüssigkeit. Mit der *Kelvin*-Gleichung (22) ergibt sich die Dampfdruckänderung in der Kapillare mit dem Radius $r/19$.

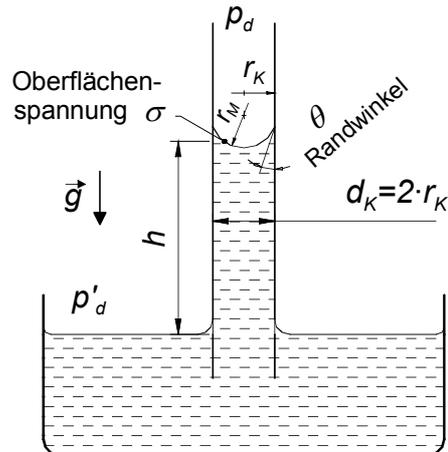


Bild 12 Dampfdrucksenkung über dem Meniskus einer Kapillare

$$\frac{p_D}{p'_D} = \varphi = \exp\left(-\frac{h}{R_D \cdot T}\right) = \exp\left(-\frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r \cdot \rho_F \cdot \bar{g} \cdot R_D \cdot T}\right) \quad (22)$$

| | | |
|-----------|-------------|--|
| p_D | in [N/m²] | Dampfdruck über dem Meniskus |
| p'_D | in [N/m²] | Satteldampfdruck über der ebenen Oberfläche der Flüssigkeit |
| R_D | in [J/kg/K] | Gaskonstante des Dampfes |
| φ | in [-] | relative Feuchtigkeit über dem Meniskus (Dampfdruckverhältnis) |
| T | in [K] | Temperatur im Gleichgewichtszustand |

Die Formel ist allerdings nur bei Kapillaren gültig, deren Radius größer als der Molekülradius (etwa 10^{-10} m) ist. Andererseits unterscheidet sich ab einem Kapillarradius von mehr als 10^{-7} m der Dampfdruck über dem Meniskus nicht mehr messbar vom Sättigungsdruck über einer ebenen Flüssigkeit.

3.3.4 Sorptionsverhalten

Der komplizierte Aufbau der organischen Zellverbände bei der Biomasse lässt eine exakte Trennung der einzelnen Bindungsarten der Gutfeuchte nicht zu.

Den Sammelbegriff aller Bindungsarten nennt man Sorption. Die Stärke der Bindung ändert sich mit dem Feuchtegehalt des Gutes und äußert sich in einer Dampfdrucksenkung über dem Material gegenüber dem Satttdampfdruck der reinen Flüssigkeit. Materialien mit beobachtbarer Dampfdrucksenkung nennt man hygroskopische Materialien. Dieses Verhalten lässt sich durch Sorptionsisothermen beschreiben, die den Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt im Material und zugehörigem Gleichgewichtsdampfdruck in der umgebenden Atmosphäre bei einer konstanten Temperatur angeben.

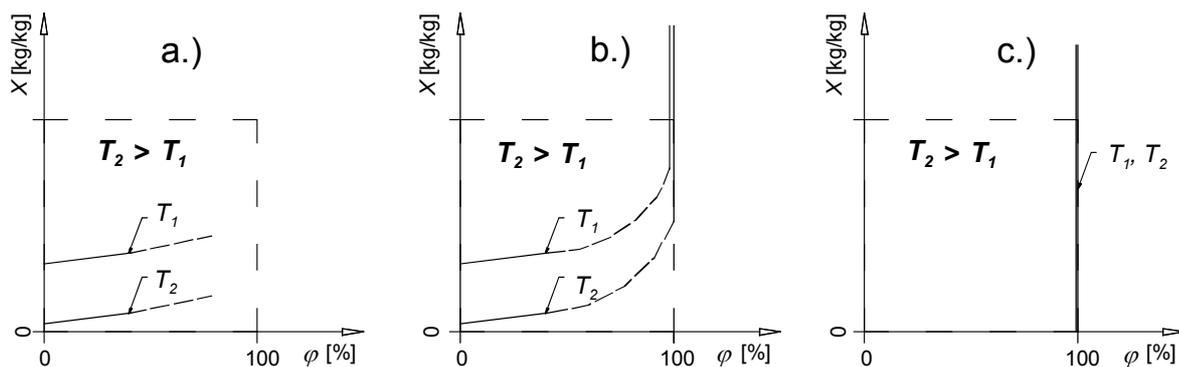


Bild 13 Qualitativer Verlauf von Sorptionsisothermen bei Temperaturen T_1 und T_2 für einen
a) voll hygroskopischen Stoff
b) Stoff mit hygroskopischem Verhalten bei geringer Feuchte und nicht-hygroskopischem Verhalten bei hoher Feuchte
c) nicht-hygroskopischen Stoff

In Bild 13 sind qualitativ die Verläufe der Sorptionsisotherme für einen voll hygroskopischen Stoff, für einen Mischstoff mit hygroskopischem Verhalten bei geringer Feuchte und nicht-hygroskopischem Verhalten bei hoher Feuchte und für einen vollkommen nicht-hygroskopischen Stoff gezeigt /16/. Dabei sind jeweils zwei Sorptionsisothermen für die niedrige Temperatur T_1 und die höhere Temperatur T_2 eingetragen.

Die Sorptionsisotherme beschreibt dabei den Feuchtezustand eines Stoffes, gleichgültig auf welche Weise die Feuchtigkeit gebunden ist. Betrachtet wird das gesamte im Material gebundene Wasser.

Bei einer kompletten Darstellung der Sorptionsisothermen für einen Stoff muss man zwischen den Gleichgewichtszuständen bei Sorption (Befeuchten) und

Desorption (Trocknen) unterscheiden. Gerade für leicht verderbliche Biomassen zeigt sich über die mit der Trocknung einhergehende Produktveränderung die Irreversibilität des Trocknungsablaufes. Die Sorptions- und Desorptionsisothermen für Wiesengras sind in Bild 15 dargestellt.

Für die Sorptionshysterese lässt sich folgende Erklärung in der Literatur finden:

- Der Gleichgewichtszustand ist noch nicht erreicht bzw. die nötige Zeit zur Einstellung des Gleichgewichtszustandes ist sehr lang; so wird z.B. ein Feuchtigkeitsausgleich von Weizenkörnern zwischen 20 und 26 % bei einer Lagertemperatur von ca. 22 °C erst nach vier Tagen erreicht /28/.
- Die Materialporen des Trocknungsgutes haben keinen einheitlichen Durchmesser. Die Poren ähneln daher Kapillaren mit wechselndem Durchmesser, die einen oberen und einen unteren Grenzwert für verschiedene Materialfeuchten besitzen.
- Der Meniskus der Poren ist bei Sorption wegen ungenügender Benetzung der Kapillarwand weniger stark gekrümmt als der Meniskus bei der Desorption, so dass beim Trocknen niedrigere Dampfdrücke im hygroskopischen Gut herrschen als beim hygroskopischen Befeuchten.

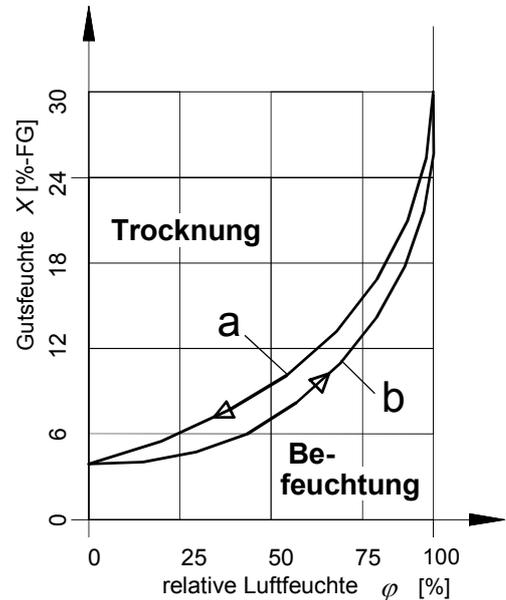


Bild 14 Hysterese von Sorptions- und Desorptionsisothermen

- a) Trocknung, Desorption
- b) Quellung, Adsorption

3.3.5 Sorptionsisothermen verschiedener Biomassen

Aus den Sorptionsisothermen lässt sich ablesen, ob ein Trocknungsgas mit seiner relativen Feuchte ϕ imstande ist, ein Gut von einer bestimmten Feuchte X zu trocknen oder nicht. Ist z.B. die relative Luftfeuchte ϕ geringer als die Gleichgewichtskurve aus Bild 14, d.h. liegt sie links der Kurve, kann das Gut getrocknet werden. Ist die Luftfeuchte höher, wird das Gut befeuchtet.

Für die Praxis ist von Bedeutung, dass die für das Verderben von landwirtschaftlichen Produkten verantwortlichen Mikroorganismen nur oberhalb eines bestimmten Feuchtegehaltes des Produktes lebensfähig sind. So gehen Maltry, Pötke, Schneider /27/ davon aus, dass bei einer relativen Feuchte unter 65 % bei Raumtemperatur die meisten Produkte konserviert werden können.

Die Sorptionsisothermen von organischen Substanzen und Materialien zeigen alle einen charakteristischen, exponentiellen Verlauf. Daher liegt es nahe, das Sorptionsverhalten durch eine Gleichung zu beschreiben. Verschiedene Modelle

sind hierzu u.a. von Lykow /26/, Langmuir /25/, BET (Brunauer, Emmett und Teller) /3/ und RRK (Rosin, Rammler und Kayser) /37/, /36/ für verschiedene Produkte aufgestellt worden. Eine allgemeine Gleichung, die den Verlauf der Sorptionsisothermen quellbarer Stoffe gut beschreibt, ist die Exponentialfunktion, die unter anderem von RRK (Rosin, Rammler und Kayser) und Henderson /15/ vorgeschlagen wurde.

Die Gleichung (23) beschreibt in der allgemeinen Form das Verhältnis aus Dampfdruck p_D und Satttdampfdruck p'_D , das als relative Gleichgewichtsfeuchte φ der Luft oder auch als Wasseraktivität a_w bezeichnet wird, wie folgt:

$$\varphi = a_w = \frac{p_D}{p'_D} = 1 - \exp[-K \cdot T \cdot X^N] \quad (23)$$

wobei K und N für das Trocknungsgut spezifische Konstanten sind und X die Gutfeuchte darstellt.

3.3.6 Sorptionsisothermen für Grüngut

Die in Bild 15 gezeigten Sorptionsisothermen für Wiesengras und Luzerne wurden von Nordenskjöld zwischen 15 bis 80 °C in Versuchen bestimmt /33/.

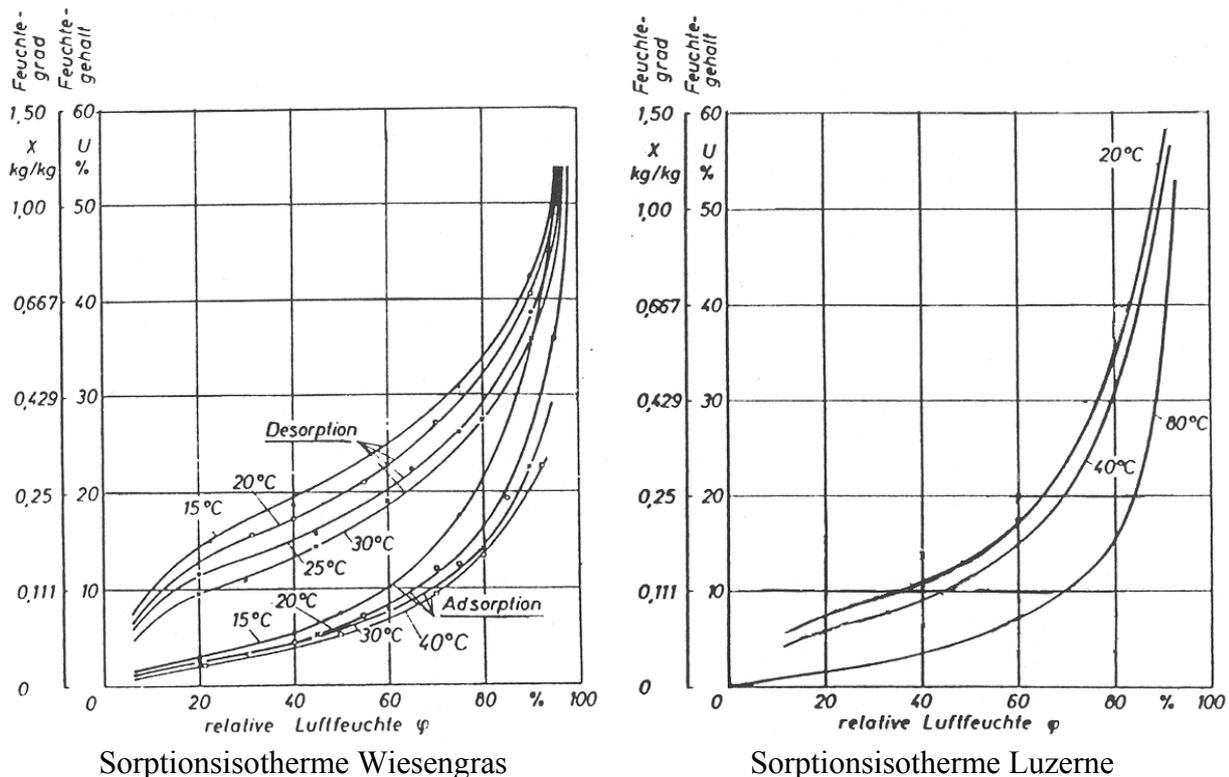


Bild 15 Sorptionsisothermen von Wiesengras und Luzerne /33/

Bei 30 °C ist zum Erreichen der gewünschten Endfeuchte von 14 %-FG für Wiesengras eine relative Luftfeuchte von ca. 40 % notwendig. Bei höheren

Guttemperaturen darf die relative Luftfeuchtigkeit zum Erreichen der Gleichgewichtsendfeuchte etwas höher sein. Luzerne weisen gegenüber Wiesengras etwa dasselbe Feuchtegleichgewicht auf. Im Bereich geringer Gutfeuchten liegt das Feuchtegleichgewicht allerdings bei etwas höherer Luftfeuchte. Auch in den Untersuchungen von Winkler /49/, die in Bild 11 für Wiesengras und Luzerne dargestellt sind, wurde ein ähnlicher Verlauf der Sorptionsisothermen ermittelt.

3.3.7 Bindungs-, Verdampfungs- und Sorptionsenthalpie

Die Sorptionsenthalpie h_{So} setzt sich aus der Verdampfungsenthalpie h_v und der Bindungsenthalpie h_B zusammen.

$$h_{So} = h_v + h_B \quad (24)$$

Dabei beinhaltet die Bindungsenthalpie h_B die gesamte Arbeit, die aufgewendet werden muss, um den Dampfdruck der gebundenen Feuchtigkeit p_F wieder auf den einer „freien“ Flüssigkeit p'_F anzuheben. Die Bindungsenthalpie wird bei der Adsorption frei und muss bei der Desorption aufgebracht werden. Die Bindungsenthalpie lässt sich nach einer, von der Clausius-Clapeyron-Gleichung abgeleiteten Beziehung (25) ausdrücken.

$$h_B = -R_F \cdot T \cdot \ln \varphi \quad (25)$$

R_F in [J/kg/K] Gaskonstante der Flüssigkeit

Durch Integration über den Feuchtebereich erhält man die Bindungsenergie:

$$\Delta h_B = \int_{x_1}^{x_2} h_B dx = -R_F \cdot \left[\frac{\partial \ln \varphi}{\partial 1/T} \right]_{\Delta x} \quad (26)$$

Über die Sorptionsisotherme kann die Bindungsenthalpie h_B über der relativen Feuchte φ der jeweiligen Gutfeuchtigkeit X im Gleichgewicht zugeordnet werden. Bei sehr niedrigen Feuchten umfasst die Bindungswärme definitionsgemäß auch Hydrations-, Umwandlungs- oder Lösungswärme. Für diese speziellen Bindungsformen kann h_B relativ große Werte erreichen. Bei Biomasse erstreckt sich diese hohe Bindungsenthalpie aber jeweils nur über einen kleinen Feuchtebereich ΔX , so dass, über den gesamten Feuchtebereich betrachtet, der Anteil nur einen geringen Betrag ausmacht /36/. Für Grüngut im Feuchtebereich bis 14 %-FG ist die Bindungsenergie Δh_B vernachlässigbar klein. Die Bindungsenthalpie ist dabei, wie die Verdampfungsenthalpie von Wasser, eine von Temperatur und Dampfdruck abhängige Größe.

3.3.8 Trocknungsverlauf / Trocknungsgeschwindigkeit

Die Trocknungsgeschwindigkeit wird von Krischer /20/ als Wasserverdampfungs-
geschwindigkeit pro spezifische Oberfläche des Trocknungsgutes definiert:

$$\frac{\dot{m}_{H_2O}}{A} = \frac{\text{verdampfte Wassermenge}}{\text{Gutoberfläche} \cdot \text{Zeit}} \quad \text{in} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{sec}} \right] \quad (27)$$

Dabei stellt man im Allgemeinen für hygroskopische Güter den in Bild 16
gezeigten Verlauf der Trocknungsgeschwindigkeit mit drei Abschnitten fest.

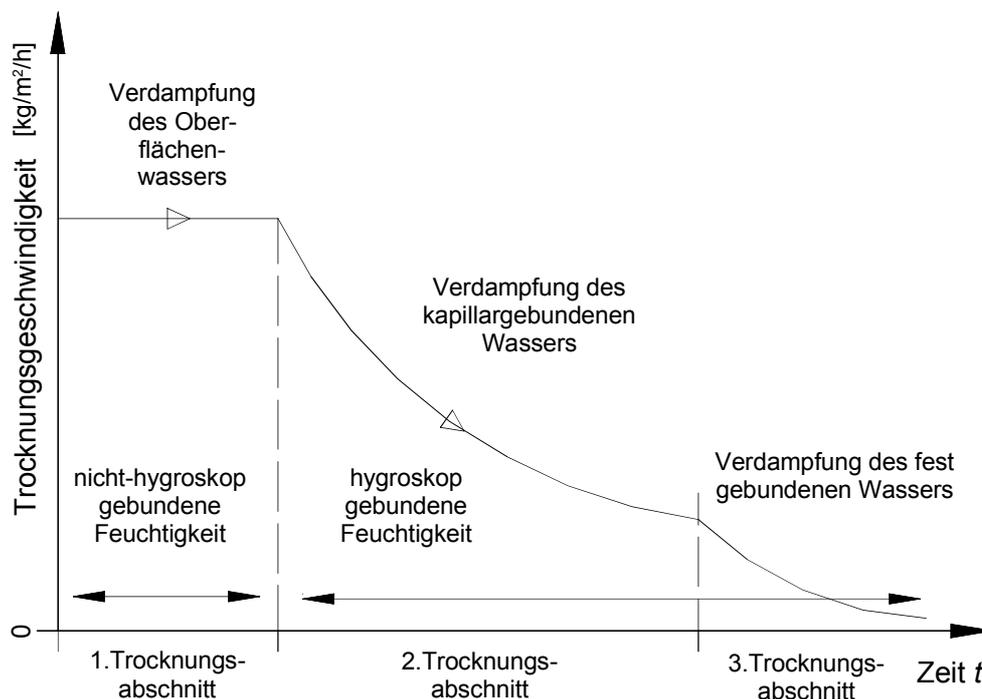


Bild 16 Typischer Verlauf der Trocknungsgeschwindigkeit

Voraussetzung für den Verlauf der Trocknung nach Bild 16 ist, dass bei zeitlich konstanten Trocknungsbedingungen, also bei gleichbleibender Temperatur, Gasfeuchte und Geschwindigkeit das Trocknungsprodukt vom Trocknungsmedium umströmt wird.

1. Trocknungsabschnitt

Im ersten Trocknungsabschnitt kann praktisch keine Abhängigkeit der Verdampfungsgeschwindigkeit von der Gutfeuchte festgestellt werden. Die Gutoberfläche gleicht daher einer freien Flüssigkeitsoberfläche /19/.

Dabei verdunstet als erstes das äußerlich anhaftende oder dicht unter der Oberfläche befindliche Wasser. Durch die Verdunstung und damit Abtrocknung der Oberfläche, stellt sich ein Feuchtetransport aus dem Gutinneren an die

Produktoberfläche ein. Bei hohen Gutfeuchten beruht der Transport der Flüssigkeit zur Gutoberfläche im wesentlichen auf kapillarer Leitung. Die feineren Kapillaren saugen solange Flüssigkeit aus den größeren Kapillaren, Hohlräumen oder Zellen, bis diese nahezu entleert sind. Nach außen hin wirkt der erste Trocknungsabschnitt daher als quasi Beharrungszustand, solange die Kapillarkräfte groß genug sind, um die an der Oberfläche verdunstende Wassermenge aus dem Gutinneren nachzufördern. Dieser Trocknungsabschnitt endet, wenn in den äußeren Bereichen des Gutes die maximale hygroskopische Feuchte $X_{hygr,max}$, auch Fasersättigung genannt, unterschritten wird. Bei der weiteren Entfeuchtung bilden sich in den noch gefüllten, feinen Kapillaren Flüssigkeitsmenisken aus, die eine Dampfdruckabsenkung bewirken.

2. Trocknungsabschnitt

Im zweiten Trocknungsabschnitt macht sich der Einfluss der kleineren Poren mit stärker gekrümmten Menisken und damit größeren kapillaren Zugkräften bemerkbar. In größeren, schon teilentleerten Kapillaren bilden sich ebenfalls stark gekrümmte Kapillarradien aus. Durch die Dampfdruckabsenkung ist jetzt für die Verdunstung nicht mehr wie vorher der Sattdampfdruck, sondern der geringere Partialdampfdruck wirksam. Die Trocknungsgeschwindigkeit ist jetzt nicht mehr konstant, sondern verringert sich. Dies zeigt sich in einem Knick im Kurvenverlauf. Während des Fortgangs der Trocknung wandert die Trocknungsfront bis in das Innere des Trocknungsgutes. Der ausgetriebene Wasserdampf muss dabei einen immer längeren Diffusionsweg durch die schon ausgetrockneten Kapillaren zurücklegen.

Das Ende des zweiten Trocknungsabschnitts ist durch einen weiteren, allerdings weniger markanten Knick im Verlauf der Trocknungsgeschwindigkeit gekennzeichnet.

3. Trocknungsabschnitt

Zu Beginn des dritten Trocknungsabschnitts ist das Trocknungsgut weitgehend von physikalisch gebundener Feuchtigkeit frei und in den Poren herrscht ein weit unter dem Sattdampfdruck liegender Partialdruck.

Für den Transport der Feuchtigkeit vom Inneren an die Oberfläche sind nun nicht mehr Kapillarkräfte entscheidend. Molekulare Bindungskräfte unterdrücken dabei mehr und mehr den Stofftransport. Ein Stoffaustausch erfolgt nun über die Dampfdiffusion in den luftgefüllten Poren.

Als Gleichgewichtsfeuchte bezeichnet man den stationären Zustand, in dem der Stoffaustausch zwischen Trocknungsgut und Trocknungsmedium im Gleichgewicht steht.

3.3.9 Kühlgrenztemperatur

Die Kühlgrenztemperatur spielt in der Trocknungstechnik eine wichtige Rolle, da diese Temperatur sich in einem leicht zu trocknenden Stoff während der Trocknung über weite Bereiche der Gutfeuchte einstellt. Zudem wird die Kühlgrenztemperatur oft zur Messung der Luftfeuchtigkeit verwendet. Voraussetzung ist allerdings, dass eine Analogie zwischen Wärme- und Stofftransport, wie beim System Wasser-Luft ($Le \approx 1$), gegeben sein muss und dass weder zu viel, noch zu wenig Flüssigkeit vorhanden ist, so dass sich ein stationärer Zustand einstellen kann.

Das Modell geht dabei von einem Trocknungsgas der Temperatur $T_{tr.G}$ und der Gasfeuchte $x_{tr.G}$ aus, das an der Oberfläche des mit beliebiger Temperatur vorliegenden Trocknungsgutes vorbeistreicht. An der Gutoberfläche herrscht dabei, entsprechend der Guttemperatur T_{Gut} , der Partialdampfdruck $p_D(T_{Gut})$. Bei hygroskopischen Stoffen ist der Oberflächenpartialdruck aus der Sorptionsisotherme zu ermitteln. Strömt das Trocknungsgas an dem Produkt vorbei, bildet sich nach einiger Zeit ein Gleichgewicht aus, bei dem sich ein stationärer Wärmestrom \dot{q} an die Gutoberfläche und ein stationärer Dampfstrom \dot{m}_{H_2O} von der Gutoberfläche weg einstellt. Die Verdunstungsenthalpie des abgeführten Dampfes entspricht dem zugeführten Wärmestrom des Trocknungsgases. Die Temperatur, die sich in diesem Gleichgewichtszustand im Trocknungsprodukt einstellt, nennt man die Kühlgrenztemperatur T_{KGT} . Diese Kühlgrenztemperatur stellt sich dabei immer ein, gleich ob die anfängliche Guttemperatur höher oder niedriger gelegen hat.

$$\dot{m}_{tr.G} = \dot{m}_{KGT} \quad (\text{Masse des trockenen Gases}) \quad (28)$$

$$x_{tr.G} \cdot \dot{m}_{tr.G, zu} + \Delta m_{H_2O} = x_{KGT} \cdot \dot{m}_{KGT} \quad (\text{Masse Wasser}) \quad (29)$$

$$\dot{m}_{tr.G} \cdot h_{1+x, tr.G} + \Delta m_{H_2O} \cdot h_{H_2O} = \dot{m}_{KGT} \cdot h_{1+x, KGT} \quad (\text{Energiebilanz}) \quad (30)$$

$$h_{1+x, tr.G} + (x_{KGT} - x_{tr.G}) \cdot \bar{c}_{p, H_2O} \cdot T_{KGT} = \bar{c}_{p, tr.G} \cdot T_{KGT} + x_{KGT} \cdot (\Delta h_{0^\circ C} + \bar{c}_{p, D} \cdot T_{KGT}) \quad (31)$$

\bar{c}_{p, H_2O} in [kJ/kg/K] spezifische Wärmekapazität von flüssigem Wasser

$\bar{c}_{p, D}$ in [kJ/kg/K] spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf

$\bar{c}_{p, tr.G}$ in [kJ/kg/K] spezifische Wärmekapazität des trockenen Gases

$\Delta h_{0^\circ C}$ in [kJ/kg] spezifische Verdampfungsenthalpie von Wasser bei 0 °C

Die Aufstellung der Massebilanzen (28), (29) und Energiebilanz (30) führt zur Gleichung (31) mit den zwei abhängigen Variablen T_{KGT} und $x_{KGT} = f(p_{D, KGT}, T_{KGT})$. Diese Gleichung kann mit Hilfe der Sattdampfkurve $p_D = f(T_{KGT})$ iterativ gelöst werden.

Die Kühlgrenztemperatur hat für die Trocknungstechnik eine besondere Bedeutung, da die Guttemperatur über weite Feuchtebereiche sehr viel niedriger bleibt und so das Produkt vor einer Überhitzung schützt. Für viele temperaturempfindliche Stoffe macht dieser Kühleffekt eine schnelle thermische Trocknung mit erhöhten Temperaturen erst möglich.

3.3.10 Obere Produkttemperatur

Häufig erfordert das Trocknungsprodukt, dass während des Trocknungsvorgangs eine maximale Produkttemperatur nicht überschritten wird. Je nach Sorptionsgleichgewicht, Dampfdruck und Temperatur des Trocknungsgases und der Geschwindigkeit der Feuchtigkeitsabgabe stellen sich beim Trocknungsvorgang über die Kühlgrenztemperatur an der Gutoberfläche ebenfalls die Produkttemperatur im Trocknungsgut ein.

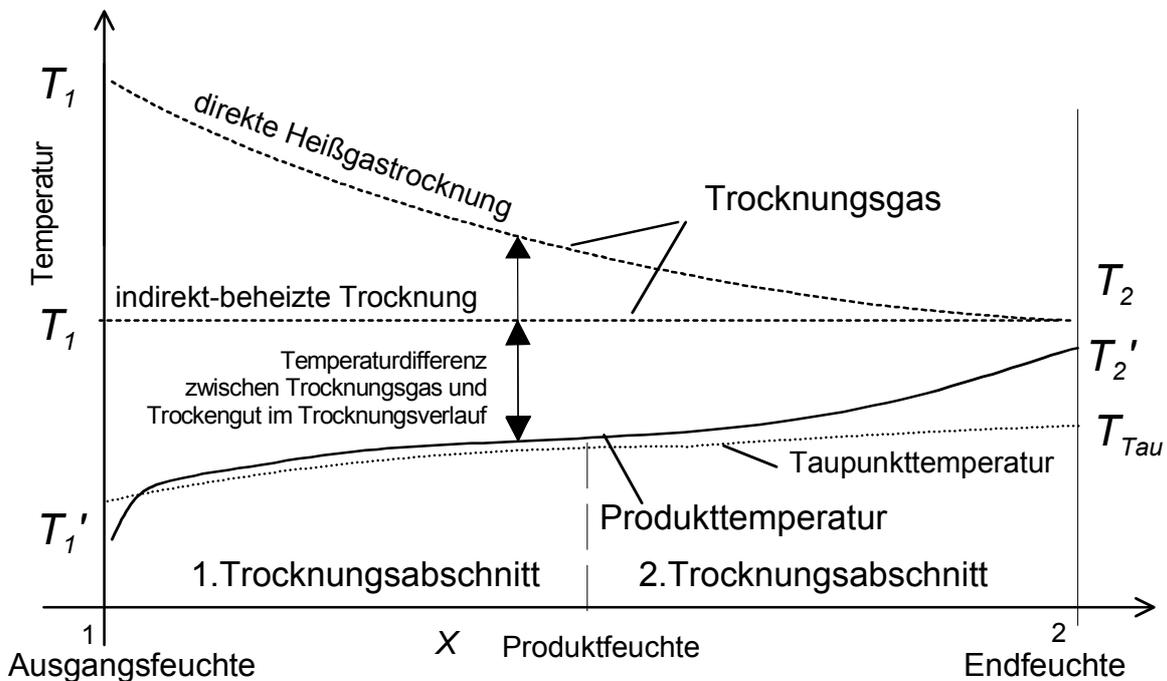


Bild 17 Temperaturverlauf im Trocknungsgut bei der thermischen Trocknung

| | | |
|-----|-----------|---|
| mit | T_1 | Eintrittstemperatur heiße Trocknungsgase |
| | T_1' | Eintrittstemperatur kaltes Trocknungsgut |
| | T_2 | Austrittstemperatur abgekühlte Trocknungsgase |
| | T_2' | Austrittstemperatur warmes Trocknungsgut |
| | T_{Tau} | Taupunkttemperatur des Trocknungsgases |

Wie in Bild 17 beispielhaft dargestellt ist, kommt es infolge der nicht mehr ausreichenden Selbstkühlung bei praktisch allen Produkten gegen Ende der Trocknung bei schon niedrigem Wassergehalt zu einem Anstieg der Temperatur des Trocknungsgutes. Beinhaltet das Trocknungsgut temperaturempfindliche Be-

standteile, wie z.B. Eiweißstoffe, treten dabei unerwünschte Zersetzungsprozesse auf. Sind leichtflüchtige Stoffe im Trocknungsgut vorhanden, werden diese vermehrt bei höheren Temperaturen ausgetrieben.

Als Beispiel aus der Nahrungsmittelindustrie sei die Zwiebeltrocknung genannt. Hier führen bereits Temperaturen über 60 °C zu erheblichen Qualitätseinbußen.

Für Grüngut als Futtermittel sind diese Anforderungen an die Qualität von geringer Bedeutung. Wegen der hohen Wasserabgabebereitschaft von Grüngut tritt nur eine geringe Temperaturbelastung bei der Trocknung bis zur Endfeuchte auf. Zudem stellt die Milchkuh als Konsument des Trockengrüns keine hohen Ansprüche an die Qualität. Selbst Trockengrün mit einem Schwelgeruch wird anstandslos aufgenommen.

Trotzdem muss unbedingt vermieden werden, dass sich das Trocknungsgut so stark erhitzt, dass es zu einer Verschwelung oder sogar zu einer Entflammung kommt. Ein Brand in einer Trocknungsanlage kann zur Zerstörung der Gesamtanlage führen, da durch die zirkulierende Trocknungsluft ständig neuer Sauerstoff an ein Glutnest herangeführt wird und Funkenflug die Ausweitung des Feuers beschleunigt.

4 Thermodynamische Grundlagen der Trocknungstechnik

Im Folgenden sollen die für die Trocknung wichtigen Begriffe definiert und die thermodynamischen Grundlagen besprochen werden. Das Trocknungsmedium wird dabei fortan vereinfachend als Trocknungsluft bezeichnet, auch wenn es eigentlich aus einem Luft-Wasserdampfsgemisch besteht. Die Stoffeigenschaften der Trocknungsluft mit zunehmendem Wasserdampfanteil sollen betrachtet werden, um Aussagen treffen zu können, welche Atmosphäre für den Betrieb einer Trocknungsanlage günstig ist.

Mit den Stoffeigenschaften können Masse- und Energiebilanzen zur Beschreibung der Vorgänge in einer Trocknungskammer entwickelt und damit über die Kenngrößen des Trocknungs- und Systemnutzungsgrades eine vergleichende Abschätzung zwischen Heißluft- und Niedertemperatursystemen und Durch- und Umlufttrocknern durchgeführt werden. Die benötigte Gebläseleistung lässt sich dabei über den Druckabfall des Trocknersystems bestimmen.

4.1 Definitionen zum Trocknungsmedium

4.1.1 Dichte und Partialdruck

Unter Trocknungsmedium soll das Gas verstanden werden, das dem Trocknungssystem zugeführt wird und das Wasser des Trocknungsgutes aufnimmt. Da sich der Trocknungsprozess praktisch bei Umgebungsdruck abspielt, kann ohne größere Ungenauigkeiten die Zustandsgleichung des idealen Gases für die Berechnung seiner Zustandsgrößen verwendet werden. Die Dichte wird dann eine einfache Funktion von Druck, Temperatur und der Gaskonstante R des Gases.

$$\rho = \frac{p}{T \cdot R} \quad \text{in} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{Pa} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}}{\text{K} \cdot \text{J}} \right] \quad (32)$$

Der Gesamtdruck p des Gases setzt sich dabei aus den Partialdrücken p_i der einzelnen Gaskomponenten zusammen. Bei einem Trocknungsprozess bietet sich die Unterscheidung der Partialdrücke von trockener Luft oder Rauchgas $p_{r,G}$ und dem ausgetriebenen Wasserdampf p_D an.

$$p = \sum_i p_i = p_{r,G} + p_D \quad \text{in [Pa]} \quad (33)$$

Zur Aufstellung von Bilanzgleichungen für das Trocknungssystem ist die Berechnung des Gasgemisches aus den Massen der Einzelgase notwendig, wobei unter der Voraussetzung, dass sich alle Komponenten wie ideale Gase verhalten, eine einfache Addition der Werte der einzelnen Anteile angesetzt werden darf.

Zudem gilt bei stationären Bedingungen innerhalb der Systemgrenzen das Gesetz des Masseerhalts.

$$\dot{m}_{Gas} = \dot{m}_{N_2} + \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{CO_2} + \dots = \sum_i \dot{m}_i \quad \text{in } \left[\frac{kg}{sec} \right] \quad (34)$$

Das verdampfte Wasser kann bei niedrigem Druck als Komponente dem Trocknungsmedium additiv zugefügt werden. Wegen der dadurch erfolgten Zunahme an Gesamtmasse wird oft für Berechnungen ein Bezug auf das trockene Gas $\dot{m}_{tr.G.}$ ohne Wasseranteil gewählt.

$$\dot{m}_{tr.G.} = \dot{m}_{N_2} + \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{CO_2} + \dots = \dot{m}_{Gas} - \dot{m}_{H_2O} \quad \text{in } \left[\frac{kg}{sec} \right] \quad (35)$$

Bei fast allen Trocknungsanwendungen wird als Trocknungsgas Umgebungsluft verwendet. Das Trocknungsgas wird daher, wie bereits erwähnt, oft als Trocknungsluft, unabhängig von der Zusammensetzung, bezeichnet.

4.1.2 Relative Luftfeuchte des Trocknungsgases

In einem feuchten Gasgemisch nimmt der Wasserdampf einen Teil des Gesamtgasdruckes ein, der als Partialdruck p_D des Wasserdampfes bezeichnet wird. Dabei kann dieser nur bis zur Sättigungsgrenze ansteigen, die durch die Dampfdruckkurve $p'_D = p_{Sat}(T_{Gas})$ gegeben ist. Darüber hinaus werden Wassertröpfchen auskondensiert. Der Quotient aus dem herrschenden Wasserdampfpartialdruck p_D zum Sättigungsdampfdruck p'_D bei der Gastemperatur T_{Gas} wird relative Luftfeuchte φ genannt.

$$\varphi = \frac{p_D}{p'_D(T_{Gas})} \quad \text{in } \left[\frac{hPa}{hPa} \right], [\% \text{-rel. F.}] \quad (36)$$

Die relative Luftfeuchte ist wegen des Sättigungsdrucks p'_D stark temperaturabhängig und ihr Wert nur dann aussagekräftig, wenn die Gastemperatur mit angegeben wird. Bei Temperaturen unter 0 °C muss zudem zwischen dem Wasserdampfdruck über Wasser oder Eis unterschieden werden.

Der Wert der relativen Luftfeuchte ist für Trocknungsprozesse von großer Bedeutung. Dadurch ist festgelegt, ob eine Trocknung oder eine Befeuchtung eines Stoffes bei dem jeweiligen vorliegenden Zustand des Trocknungsgases und des Trocknungsgutes stattfindet.

4.1.3 Absolute Feuchte des Trocknungsgases

Wegen der Temperaturabhängigkeit der relativen Feuchte gibt man in der Trocknungstechnik gerne die absolute Feuchte eines Gasgemisches an. Dabei setzt man die Massen von Wasserdampf m_D und dem trockenen Gas $m_{tr.G.}$ ins

Verhältnis und bekommt so den Bezug Wassermasse zur Masse des trockenen Gases.

$$x = \frac{m_D}{m_{tr.G}} = \frac{R_{tr.G} \cdot p_D}{R_D \cdot p_{tr.G}} = \frac{R_{tr.G}}{R_D} \cdot \frac{p_D}{p_{ges} - p_D} \quad \text{in} \left[\frac{\text{kg}_D}{\text{kg}_{tr.G}} \right] \quad (37)$$

Mit Gleichung (37) kann man auch aus dem Wasserdampfpartialdruck p_D und dem Umgebungsluftdruck p_{ges} die absolute Feuchte x berechnen.

4.1.4 Gasmischung

Mit der Anreicherung von Wasserdampf in der Trocknungsluft verändern sich die Stoffeigenschaften des Trocknungsmediums entsprechend.

Bei Trocknungsgas, das sich aus Wasserdampf und trockener Luft zusammensetzt, berechnet sich die Gaskonstante R der Mischung aus den Gaskonstanten R_L der trockenen Luft bzw. des Rauchgases und R_D des Wasserdampfes entsprechend den Masseanteilen, die wiederum aus der Feuchtebelastung x in $\left[\frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{kg}_{tr.L}} \right]$ bestimmt werden können.

$$R = \frac{R_L + x \cdot R_D}{1 + x} \quad \text{in} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad (38)$$

In Bild 18 ist für trockene Luft und Wasserdampf in zunehmendem Mischungsverhältnis die allgemeine Gaskonstante R und die molare Masse M der Gasmischung aufgetragen. Die Gaskonstante R bestimmt die Dichte des Gasgemisches.

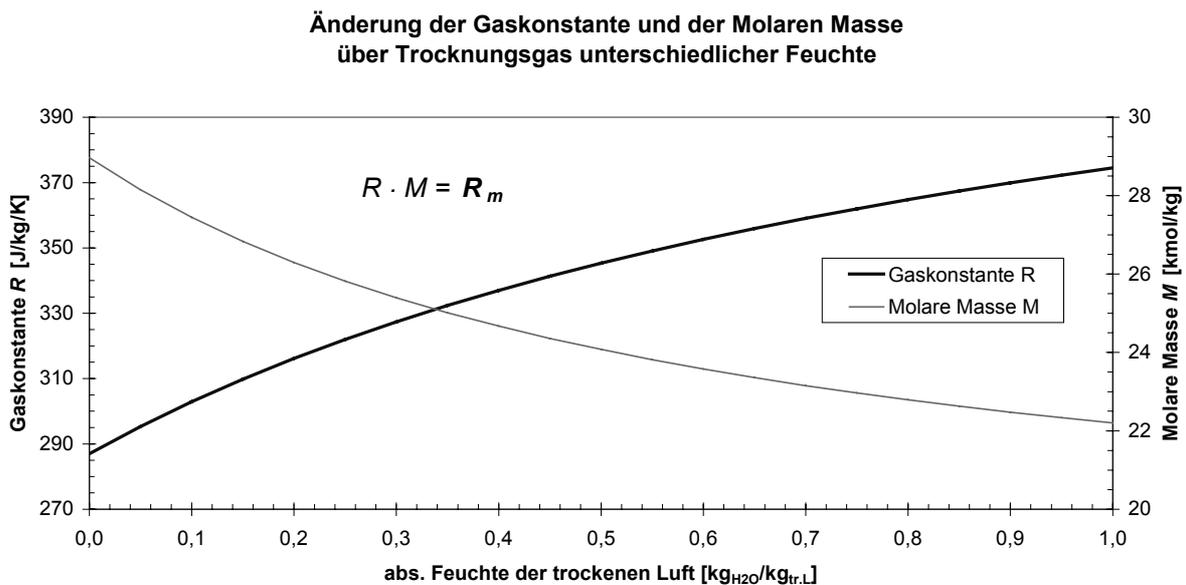


Bild 18 Gaskonstante R und Molare Masse M des Gasgemisches in Abhängigkeit von der Feuchte ($R_m = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$)

4.1.5 Dichte des Gasgemisches

Die Dichte des Trocknungsgases ändert sich während des Trocknungsvorgangs vor allem durch die Abkühlung und die Zumischung von Wasserdampf. In Bild 19 sind die Gasdichten ρ für die Trocknungstemperaturen von 40, 80, 120, 160, 200, 360, 520 und 920 °C aufgetragen. Dabei wird wieder eine Mischung von trockener Luft mit Wasserdampf bis zu gleichen Gewichtsanteilen betrachtet. Zudem ist auch die theoretische Dichtekurve für 0 °C mit eingetragen. Die Gasdichte wurde über Gleichung (32) berechnet.

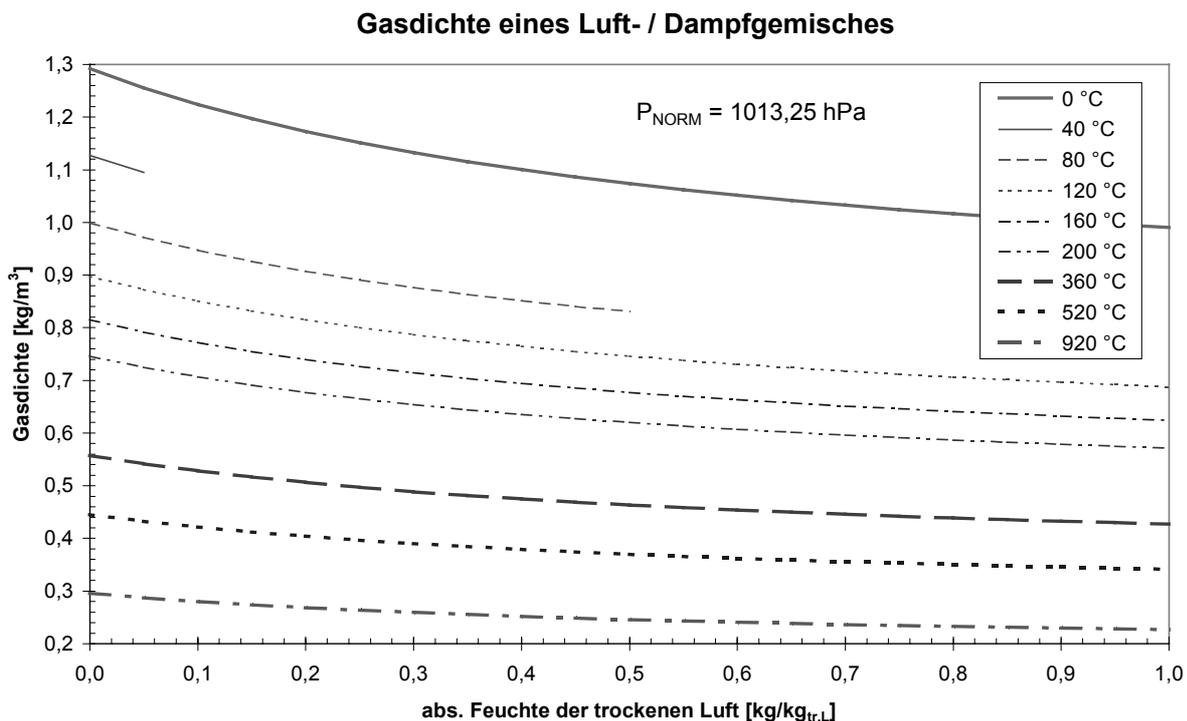


Bild 19 Darstellung der Gasdichte ρ in $[\text{kg}/\text{m}^3]$ bei Normdruck (1013,25 hPa) über der Gasfeuchte

Ein zunehmender Anteil an spezifisch leichterem Wasserdampf im Trocknungsgas führt zu einer merklichen Absenkung der Dichte. In Bild 19 ist der Dichterückgang für jeweils gleiche Gastemperaturen aufgetragen.

4.1.6 Spezifische Wärmekapazität des Gasgemisches

Die spezifische Wärmekapazität c_p gibt an, welche Energie von der Trocknungsluft bei einer Temperaturerhöhung aufgenommen bzw. bei einer Temperaturabsenkung abgegeben und damit transportiert werden kann. In Bild 20 ist die spezifische auf die Masse bezogene Wärmekapazität c_p des Trocknungsgasgemisches nach Gleichung (39) für verschiedene Temperaturen aufgetragen.

$$\bar{c}_p = \frac{\bar{c}_{p,tr.G} + x \cdot \bar{c}_{p,D}}{1+x} \quad \text{in} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad (39)$$

Mit zunehmender Wasserdampfbeimischung steigt die spezifische Wärmekapazität des Trocknungsgases stark an. Dies liegt an der höheren Wärmekapazität von Wasserdampf ($\bar{c}_{p,D} \approx 1,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ bei 100 °C und 50 mbar) gegenüber trockener Luft ($\bar{c}_{p,tr.G} \approx 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ bei 100 °C). Für den Trocknungsprozess bedeutet dies, dass bei einem feuchten Trocknungsgas für den Wärmetransport weniger Masse bewegt werden muss.

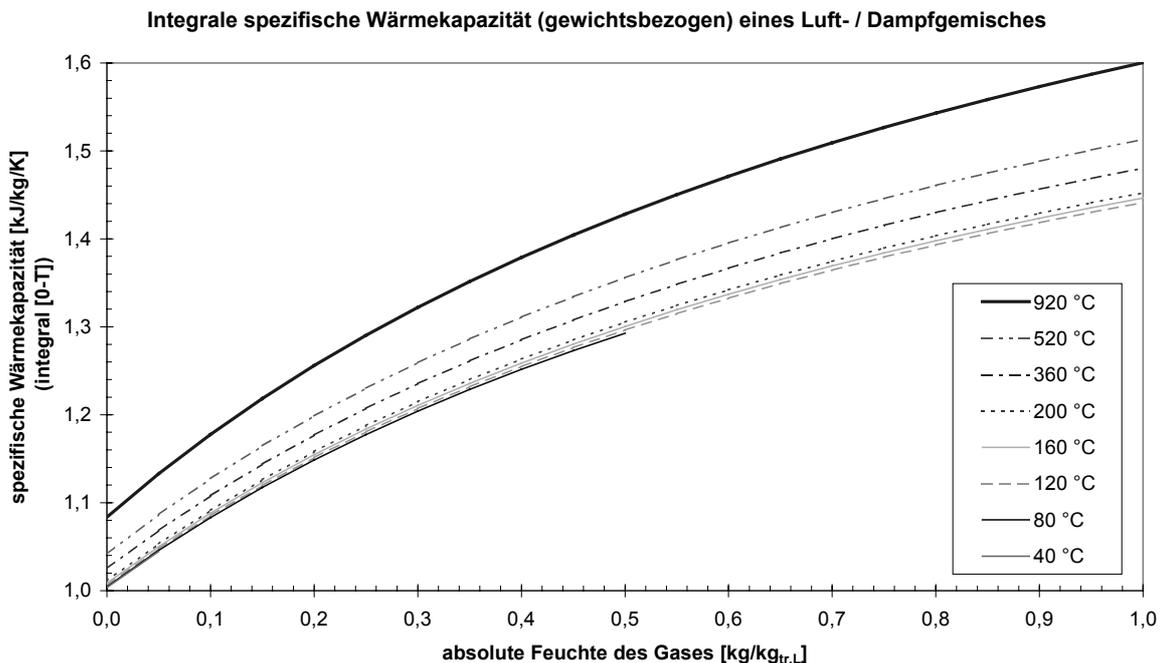


Bild 20 Spezifische Wärmekapazität (gewichtsbezogen) über der Gasfeuchte

Um den Einfluss der Gasmischung auf die Gebläseleistung einer Trocknungsanlage zu erfassen, muss die Wärmekapazität C bezogen auf das Volumen betrachtet werden. Wie aus Bild 21 zu ersehen ist, steigt die auf das Volumen bezogene Wärmekapazität weniger stark an. Dies resultiert aus der mit der Aufsättigung gleichzeitig stattfindenden Dichteänderung des Gemisches. Ein Trocknungsgas mit einem Dampf-/ Luftverhältnis von 1:2 hat damit eine um ca. 7 % und ein Trocknungsgas vom Verhältnis 1:1 sogar eine um ca. 10 % höhere spezifische Wärmekapazität C als trockene Luft.

Eine Trocknung mit einem Trocknungsgas mit höherem Dampfgehalt weist aufgrund der thermodynamisch günstigeren Eigenschaften des Dampfes energetische Vorteile gegenüber der reinen Lufttrocknung auf.

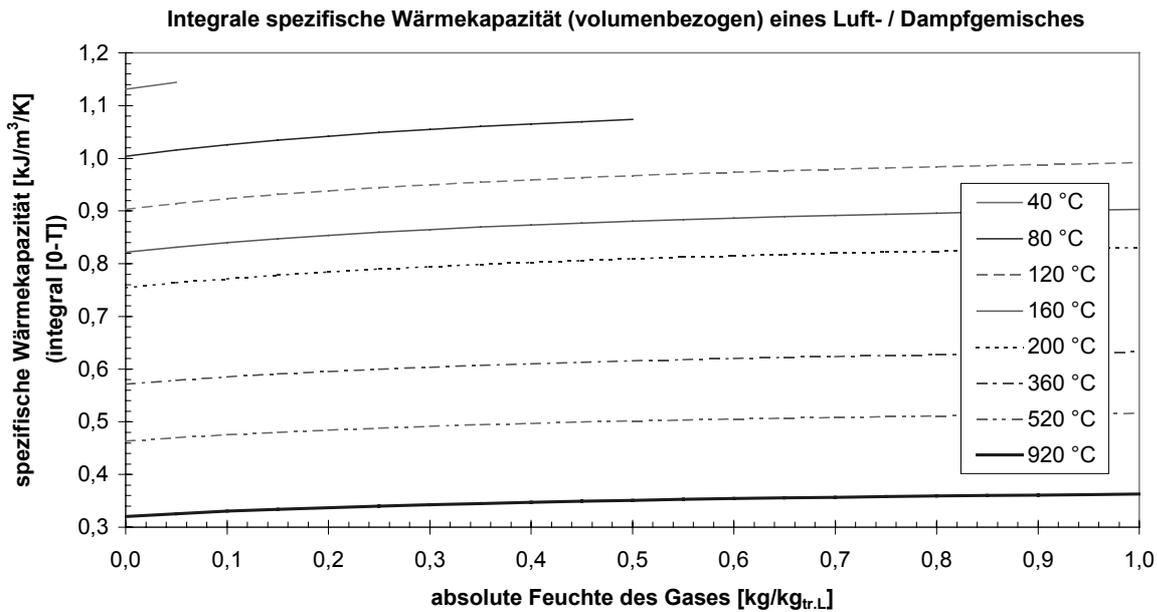


Bild 21 Spezifische Wärmekapazität (volumenbezogen) über der Gasfeuchte

4.1.7 Viskosität des Gasmisches

Die dynamische Viskosität η ist ein Maß für die Zähigkeit eines Gases. Die Zähigkeit bestimmt den Strömungswiderstand und damit die aufzubringende mechanische Leistung für die Strömung des Trocknungsgases. Aus Bild 22 erkennt man, dass mit zunehmender Anreicherung der Trocknungsluft mit Wasserdampf die Zähigkeit und damit der Strömungswiderstand bei gleicher Gastemperatur zurückgeht. Der Transport eines wasserdampffreien Gases erfordert weniger mechanische Energie als der eines trockenen Gases.

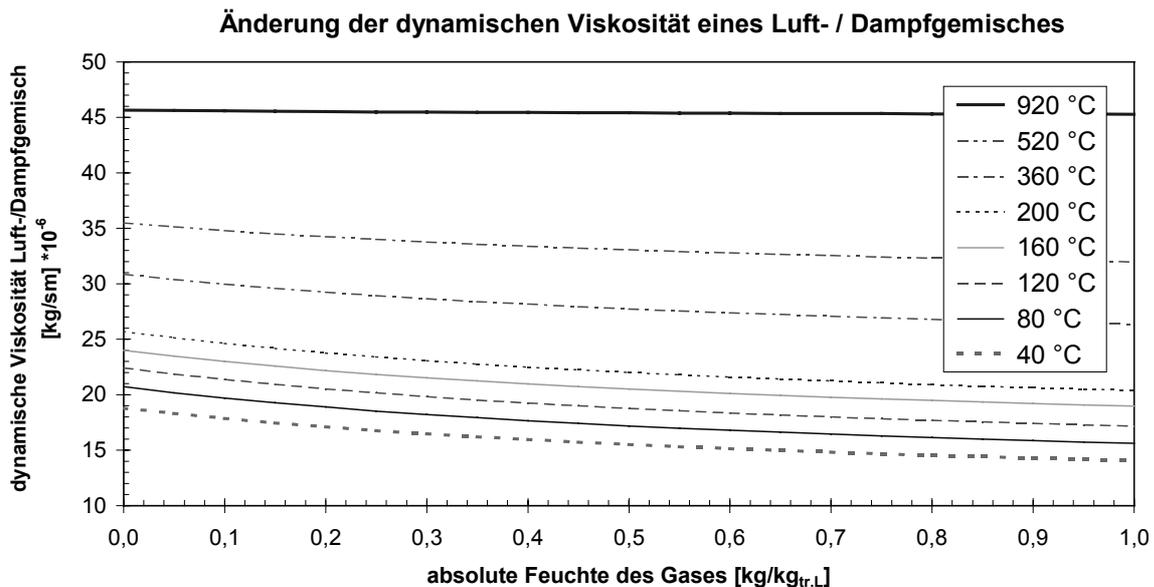


Bild 22 Dynamische Viskosität η des Luft-/Dampfgemisches über der Gasfeuchte x

4.2 Bilanzen für den konvektiven Trockner

Die konvektive Trocknung zeichnet sich dadurch aus, dass der im Trocknungsgut enthaltene Wasseranteil durch Verdampfen an das Trocknungsmedium abgegeben wird, das Trocknungsmedium die dafür benötigte Energie bereitstellt und das verdampfte Wasser mit dem Trocknungsmedium schließlich aus dem Trockner ausgeht. Das Trocknungsmedium muss beim Eintritt in den Trockner durch eine entsprechend hohe Temperatur über ein Trocknungspotential verfügen, das es erlaubt, die Feuchtigkeit aus dem Produkt zu lösen und vom flüssigen Zustand durch Zufuhr der Verdampfungsenthalpie in den gasförmigen Zustand zu überführen. Am Austritt aus dem Trockner muss die Trocknungsgastemperatur noch so hoch sein, dass der Wasserdampf nicht rükkondensiert.

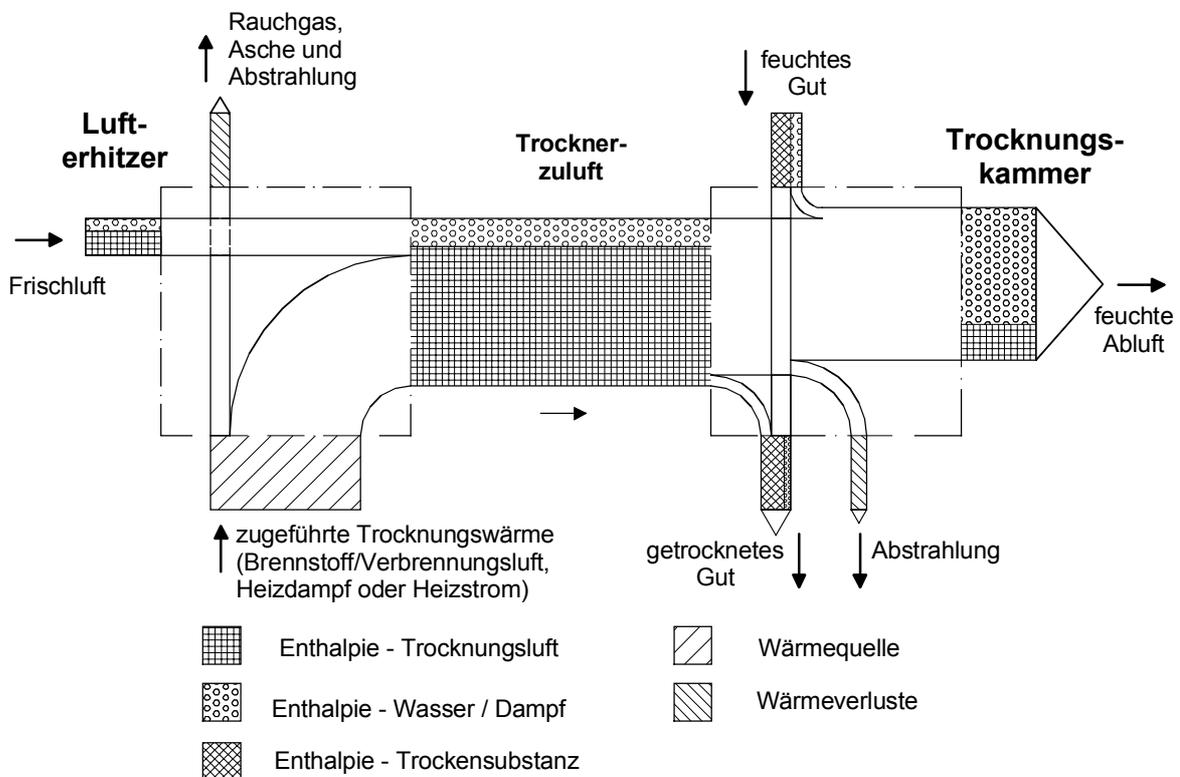


Bild 23 Schematische Darstellung der Stoff-/Energieströme einer Trocknungsanlage

Für die hier angestellten Betrachtungen über Trocknungsanlagen werden diese auf eine Trocknungskammer vereinfacht, in der der Stoff- und Wärmetransport zwischen Trocknungsgas und Trocknungsgut stattfindet. Dabei werden der Gasstrom und der Produktstrom am Ein- und Austritt der Trocknungskammer bilanziert. Die Trocknungskammer kann in erster Näherung als adiabatisch betrachtet werden. Über die Erhaltungssätze von Energie und Masse lassen sich die zur Prozessbeschreibung wichtigen Gleichungen für den stationären Zustand ableiten. Weiter ist es zweckmäßig, den Energiebilanzraum des Trocknersystems, in dem der Produktkontakt mit Verdampfung stattfindet, getrennt vom System des

Lufterhitzers einer Trocknungsanlage zu betrachten. Die Wärmezufuhr, die zu der Enthalpieerhöhung des Trocknungsmediums führt, kann dabei sowohl aus direkter Verbrennung als auch indirekter Beheizung über einen Wärmeübertrager stammen. In Bild 23 ist das Schema zum Energiefluss für ein Trocknungssystem mit Lufterhitzer und Trocknerkammer dargestellt.

Trocknersystem

Über die Systemgrenzen des Trockners fließen vier Ströme:

- der Ein- und Austrittsstrom des Trocknungsmediums und
- der Ein- und Austrittsstrom des Trocknungsgutes.

Der Bilanzraum Trockner ist in Bild 24 dargestellt. Bei dieser Betrachtung werden keine Wärmeverluste an die Umgebung berücksichtigt, da die Verluste durch eine Isolation der Trocknungskammer meist weniger als 1 % der ausgetauschten Wärmemenge betragen.



Bild 24 Bilanzraum Trockner

| | | | | |
|---------------------|----------------|---------------|-----------|--|
| $\dot{m}_{Gas,ein}$ | Massestrom und | $h_{Gas,ein}$ | Enthalpie | des Trocknungsmediums, Eintritt Gasstrom |
| $\dot{m}_{Gas,aus}$ | Massestrom und | $h_{Gas,aus}$ | Enthalpie | des Trocknungsmediums, Austritt Gasstrom |
| \dot{m}_{FG} | Massestrom und | h_{FG} | Enthalpie | des Trocknungsgutes, Feuchtgut (FG) |
| \dot{m}_{TG} | Massestrom und | h_{TG} | Enthalpie | des Trocknungsgutes, Trockengut (TG) |

Daraus folgt die Energiebilanz:

$$\dot{m}_{Gas,ein} \cdot h_{Gas,ein} + \dot{m}_{FG} \cdot h_{FG} = \dot{m}_{Gas,aus} \cdot h_{Gas,aus} + \dot{m}_{TG} \cdot h_{TG} \quad (40)$$

Die Energiebilanz nach Gleichung (40) lässt sich weiter vereinfachen und daraus lassen sich Berechnungsformeln für den Trocknungsprozess ableiten. Hierfür bietet es sich an, die Masseströme in den Wasseranteil und den Trockengas- bzw. Trockengutanteil aufzuteilen. Zweckmäßig ist es, dabei auch zwischen den Wasseranteilen zu unterscheiden, die am Trocknungsprozess beteiligt sind und damit einem Phasenwechsel unterliegen und solchen, die nur durch die Anlage durchgeschleust werden und sich dabei erwärmen oder abkühlen. Die Enthalpien drückt man durch die entsprechenden Temperaturen und die integralen Wärmekapazitäten der Stoffe aus.

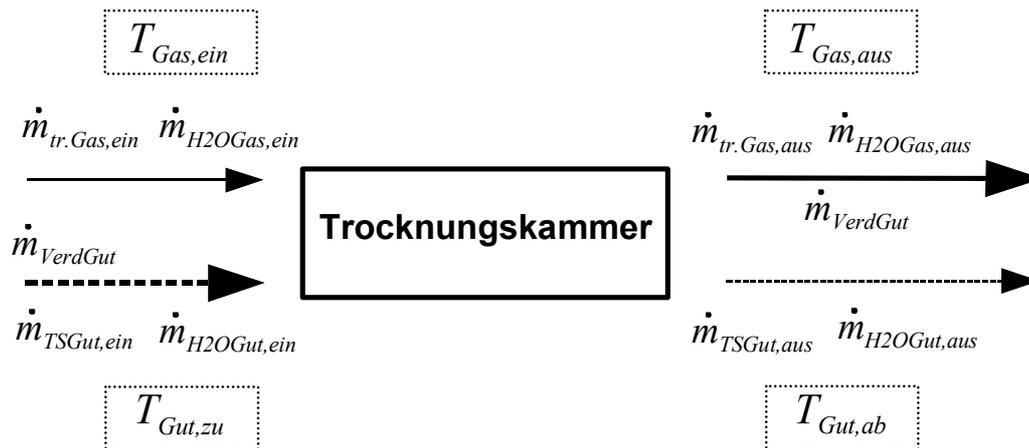


Bild 25 Massebilanz um ein Trocknungssystem

| | |
|------------------------|---|
| $\dot{m}_{tr.Gas,ein}$ | eintretender Massestrom - trockener Gasanteil im Trocknungsmedium |
| $\dot{m}_{H2OGas,ein}$ | eintretender Massestrom - Wasserdampf im Trocknungsmedium |
| $\dot{m}_{tr.Gas,aus}$ | austretender Massestrom - trockener Gasanteil im Trocknungsmedium |
| $\dot{m}_{H2OGas,aus}$ | austretender Massestrom - Wasserdampf im Trocknungsmedium |
| $\dot{m}_{VerdGas}$ | Massestrom des verdampften Wassers im Trocknungsmedium |
| $\dot{m}_{TSGut,ein}$ | eintretender Massestrom - Trockensubstanz (TS) im Trocknungsgut |
| $\dot{m}_{H2OGut,ein}$ | eintretender Massestrom - Wasseranteil im Trocknungsgut |
| $\dot{m}_{VerdGut}$ | Massestrom des verdampften Wassers aus dem Trocknungsgut |
| $\dot{m}_{TSGut,aus}$ | austretender Massenstrom - Trockensubstanz im Trockengut |
| $\dot{m}_{H2OGut,aus}$ | austretender Massestrom - Wasseranteil im Trockengut |

Dabei gelten nach dem Gesetz der Massenerhaltung folgende Beziehungen:

für das Trocknungsgas:

$$\dot{m}_{tr.Gas,ein} = \dot{m}_{tr.Gas,aus}$$

$$\dot{m}_{H2OGas,ein} = \dot{m}_{H2OGas,aus}$$

für das verdampfte Wasser:

$$\dot{m}_{VerdGut} = \dot{m}_{VerdGas}$$

für das Trocknungsgut:

$$\dot{m}_{TSGut,ein} = \dot{m}_{TSGut,aus}$$

$$\dot{m}_{H2OGut,ein} = \dot{m}_{H2OGut,aus}$$

wobei sich die Trockensubstanz und das Wasser im Trocknungsgut zum Trockengut zusammenfassen lässt und folglich gilt:

für das Trocknungsgut:

$$\dot{m}_{TG} = \dot{m}_{TSGut} + \dot{m}_{H2OGut}$$

$$\dot{m}_{TG,ein} = \dot{m}_{TG,aus}$$

Das System in Bild 25 lässt sich mit obigen Gleichungen stark vereinfachen:

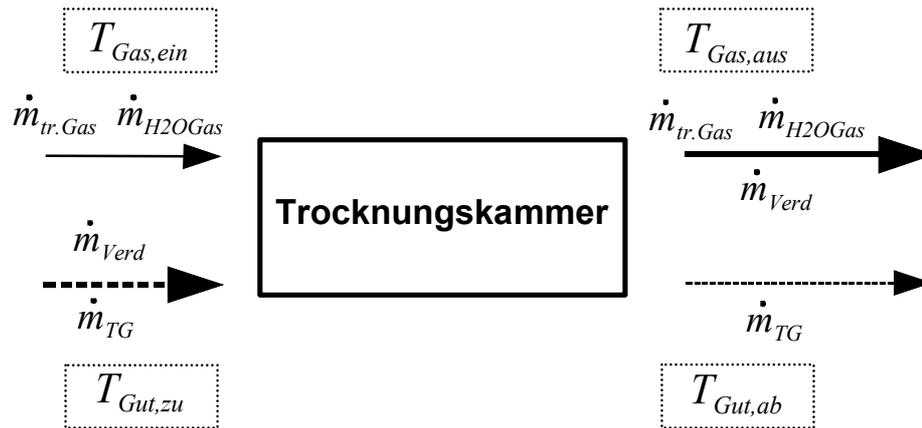


Bild 26 Vereinfachte Massebilanz für ein Trocknungssystem

| | | |
|--------------------|--|-----------------------------------|
| $\dot{m}_{tr.Gas}$ | Massestrom des trocknen Gasanteils im Trocknungsmedium | bei $T_{Gas,ein}$, $T_{Gas,aus}$ |
| \dot{m}_{H2OGas} | Massestrom des Wasserdampfes Trocknungsmedium | bei $T_{Gas,ein}$, $T_{Gas,aus}$ |
| \dot{m}_{Verd} | Massestrom des verdampften Wassers | bei $T_{Gut,zu}$, $T_{Gas,aus}$ |
| \dot{m}_{TG} | Massestrom Trockengut | bei $T_{Gut,zu}$, $T_{Gut,ab}$ |

4.2.1 Bilanzgleichung Trocknungsmedium

Trocknungsenergie

Das Trocknungsmedium führt der Trocknungskammer die Energie zur Trocknung zu. Die vom Trocknungsmedium für den Trocknungsvorgang abgegebene Energie $\Delta q_{Gas}(Tk)$ errechnet sich dabei mit der Eintrittsenthalpie $h_{Gas,ein}$ und der Austrittsenthalpie $h_{Gas,aus}$ an den Systemgrenzen der Trocknungskammer nach Gleichung (41). Die Trocknungsenergie wird dabei zweckmäßigerweise auf kg trockenes Gas bezogen.

$$\Delta q_{Gas}(Tk) = h_{Gas,ein} - h_{Gas,aus} = \Delta q_{tr.Gas} + \Delta q_{H2OGas} \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{tr.G}} \right] \quad (41)$$

Mit den Gleichungen (42) bis (44) lässt sich die Trocknungsenergie $\Delta q_{Gas}(Tk)$ thermodynamisch exakt berechnen.

$$\Delta q_{tr.Gas} = h_{tr.Gas,ein} - h_{tr.Gas,aus} = [\bar{c}_{p,tr.Gas,ein} \cdot T_{Gas,ein} - \bar{c}_{p,tr.Gas,aus} \cdot T_{Gas,aus}] \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{tr.G}} \right] \quad (42)$$

$\bar{c}_{p,Gas}$ ist die integrale Wärmekapazität in den Grenzen Bezugstemperatur (z.B. 0 °C) und Gastemperatur T_{Gas} .

$$\Delta q_{H2OGas} = h_{H2OGas,ein} - h_{H2OGas,aus} \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{tr.G}} \right] \quad (43)$$

$$\Delta q_{H_2O_{Gas}} = \frac{\dot{m}_{H_2O_{Gas}}}{\dot{m}_{tr, Gas}} \cdot [\bar{c}_{p, H_2O_{Gas}, ein} \cdot T_{Gas, ein} - \bar{c}_{p, H_2O, aus} \cdot T_{Gas, aus}] \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{tr, G}} \right] \quad (44)$$

Setzt man für die Wärmekapazitäten aus (42) und (44) eine mittlere Wärmekapazität $\tilde{c}_{p, Gas}$ an, unter Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit und als Mischungswert aus trockener Luft und Wasserdampf nach Gleichung (39), vereinfacht sich Gleichung (41) zu:

$$\Delta q_{Gas} (Tk) = \tilde{c}_{p, Gas} \cdot [T_{Gas, ein} - T_{Gas, aus}] \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{tr, G}} \right] \quad (45)$$

$\tilde{c}_{p, Gas}$ integrale spezifische Wärmekapazität des Trocknungsgases (mischungs- und temperaturabhängig)

(von 500 bis 100 °C $\approx 1,1 \frac{kJ}{kg \cdot K}$; von 150 bis 50 °C $\approx 1,01 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ für $x \approx 50 \frac{g}{kg_{tr, L}}$) in $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$

Heizenergie

Das Trocknungsmedium wird vor der Trocknung über eine Heizung von der Zulufttemperatur auf die Eintrittstemperatur in die Trocknungskammer aufgeheizt. Hierfür muss die Energie $\Delta q_{Gas} (zu)$ aufgewandt werden, die sich bei einer indirekten Beheizung nach Gleichung (46) berechnet.

$$\Delta q_{Gas} (zu) = h_{Gas, ein} - h_{Gas, zu} = \Delta q_{tr, Gas} + \Delta q_{H_2O_{Gas}} \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{tr, G}} \right] \quad (46)$$

Die zugeführte Energie stellt dabei meist den Aufwand dar, der in ein Trocknungssystem eingebracht wird. Eine exakte Berechnung der zugeführten Energie kann dabei wieder mit den Gleichungen (42) bis (44) aus dem Bilanzsystem zur Trocknungsenergie erfolgen. In guter Näherung lässt sich auch Gleichung (46) mit der mittleren Wärmekapazität $\tilde{c}_{p, Gas}$ vereinfachen, wobei, wie bei Gleichung (45), die Temperaturabhängigkeit vernachlässigt und für die Gasmischung aus trockener Luft und Wasserdampf ein Mischungswert angesetzt wird.

$$\Delta q_{Gas} (zu) = \tilde{c}_{p, Gas} \cdot [T_{Gas, ein} - T_{Gas, zu}] \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{tr, G}} \right] \quad (47)$$

Abgasenergie

Bei fast allen thermischen Trocknungsprozessen ist die Abgastemperatur des Trocknungsmediums aus dem Trocknersystem wärmer als die Zulufttemperatur. Dabei wird vom Trocknungsprozess nicht genutzte Energie an die Umgebung abgegeben. Diese berechnet sich aus der Differenz der zugeführten Energie $\Delta q_{Gas} (zu)$ abzüglich der genutzten Trocknungsenergie $\Delta q_{Gas} (Tk)$.

$$\Delta q_{Gas} (ab) = \Delta q (zu) - \Delta q (Tk) = h_{Gas, zu} - h_{Gas, aus} \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{tr, G}} \right] \quad (48)$$

Durch Einsetzen der vereinfachten Energiegleichungen für die Heizenergie (47) und die Trocknungsenergie (45) lässt sich die über das Abgas ausgetragene

Energie aus den Temperaturen $T_{Gas,zu}$ und $T_{Gas,aus}$ und der Wärmekapazität des Gases $\tilde{c}_{p,Gas}$ berechnen. Zweckmäßigerweise wählt man auch hier den Bezug auf die Masse des trockenen Gases.

$$\Delta q_{Gas}(ab) = \tilde{c}_{p,Gas} \cdot [T_{Gas,aus} - T_{Gas,zu}] \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{tr.G}} \right] \quad (49)$$

4.2.2 Bilanzgleichung verdampftes Wasser

Für die Verdampfung des Wassers muss diesem mindestens die benötigte Verdampfungswärme bei der Verdampfungstemperatur zugeführt werden. Da aber praktisch immer das dem System zugeführte Wasser kühler und der abgeführte Dampf heißer als die Verdampfungstemperatur ist, sind auch diese Wärmemengen zur Verdampfung aufzuwenden.

$$\Delta q_{Verd} = h_{H2OverdGas} - h_{H2OverdGut} \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{H2O}} \right] \quad (50)$$

Die Enthalpien $h_{H2OverdGut}$ und $h_{H2OverdGas}$ lassen sich aus der Dampftafel von Wasser bestimmen. Für den hier interessanten Temperaturbereich kann in guter Näherung die Verdampfungswärme Δq_{Verd} mit Gleichung (51) berechnet werden. Als Bezug wird dabei jeweils die Masse des verdampften Wassers gewählt.

$$\Delta q_{Verd} = \Delta h_{0^\circ C} + \bar{c}_{p,D} \cdot T_{Gas,aus} - \bar{c}_{p,W} \cdot T_{Gut,ein} \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{H2O}} \right] \quad (51)$$

$\Delta h_{0^\circ C}$ Verdampfungsenthalpie Wasser bei 0 °C ($\approx 2502 \frac{kJ}{kg}$) in $[\frac{kJ}{kg}]$

$\bar{c}_{p,D}$ integrale spezifische Wärmekapazität Wasserdampf ($\approx 1,9 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ bei 100°C und 50 mbar) in $[\frac{kJ}{kg \cdot K}]$

$\bar{c}_{p,W}$ integrale spezifische Wärmekapazität Wasser ($\approx 4,19 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ bei 20°C) in $[\frac{kJ}{kg \cdot K}]$

Die Verdampfungsenthalpie Δh_{T_S} kann man aus einer Dampftafel ablesen oder näherungsweise nach Gleichung (52) durch Einsetzen der Verdampfungstemperatur T_S in Gleichung (51) bestimmen.

$$\Delta h_{T_S} = \Delta h_{0^\circ C} + \bar{c}_{p,D} \cdot T_S - \bar{c}_{p,W} \cdot T_S \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{H2O}} \right] \quad (52)$$

Zur Beschreibung des Trocknungsvorgangs ist die aufgenommene absolute Feuchte Δx_{Verd} des Trocknungsgases als die Menge des über das Trocknungsgas abgeführten Wassers bezogen auf die dafür zugeführte Menge trockenen Gases gebräuchlich.

$$\Delta x_{Verd} = \frac{\dot{m}_{H2Overd}}{\dot{m}_{tr.Gas}} \quad \text{in } \left[\frac{kg_{H2O}}{kg_{tr.G}} \right] \quad (53)$$

Damit ist wiederum eine einfache Umrechnung z.B. der Verdampfungsenthalpie auf die Bezugsmasse trockenes Gas möglich. Andererseits stellt der Kehrwert der Wasseraufnahme die benötigte Menge an trockenem Gas zum Wasseraustrag dar.

$$m_{tr.Gas} = \frac{1}{\Delta x_{Verd}} = \frac{\dot{m}_{tr.Gas}}{\dot{m}_{H_2OVerd}} \quad \text{in } \left[\frac{kg_{r.G}}{kg_{H_2O}} \right] \quad (54)$$

4.2.3 Bilanzgleichung Trocknungsgut

Das Trocknungsgut, das sich aus der Trockensubstanz und dem nicht verdampften Wasser zusammensetzt, erwärmt sich bei der Trocknung und nimmt dabei Energie auf. Diese Energie lässt sich nach Gleichung (55) bezogen auf die Masse an verdampftem Wasser berechnen.

$$\Delta q_{Gut} = \frac{\dot{m}_{Gut}}{\dot{m}_{H_2OVerd}} \cdot \tilde{c}_{p,TG} \cdot [T_{Gut,ab} - T_{Gut,zu}] \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{H_2O}} \right] \quad (55)$$

$\tilde{c}_{p,TG}$ integrale spezifische Wärmekapazität Trockengut ($\approx 2,0 - 2,5 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ bei $20^\circ C$) in $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$

Die über das Trockengut abgeführte Energie lässt sich auch über die Eintrittsfeuchte $X_{Gut,zu}$ und die Austrittsfeuchte $X_{Gut,ab}$ des Produktes bestimmen.

$$\Delta q_{Gut} = \frac{1 + X_{Gut,ab}}{X_{Gut,zu} - X_{Gut,ab}} \cdot \tilde{c}_{p,TG} \cdot [T_{Gut,ab} - T_{Gut,zu}] \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{H_2O}} \right] \quad (56)$$

4.2.4 Wasseraufnahme und Wasserbeladung

Sind die Ein- und Austrittstemperaturen des Trocknungsmediums, wie in Bild 27 gezeigt, bekannt, kann der Wasseraustrag bzw. die sich ergebende Wasserbeladung des Trocknungsgases als wichtige Größe des Trocknungsprozesses berechnet werden. Wird das Feuchtgut bei Umgebungstemperatur gelagert, kann die Temperatur $T_{Gut,zu}$ des Feuchtgutes gleich der Temperatur T_∞ der Umgebungsluft gesetzt werden.

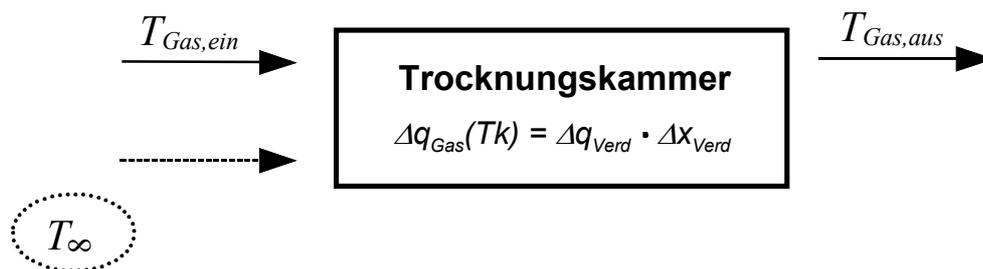


Bild 27 Temperaturen zur Berechnung der spezifischen Verdampfung

T_∞ Umgebungstemperatur (\approx Temperatur des Trocknungsgutes) in $[^\circ C]$

Der Wasseraustrag Δx_{Verd} errechnet sich nach Gleichung (57) mit $\Delta q_{Gas}(Tk)$ nach (41) und Δq_{Verd} nach (50).

$$\Delta x_{Verd} = \frac{\Delta q_{Gas}(Tk)}{\Delta q_{Verd}} \quad \text{in } \left[\frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{kg}_{Gas}} \right] \quad (57)$$

Mit den vereinfachten Gleichungen (45) und (51) erhält man eine gute Näherungsgleichung für den Wasseraustrag.

$$\Delta x_{Verd} = \frac{\bar{c}_{p,Gas} \cdot (T_{Gas,ein} - T_{Gas,aus})}{\Delta h_{0^\circ C} + \bar{c}_{p,D} \cdot T_{Gas,aus} - \bar{c}_{p,W} \cdot T_{Gut,ein}} \quad (58)$$

Durch Addition der in der Zuluft enthaltenen Feuchte x_{ein} ergibt sich nach Gleichung (59) schließlich die Wasserbeladung x_{aus} der Abluft.

$$x_{aus} = \Delta x_{Verd} + x_{ein} \quad (59)$$

Die hier berechnete Wasserbeladung Δx_{Verd} gilt für eine einmalige Abkühlung von heißem Trocknungsgas bei Kontakt mit dem Trocknungsgut.

Wird das Trocknungsmedium wieder aufgeheizt, ist eine erneute Wasseraufnahme möglich. Dabei stellt, wie in Kapitel 6.2.2 gezeigt, die Zahl der Umläufe das entscheidende Kriterium für die Höhe der Wasserbeladung dar.

Der Wert der Wasserbeladung x_{aus} des Trocknungsgases lässt eine qualitative Aussage über den Trocknungsprozess zu. Je höher die erreichte Abgasbeladung x_{aus} ist, desto höher ist auch die Konzentration an Wasserdampf. Bei sonst gleichen Zuständen sind stets Trocknungsprozesse mit der höheren Wasserbeladung des Abgases aus energetischer Sicht günstiger.

Tabelle 12 Wasseraufnahme und Abluftbeladung bei verschiedenen Trocknungsprozessen

| Nr. | Art des Trocknungsprozesses | Art der Heizung | T_{ein} [°C] | T_{aus} [°C] | T_{zu} [°C] | Brüden Bezug Ges.strom | φ [%-rel.F] Abgas | Δx_{Verd} [g/kg] tr.Gas | Δx_{aus} [g/kg] tr.Gas |
|-----|---------------------------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1 | einfache Heißlufttrocknung | direkt | 920 | 119 | 20 | 0% | 20% | 328 | 386 |
| 2 | einfache Heißlufttrocknung | direkt | 520 | 105 | 20 | 0% | 20% | 167 | 201 |
| 3 | Heißgastrocknung mit Brüden | direkt | 520 | 128 | 20 | 50% | 20% | 174 | 624 |
| 4 | Heißgastrocknung mit Brüden | direkt | 520 | 119 | 20 | 29% | 20% | 175 | 382 |
| 5 | Heißgastrocknung mit Brüden | direkt | 520 | 114 | 20 | 17% | 20% | 167 | 300 |
| 6 | einfacher Durchlufttrockner | indirekt | 145 | 51 | 20 | 0% | 50% | 38 | 43 |
| 7 | Umlufttrockner-Niedertemperatur | indirekt | 145 | 69 | 20 | 67% | 50% | 32 | 110 |
| 8 | Umlufttrockner-Niedertemperatur | indirekt | 145 | 84 | 20 | 86% | 50% | 27 | 236 |
| 9 | Umlufttrockner-Niedertemperatur | indirekt | 145 | 96 | 20 | 93% | 50% | 23 | 476 |
| 10 | Umluft-Heißgastrocknung | indirekt | 500 | 128 | 20 | 75% | 30% | 168 | 2062 |

Eine Übersicht mit Berechnungsgrößen ist in 11.2 im Anhang dargestellt.

4.2.5 Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs

Für die Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs q_{verd} müssen neben der Trocknungskammer auch der Wärmeerzeuger und die diesem zugeführten Energieströme zur Beheizung sowie die Frischluftmenge betrachtet werden. In Bild 28 sind die zur Berechnung notwendigen Temperaturen dargestellt.

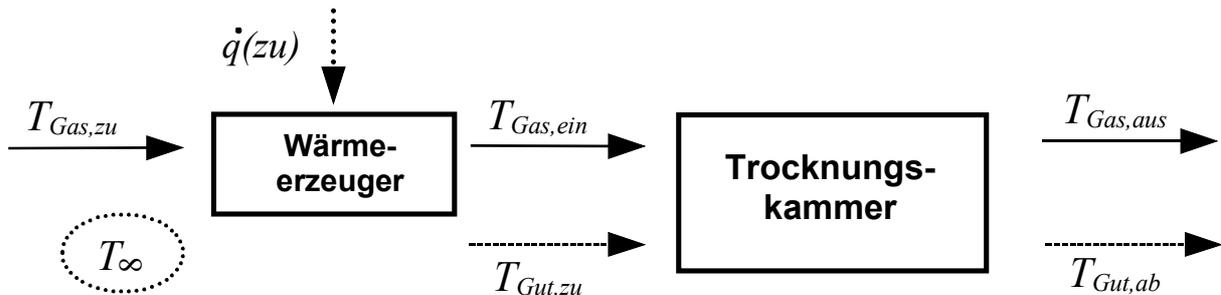


Bild 28 Temperaturen zur Berechnung des spezifischen Wärmebedarfs einer Trocknungsanlage mit Wärmeerzeuger und Trocknungskammer

Der spezifische Energieverbrauch q_{verd} für die Verdampfung des Wassers aus dem Trocknungsprodukt setzt sich aus der Nutzenergie $q(nutz)$ und der Verlustenergie $q(verl)$ zusammen, die ohne Wirkung für den Trocknungsprozess an die Umgebung abgegeben wird. Ein Bezug auf die Masse an verdampftem Wasser ist üblich.

$$q_{verd} = q(nutz) + q(verl) \quad \text{in } \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}} \right] \quad (60)$$

Die Nutzenergie ist dabei gleich der Verdampfungswärme Δq_{verd} nach Gleichung (51) bezogen auf die Masse an verdampftem Wasser. Die Guttemperatur $T_{Gut,ein}$ kann gleich T_∞ gesetzt werden, wenn das Trocknungsgut bei Umgebungstemperatur gelagert wird und keine zu starke innere Erwärmung durch Umsetzungsvorgänge auftritt.

$$q(nutz) = \Delta q_{verd} = \Delta h_{0^\circ\text{C}} + \bar{c}_{p,D} \cdot T_{Gas,aus} - \bar{c}_{p,W} \cdot T_\infty \quad (61)$$

Die Verlustenergie setzt sich aus drei wesentlichen Anteilen zusammen:

$$q(verl) = \Delta q_{Gas}^{verl}(ab) + \Delta q_{Gut} + \Delta q_{verl} \quad (62)$$

- Die Energie $\Delta q_{Gas}^{verl}(ab)$ stellt die Energie dar, die mit der Trockenluft ausgetragen wird und für den Trockenvorgang selbst keine Wirkung hat. Diese macht den überwiegenden Anteil der Verlustenergie aus und wird nach Gleichung (48) bzw. vereinfacht nach Gleichung (49) berechnet. Der Bezug auf die Masse an verdampftem Wasser wird mit Gleichung (54) hergestellt. Als Temperatur $T_{Gas,zu}$ wird die aus der Umgebung von dem

Trocknungssystem angesaugte Zuluft mit T_∞ angesetzt, ohne Berücksichtigung eventueller Erwärmung durch die Energieabstrahlung in der Nähe des Trockners. Die Ablufttemperatur $T_{Gas,aus}$ ergibt sich, wie in Bild 27 dargestellt, aus der Abgastemperatur des Trocknersystems.

$$\Delta q_{Gas}^{verl}(ab) = \frac{1}{\Delta x_{Verd}} \cdot \tilde{c}_{p,tr.G} \cdot (T_{Gas,aus} - T_\infty) \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{H_2O}} \right] \quad (63)$$

- Als Δq_{Gut} nach Gleichung (56) wird die Energie bezeichnet, die das Trockengut durch seine Erwärmung während des Trocknungsvorgangs aufnimmt und über das heiße Trocknungsgut aus dem Trocknungssystem ausgetragen wird. Als Guttemperatur kann man hier in erster Näherung für den Eintritt wieder die Umgebungstemperatur $T_{Gut,zu} = T_\infty$ und für den Austritt die Kühlgrenztemperatur $T_{Gut,ab} = T_{KGT}$ (siehe Kapitel 3.3.9) ansetzen.

$$\Delta q_{Gut} = \frac{1 + X_{Gut,ab}}{X_{Gut,zu} - X_{Gut,ab}} \cdot \tilde{c}_{p,TG} \cdot [T_{KGT} - T_\infty] \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{H_2O}} \right] \quad (64)$$

Für eine stabile Lagerung des Produktes empfiehlt es sich, die aufgenommene Energie in einem anschließenden Kühlvorgang wieder weitgehend abzuführen. Zum Teil kann dabei die Gutenergie noch während der Abkühlungsphase im Nachverdampfungsprozess genutzt werden, so dass $T_{Gut,ab}$ tiefer angesetzt werden kann. Bei der Trocknung von wasserreichen Materialien, $(X_{Gut,zu} - X_{Gut,ab}) > 2$, liegt der Anteil der über das Produkt abgeführten Wärme bei ca. 1 % der Gesamtenergie.

- Die Verlustenergie Δq_{Verl} ist schließlich die über die Abwärme bei einer realen, nicht adiabaten Trocknungskammer von den heißen Anlagenteilen an die Umgebung abgegebene oder abgestrahlte Energie. Durch eine günstige Ansaugung der benötigten Zuluft/Frischlufte können dabei die an die Umgebung abgegebenen Verluste Δq_{Verl} im realen System minimiert werden.

Mit den Vereinfachungen von $\Delta q_{Verl} \approx 0$ (adiabates System) und $\Delta q_{Gut} \approx 0$ ($< 1\%$ der Gesamtenergie) lässt sich schließlich der spezifische Energieverbrauch q_{Verd} in guter Näherung mit Gleichung (65) berechnen.

$$q_{Verd} = \Delta h_{0^\circ C} + \bar{c}_{p,D} \cdot T_{Gas,aus} - \bar{c}_{p,W} \cdot T_\infty + \frac{1}{\Delta x_{Verd}} \cdot \tilde{c}_{p,Gas} \cdot (T_{Gas,aus} - T_\infty) \quad \text{in } \left[\frac{kJ}{kg_{H_2O}} \right] \quad (65)$$

In Tabelle 13 sind für die Systemzustände zu den Trocknungsprozessen aus Tabelle 12 die spezifischen Wärmeenergieverbräuche berechnet. Den höchsten Verbrauch hat dabei der einfache Durchlufttrockner Nr. 6 ($956 \frac{Wh_h}{kg_{H_2O}}$), während die direkt-befeuerte Heißlufttrocknung mit hohem Brüdenluftanteil Nr. 3 ($791 \frac{Wh_h}{kg_{H_2O}}$),

der Niedertemperaturtrockner im Umluftbetrieb Nr. 9 ($768 \frac{Wh_{th}}{kg_{H2O}}$) und die Umluft-Heißlufttrocknung Nr. 10 ($753 \frac{Wh_{th}}{kg_{H2O}}$) niedrigere Energieverbräuche aufweisen.

Tabelle 13 spezifischer Energieverbrauch^(*) bei Trocknungsprozessen ($T_{zu} = T_{\infty} = 20 \text{ °C}$)

| Nr. | Art des Trocknungsprozesses | Art der Heizung | T_{ein} [°C] | T_{aus} [°C] | Δq_{verd} | Δx_{verd} | q_{verl} | q_{verd} | q_{verd} |
|-----|---------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|-------------------------------|
| | | | | | [kJ/kg] H2O | [g/kg] ges. | [kJ/kg] H2O | [kJ/kg] H2O | [Wh _{th} /kg] H2O |
| 1 | einfache Heißlufttrocknung | direkt | 920 | 119 | 2639 | 328 | 316 | 2955 | 821 |
| 2 | einfache Heißlufttrocknung | direkt | 520 | 105 | 2614 | 167 | 539 | 3153 | 876 |
| 3 | Heißgastrocknung mit Brüden | direkt | 520 | 128 | 2655 | 566 | 198 | 2853 | 793 |
| 4 | Heißgastrocknung mit Brüden | direkt | 520 | 119 | 2639 | 338 | 305 | 2944 | 818 |
| 5 | Heißgastrocknung mit Brüden | direkt | 520 | 114 | 2630 | 261 | 377 | 3007 | 835 |
| 6 | einfacher Durchlufttrockner | indirekt | 145 | 51 | 2513 | 38 | 928 | 3441 | 956 |
| 7 | Umlufttrockner-Niedertemperatur | indirekt | 145 | 69 | 2547 | 105 | 509 | 3056 | 849 |
| 8 | Umlufttrockner-Niedertemperatur | indirekt | 145 | 84 | 2574 | 231 | 295 | 2869 | 797 |
| 9 | Umlufttrockner-Niedertemperatur | indirekt | 145 | 96 | 2596 | 471 | 170 | 2766 | 768 |
| 10 | Umluft-Heißgastrocknung | indirekt | 500 | 128 | 2657 | 2057 | 55 | 2712 | 753 |

^(*) der tatsächliche Verbrauch liegt wegen der sonstigen Verluste ca. um 2 – 3 % höher

Eine Übersicht mit den Berechnungsgrößen ist im Anhang unter 11.2 gegeben.

4.2.6 Berechnung des Nutzungsgrades

Systemnutzungsgrad

Aus dem Verhältnis von $\Delta q_{Gas}(Tk)$ zu $\Delta q(zu)$ kann der Systemnutzungsgrad η_s des Trockners berechnet werden.

$$\eta_s = \frac{\Delta q_{Gas}(Tk)}{\Delta q(zu)} = 1 - \frac{\Delta q_{Gas}(ab)}{\Delta q(zu)} \quad (66)$$

Der Systemnutzungsgrad η_s beschreibt die Umsetzung der zugeführten Energie in genutzte Trocknungswärme. Ein Systemnutzungsgrad von 1 wird bei einer vollständigen Abkühlung des Trocknungsmediums auf die Eintrittstemperatur erreicht, was bei einem entsprechend langsamen Prozess möglich ist.

Da die Beheizung meist verlustfrei erfolgt, kann für die zugeführte Energie aus der Aufwärmung des Trocknungsmediums $\Delta q_{Gas}(zu)$ oder über die zugeführte Energiemenge $\dot{Q}(zu)$ berechnet werden.

$$\Delta q(zu) = \Delta q_{Gas}(zu) = \frac{\dot{Q}(zu)}{\dot{m}_{r.G}} \quad (67)$$

Erfolgt die Beheizung elektrisch, ist $\dot{Q}(zu)$ gleich der zugeführten Leistung P_{el} .

$$\dot{Q}(zu) = P_{el} \quad \text{in } \left[\frac{\text{kJ}}{\text{sec}} \right] \quad (68)$$

Bei einer indirekten Beheizung mit Dampf bestimmt sich $\dot{Q}(zu)$ aus der Eintrittsenthalpie h_D des Dampfes und der Austrittsenthalpie h_K des Kondensats und der durchgesetzten Dampf-/Kondensatmenge $\dot{m}_{D/K}$.

$$\dot{Q}(zu) = (h_D - h_K) \cdot \dot{m}_{D/K} \quad \text{in } \left[\frac{\text{kJ}}{\text{sec}} \right] \quad (69)$$

Bei einer direkt befeuerten Trocknung mit Verbrennung des Brennstoffes \dot{m}_{Br} errechnet sich $\dot{Q}(zu)$ nach Gleichung (70) mit dem unteren Heizwert H_u , wobei die Menge trockenen Gases auf den Rauchgasstrom zu beziehen ist. Stoffwerte zu einigen Brennstoffen können der Tabelle 42 im Anhang entnommen werden.

$$\dot{Q}(zu) = H_u \cdot \dot{m}_{Br} \quad \text{in } \left[\frac{\text{kJ}}{\text{sec}} \right] \quad (70)$$

Trocknungsnutzungsgrad

Innerhalb der Trocknungskammer kann man ein als Trocknungsnutzungsgrad η_T bezeichnetes Verhältnis aus der Verdampfungsenthalpie Δh_{T_s} als Nutzen zur zugeführten Trocknungswärme $\Delta q_{Gas}(Tk)$ ansetzen. Aus dem Verhältnis erkennt man, welche Wärme für die Verdampfung und welche für die Erwärmung des Wassers und des Trockengutes zugeführt wurde.

$$\eta_T = \frac{\Delta h_{T_s} \cdot \Delta x_{verd}}{\Delta q_{Gas}(Tk)} \quad (71)$$

Die Verdampfungsenthalpie für den Phasenwechsel vom flüssigen zum dampfförmigen Zustand wird bei der Verdampfungstemperatur T_s nach Gleichung (52) berechnet. Für ein Produkt mit maßgeblicher Bindungsenergie Δh_b ist der Ansatz der Sorptionsenthalpie Δh_{so} sinnvoll. Dies ist aber für das hier behandelte Trocknungsprodukt Grüngut nicht notwendig, da eine erhöhte Bildungsenergie h_b des Wassers an das Trockengut erst für Bereiche mit geringer Feuchte im Trockengut vorkommt und verglichen mit der Verdampfungsenthalpie Δh_{T_s} über den gesamten Feuchtebereich vernachlässigbar klein ist.

Da es bei Trocknern keine definierte Verdampfungstemperatur gibt, kann man für die Berechnung der Verdampfungsenthalpie Δh_{T_s} eine Temperatur zwischen der Umgebungs- und der Ablufttemperatur wählen; einfachheitshalber kann man aber auch die Verdampfungsenthalpie bei 0 °C mit 2502 kJ/kg ansetzen.

Gesamtnutzungsgrad

Um eine Gesamtbeurteilung eines auf Verdampfung beruhenden konvektiven Systems machen zu können, ist die Betrachtung des Gesamtnutzungsgrades hilfreich. Dieser setzt sich aus dem Systemnutzungsgrad und dem Trocknungsnutzungsgrad zusammen und beschreibt den Nutzen Wasserverdampfung zur zugeführten Trocknungsenergie.

$$\eta_G = \frac{\Delta h_{Ts} \cdot \Delta x_{Verd}}{\Delta q(zu)} = \eta_S \cdot \eta_T \quad (72)$$

Erreicht eine Trocknungsanlage einen Gesamtnutzungsgrad von 100 % unter Verwendung einer systemspezifischen Verdampfungsenthalpie ist der Trocknungsprozess als ideal anzusehen.

In Tabelle 14 sind wieder für die Systemzustände aus Tabelle 12 zu den verschiedenen Trocknungsprozessen der System-, der Trocknungs- und der Gesamtnutzungsgrad dargestellt. Dabei hat erwartungsgemäß - wie schon beim spezifischen Wärmebedarf - der einfache Durchlufttrockner Nr. 6 den niedrigsten System- bzw. Gesamtnutzungsgrad. Den höchsten Gesamtnutzungsgrad weist die Umluft-Heißlufttrocknung Nr. 10 (85 %) auf, gefolgt vom Niedertemperaturtrockner im Umluftbetrieb Nr. 9 (83 %) und der direkt-befeuerten Heißlufttrocknung mit 920 °C Eintrittstemperatur Nr. 1 (81 %).

Tabelle 14 Nutzungsgrade bei verschiedenen Trocknungsprozessen ($T_{zu} = T_{Bezug} = 20 \text{ °C}$)

| Nr. | Art des Trocknungsprozesses | Brüden- anteil [bez. Abgas] | T_{ein} | T_{aus} | $q(zu)$ | $q(Tk)$ | η_S | Δh_{Ts} | Δx_{Verd} | $q(Tk)$ | η_T | η_G |
|-----|---------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|---------|---------|------------|-----------------|-------------------|---------|------------|------------|
| | | | [°C] | [°C] | [kJ/kg] | [kJ/kg] | [-] | [kJ/kg] | [g/kg] | [kJ/kg] | [-] | [-] |
| | | | | | tr. Gas | tr. Gas | System | H2O | tr. Gas | H2O | Trocknung | Gesamt |
| 1 | einfache Heißlufttrocknung | 0% | 920 | 119 | 994 | 865 | 87% | 2455 | 328 | 2639 | 93% | 81% |
| 2 | einfache Heißlufttrocknung | 0% | 520 | 105 | 546 | 435 | 80% | 2455 | 167 | 2614 | 94% | 75% |
| 3 | Heißgastrocknung mit Brüden | 100% | 520 | 128 | 538 | 463 | 86% | 2455 | 174 | 2655 | 92% | 80% |
| 4 | Heißgastrocknung mit Brüden | 40% | 520 | 119 | 559 | 461 | 83% | 2455 | 175 | 2639 | 93% | 77% |
| 5 | Heißgastrocknung mit Brüden | 20% | 520 | 114 | 541 | 439 | 81% | 2455 | 167 | 2630 | 93% | 76% |
| 6 | einfacher Durchlufttrockner | 0% | 145 | 51 | 146 | 95 | 65% | 2455 | 38 | 2513 | 98% | 63% |
| 7 | Umlufttrockner-Niedertemperatur | 200% | 145 | 69 | 105 | 80 | 77% | 2455 | 32 | 2547 | 96% | 74% |
| 8 | Umlufttrockner-Niedertemperatur | 600% | 145 | 84 | 82 | 69 | 84% | 2455 | 27 | 2574 | 95% | 80% |
| 9 | Umlufttrockner-Niedertemperatur | 1300% | 145 | 96 | 67 | 59 | 88% | 2455 | 23 | 2596 | 95% | 83% |
| 10 | Umluft-Heißgastrocknung | 300% | 500 | 128 | 485 | 446 | 92% | 2455 | 168 | 2657 | 92% | 85% |

4.2.7 Berechnung der Wasserverdampfungsleistung

Bei Produkten mit hohen Ausgangsfeuchten beschreibt die verdampfte Menge Wasser die Leistungsgröße einer Trocknungsanlage.

Eine Möglichkeit zur Berechnung der Wasserverdampfungsleistung \dot{m}_{Verd} kann über die zugeführte Trocknungsenergie $\Delta q_{Gas}(Tk)$ aus Gleichung (45) und die Verdampfungswärme Δq_{Verd} aus Gleichung (51) erfolgen. Zudem muss zur Berechnung der Massenstrom \dot{m}_{Gas} bzw. $\dot{m}_{tr.G}$ des Trocknungsgases bekannt sein.

$$\dot{m}_{Verd} = \frac{\Delta q_{Gas}(Tk) \cdot \dot{m}_{tr.G}}{\Delta q_{Verd}} \quad \text{in [kg/s]} \quad (73)$$

Ist die aufgenommene Wasserbeladung der Trocknungsabluft mit Δx_{Verd} gegeben, kann die Wasserverdampfung \dot{m}_{Verd} über den Quotienten aus Gleichung (74) bestimmt werden.

$$\dot{m}_{Verd} = \frac{\dot{m}_{tr.G}}{\Delta x_{Verd}} \quad \text{in [kg/s]} \quad (74)$$

Ein weiterer Berechnungsweg ist über die zugeführte Energie $\dot{Q}(zu)$ möglich. $\dot{Q}(zu)$ kann dabei z.B. über die Gleichungen (66) bis (70) ermittelt werden. Mit dem spezifischen Wärmebedarf q_{Verd} für den Trocknungsprozess nach Gleichung (65) lässt sich dann mit Gleichung (75) die Wasserverdampfung \dot{m}_{Verd} berechnen.

$$\dot{m}_{Verd} = \frac{\dot{Q}(zu)}{q_{Verd}} = \frac{q_{Gas}(zu) \cdot \dot{m}_{tr.G}}{q_{Verd}} \quad \text{in [kg/s]} \quad (75)$$

Welche Berechnungsart gewählt wird, hängt von den gegebenen Größen bzw. deren zuverlässigen Bestimmung ab.

Darüber hinaus ist eine einfache Bestimmung möglich, wenn über einen Zeitraum Δt die zugeführten Massen am Eintritt m_{ein} und am Austritt m_{aus} des Trocknungsproduktes bekannt sind. Dabei wird davon ausgegangen, dass in der Trocknungskammer kein Masseschwund stattfindet, wie es durch eine Produktverschwelung oder einen Austrag über den Trocknungsgasstrom in Form von Staub vorkommen kann.

$$\dot{m}_{Verd} = \frac{(m_{ein} - m_{aus})}{\Delta t} \quad \text{in [kg/s]} \quad (76)$$

4.2.8 Druckabfall im Trocknungssystem, Gebläseleistung

Die benötigte Strömungsenergie einer Trocknungsanlage bestimmt sich über den Druckabfall im Trocknungssystem. Die Gebläseleistung P_{Welle} errechnet sich für einen einfachen Trocknungsprozess ohne Umluft nach Gleichung (77).

$$P_{Welle} = \frac{\Delta p \cdot \dot{V}_{Gas}}{\eta_{Ventilator}} \quad \text{in [W]} \quad (77)$$

Δp statische Druckerhöhung über dem Ventilator ($A_{cin} = A_{aus}$) in [Pa]

$\eta_{Ventilator}$ Umsetzungsgrad des Ventilatorsystems (zwischen ~50 bis 75 %) in [%]

Mit der vom Ventilator bereitgestellten Druckdifferenz Δp strömt der Volumenstrom \dot{V}_{Gas} durch die Trocknungsanlage. Bei einfachen Systemen, wie in Bild 29, kann die Druckerhöhung Δp direkt über dem Ventilator gemessen werden. Über den vom Betriebspunkt abhängigen Wirkungsgrad $\eta_{Ventilator}$ des Ventilators errechnet sich nach Gleichung (77) die mechanische Leistung der Antriebswelle.

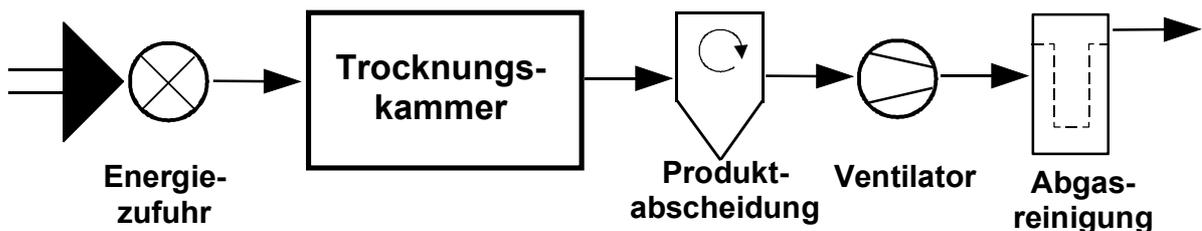


Bild 29 Einfaches Trocknungssystem zur Bestimmung der Strömungsarbeit

Meist werden für den Antrieb der Ventilatoren Elektromotoren eingesetzt. Diese können direkt oder über einen Riemenantrieb an die Ventilatorwelle gekoppelt werden. Zur Bestimmung der elektrischen Leistung P_{el} muss dann noch der Wirkungsgrad des Motors η_{Motor} und des Antriebs $\eta_{Antrieb}$ bekannt sein.

$$P_{el} = P_{Welle} \cdot \frac{1}{\eta_{Motor}} \cdot \frac{1}{\eta_{Antrieb}} \quad \text{in [W]} \quad (78)$$

mit η_{Motor} Wirkungsgrad Elektromotor ($\approx 98 - 99 \%$)

$\eta_{Antrieb}$ Wirkungsgrad Antrieb; Riemenantrieb ($\approx 95 - 98 \%$), Direktantrieb (= 100 %)

5 Messungen an einem Horden- / Satzrockner

Zur Bestimmung der Trocknungszeiten von Grüngut wurden Untersuchungen an einem Satzrockner durchgeführt. Der hierfür eingesetzte Trockner war in seiner Grundauführung am Institut für Landtechnik, TU-München, Weihenstephan, vorhanden, musste aber für die untersuchungsspezifischen Anforderungen modifiziert werden. Zudem standen Reinsaat von verschiedenen Wiesengräsern aus den Aufzuchtflächen der Landesanstalt für Pflanzenzucht in Dürenast als Trocknungsmaterial zur Verfügung. Ziel der Versuche war es die für die Trocknung von Halm- und Blattgut spezifischen Daten zu ermitteln, die für die Dimensionierung und Auslegung eines Niedertemperaturtrockners notwendig sind.

5.1 Beschreibung der Versuchsanlage

Bei der Versuchsanlage handelt es sich um einen Hordentrockner, bei dem die Trocknungstemperatur und der Trocknungsluftstrom weitgehend unabhängig voneinander eingestellt werden können. Für den Temperaturregelkreis kann der Sollwert im Bereich zwischen 60 - 150 °C vorgegeben werden. Der Volumenstrom lässt sich im Bereich von 850 – 3.000 m³/h einstellen. Der Aufbau des Trockners ist in Bild 30 dargestellt.

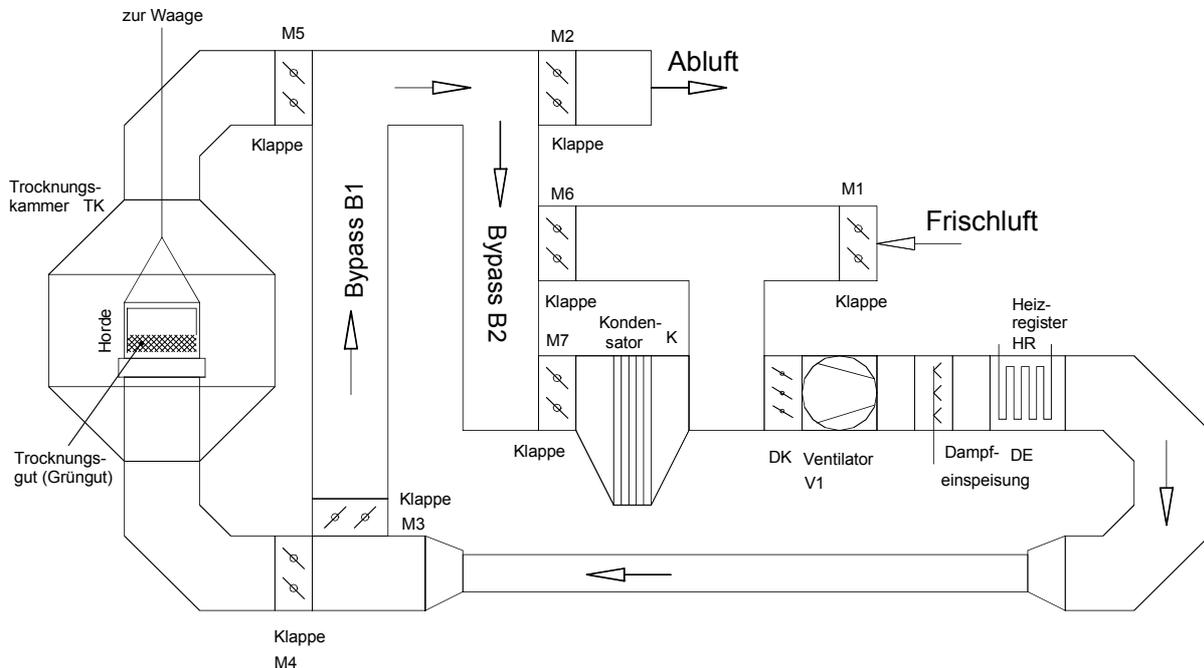


Bild 30 Schema der Satzrockner-Versuchsanlage

Der Trockner wird wahlweise über die Stellklappen M1 / M2 und M6 / M7 mit Frisch-, Misch- oder Umluft gefahren. Die Trocknungshorde mit den Abmessungen (BxLxH) 425x430x100 mm kann ca. 5 kg Feuchtmaterial

aufnehmen. Der Querschnitt des Trockners von $0,183 \text{ m}^2$ ist mit einer Produktschicht bis zu 95 mm Höhe belegbar. In der Hordenvorderwand ist ein Sichtglas eingelassen, über das das Gut während der Trocknung beobachtet werden kann. Veränderungen der Schütthöhe können über einen Maßstab am Sichtglas von außen erfasst werden.

5.1.1 Kontinuierliche Erfassung des Trocknungsverlaufs

Die Horde ist an vier Seilen aufgehängt und schwimmt zur Abdichtung gegen den eintrittsseitigen Überdruck mit den Unterkanten der Seitenwände in einem quadratischen, ölgefüllten Kanal. Das Gewicht des Gutes, vermindert um die Auftriebskraft bei durchströmter Horde, lässt sich kontinuierlich mit der Waage WI07 messen. Über zwei Stellklappen kann der Gasstrom innerhalb einer Sekunde zwischen der Horde und dem Bypass umgeschaltet werden. Damit ist auch eine Gewichtserfassung ohne Durchströmung möglich.

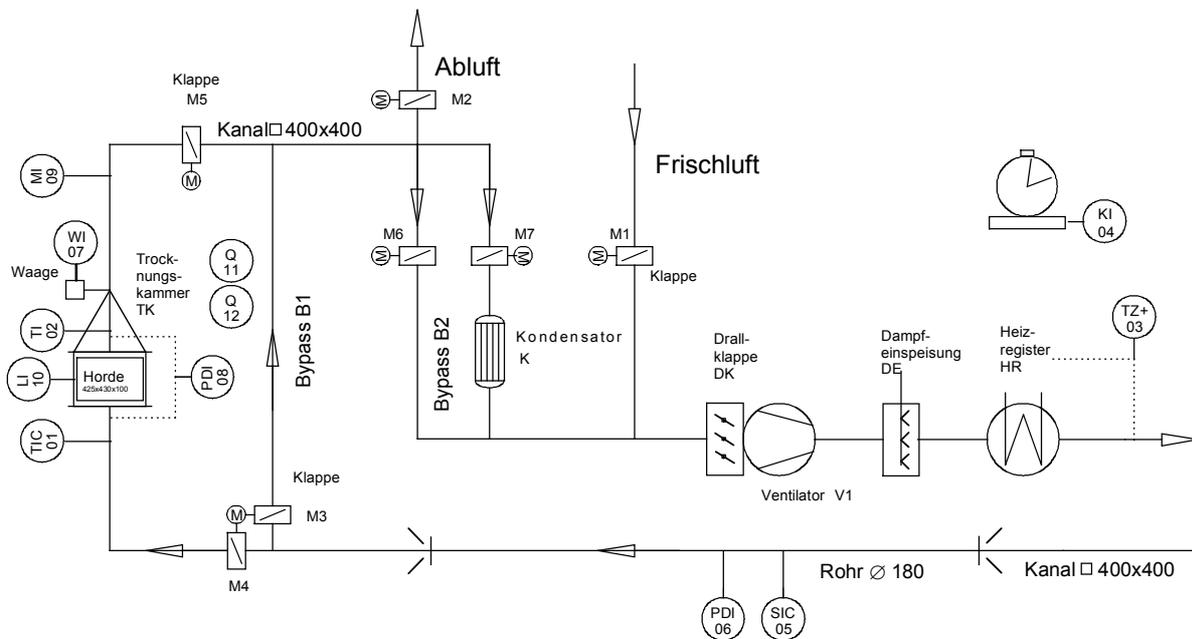


Bild 31 R&I Schema des Satzrockners

Das R&I Schema der Versuchsanlage ist in Bild 31 dargestellt. Über den Ventilator V1 wird Frisch- oder Umluft angesaugt, die anschließend über das Heizregister HR auf die gewünschte Trocknungstemperatur aufgeheizt wird. Der Volumenstrom an Trocknungsluft lässt sich über die Drallklappe DK vor dem Ventilator regeln. Die Luft strömt entweder zur Trocknungskammer TK oder durch den Bypass B1. Bei Frischluftbetrieb wird die Luft über die Stellklappe M2 aus der Anlage ausgeschleust oder bei Umluftbetrieb über den Bypass B2 zum Ventilator zurückgeführt.

Ist für Experimente eine Entfeuchtung der Trocknungsluft erforderlich, kann die Luft im Umluftbetrieb über einen wassergekühlten Kondensator K abgekühlt und

dabei entfeuchtet werden. Hat die Trocknungsluft zu wenig Feuchtigkeit, kann mit einer Dampfeinspeisung DE die Feuchte erhöht werden. In Tabelle 15 sind alle bei den Versuchen am Satzrockner erfassten Messgrößen, die Messbereiche und die Messunsicherheiten zusammengestellt.

Tabelle 15 Zusammenstellung der Messgrößen, Messbereiche und Messgenauigkeiten

| | | Messgröße | Mess- stelle | Messbereich | Mess- genauigkeit |
|----|------------|----------------------------------|-----------------|---------------------------|----------------------|
| 1 | T_{ein} | Temperatur vor der Horde | TIC01 | 0 – 150 °C | ± 0,2 °C |
| 2 | T_{aus} | Temperatur nach der Horde | TI02 | 0 – 150 °C | ± 0,2 °C |
| 3 | T_{heiz} | Temperaturwächter Heizung | TZ+03 | 0 – 150 °C | ± 0,2 °C |
| 4 | t | Versuchs- /Trocknungszeit | KI04 | 1 – 9999 sec | ± 1 sec |
| 5 | v | Strömungsgeschwindigkeit | SIC05 | 0,2– 20 m/sec | ± 0,2 m/sec |
| 6 | Δp | Differenzdruck (dynam./statisch) | PDI06 | 0 – 150 Pa | ± 2 Pa |
| 7a | m | Gewicht der Horde (statisch) | WI07 | 0 – 3.500 g | ± 0,2 g |
| 7b | m | Gewicht der Horde (durchströmt) | WI07 | 0 – 3.500 g | ± 1 g |
| 8 | Δp | Differenzdruck (Horde) | PDI08 | 0 – 300 Pa | ± 3 Pa |
| 9 | φ | Relative Luftfeuchtigkeit | MI09 | 5 – 95 % | ± 3 % |
| 10 | H | Schichthöhe Trocknungsgut | L10 | 5 – 95 mm | ± 5 mm |
| 11 | | Art des Trocknungsgutes | Q11 | Gras, Grüngut, ... | |
| 12 | | Art der Aufbereitung | Q12 | unbehandelt / aufbereitet | |

5.1.2 Messtechnik

Steuer- / Regelungseinheit und Datenaufzeichnung

Die Versuchsanlage wird über Kompaktregler betrieben, die auch eine Ausgabe der Messwerte über eine IEEE Schnittstelle ermöglichen. Ein vorhandenes FORTRAN-Programm zur Aufzeichnung der Messdaten wurde für die Trocknungsversuche modifiziert. Mit der vorhandenen Elektronik waren sechs Messwerte, jeweils um 3 sec zeitlich versetzt, erfassbar.

Temperaturmessung

Für den Trocknungsvorgang im Hordentrockner ist die Erfassung des Temperaturverlaufs über der Horde neben dem Hordengewicht die wichtigste physikalische Größe. Der Temperaturverlauf ermöglicht Aussagen zur Energieumsetzung und zur Abtrocknung des Trocknungsgutes. In dem untersuchten Niedertemperaturbereich von 60 bis 150 °C traten während der Versuchsmessungen Temperaturänderungen von bis zu ±20 K/min auf, die

innerhalb der Ansprechzeiten der Messfühler lagen. Nur zu Beginn eines Trocknungsversuchs, d.h. beim Einschleiben der kalten, mit Feuchtgut gefüllten Trocknungshorde in die auf Versuchstemperatur vorgeheizte Anlage, tritt ein Temperatursprung auf, bei dem die Temperaturfühler nach der Horde an die Grenze ihrer Ansprechzeit kommen. Dies wurde bei der Auswertung entsprechend berücksichtigt.

Für die Temperaturmessung wurden

- drei Widerstandsthermometer Pt 100 als Tauchfühler für 0 bis 200 °C und
- tragbare Temperaturmessgeräte (NiCr-Ni und Quecksilberthermometer)

verwendet. Die Handgeräte wurden zur Überprüfung der fest installierten Temperaturfühler eingesetzt und dabei die Repräsentativität der Messpunkte für den Messquerschnitt festgestellt.

Volumenstrommessung

Eine zuverlässige Messung des Luftvolumenstroms ist wegen des sich während des Versuches ändernden Strömungswiderstandes von großer Bedeutung. Für die Volumenstrommessung standen

- Strömungssonden / Staurohre (\varnothing 8 mm bzw. \varnothing 10 mm) zur Bestimmung des dynamischen und statischen Drucks und
- zwei Flügelräder mit \varnothing 14 mm bzw. \varnothing 25/27 mm

zur Verfügung. Für die Durchströmung der Horde ist ein Geschwindigkeitsbereich zwischen 0,3 bis 2 m/s technisch interessant. Der Schwierigkeit einer genauen Differenzdruckmessung in diesem niedrigen Geschwindigkeitsbereich wurde dadurch abgeholfen, dass der Kanalquerschnitt von 400x400 mm² auf ein Rohr mit \varnothing 180 mm in der Strömungsmessstrecke eingezogen wurde. Hierdurch erhöht sich die Geschwindigkeit um den Faktor 6,29. Die ebenfalls eingesetzten Flügelräder lieferten schon ab ca. 1 m/s zuverlässige Messwerte, konnten aber wegen der Gefahr einer Beschädigung in der staubhaltigen Trocknungsluft nicht dauerhaft zum Einsatz kommen.

Feuchtemessung im Trocknungsgut

Die Messung der Feuchte eines Produktes ist eine anspruchsvolle und bis heute für viele Produkte noch nicht zufriedenstellend gelöste Aufgabe. Schwierigkeiten bereitet die Feuchtemessung dann, wenn sie kontinuierlich und ohne Entnahme von Produkt erfolgen soll. Zwei häufig in der Trocknungstechnik eingesetzte direkte Verfahren der Feuchtebestimmung sind die produktnahe Oberflächenfeuchtemessung und die Messung mit N-IR (Nah-Infrarotverfahren). Diese Verfahren, sind aber bei instationären Vorgängen und unbekanntem Produkten nur beschränkt einsetzbar. Wegen ihrer Bedeutung soll trotzdem auf beide Verfahren kurz eingegangen werden.

Oberflächenfeuchtemessung

Herrscht näherungsweise Gleichgewichtszustand bei konstanten Bedingungen in einer Trocknungsanlage, ist eine indirekte Feuchtebestimmung über Messung der relativen Feuchte an der Produktoberfläche möglich. Über die Sorptionsisotherme des untersuchten Materials besteht dann eine eindeutige Beziehung zwischen der Produktfeuchte und der produktnahen Gasfeuchte.

Optische Nah-Infrarotverfahren (N-IR)

Ein für schwankende Feuchten geeignetes kontinuierliches, optisches Messprinzip ist das N-IR Verfahren. Diese Messung arbeitet in den für das Wassermolekül signifikanten Bereichen des Infrarot-Spektrums. Zur Messung muss dabei kein Gleichgewichtszustand vorliegen. Eine produktspezifische Kalibrierung ist allerdings für jeden Stoff zur genauen Bestimmung erforderlich. Aufgrund der geringen Eindringtiefe der ausgesandten Strahlen erfasst dieses Messsystem nur die Oberflächenfeuchte bzw. die oberflächennahe Feuchte. Unterscheidet sich die Oberflächenfeuchte von der Kernfeuchte bzw. Gesamtfeuchte des Stoffes, dann sind die ermittelten Feuchtwerte nicht repräsentativ.

Gravimetrische Feuchtebestimmung im Trockenschrank

Wegen der aufgezeigten Schwierigkeiten bei den direkten Messverfahren ist die Entnahme einer Teilprobe und die gravimetrische Ermittlung des Massenverlustes im Trockenschrank bis heute die am weitesten verbreitete und zuverlässigste Methode zur Feuchtebestimmung. Das Messverfahren ist in DIN 51718 festgelegt. Dabei wird die Probe bei 105 °C im Trockenschrank über mehrere Stunden getrocknet, bis kein weiterer Gewichtsverlust mehr feststellbar ist.

Das Trockenschrankverfahren eignet sich sowohl zur Erfassung hoher Anfangsfeuchten, als auch niedriger Produktfeuchten am Endes des Trocknungsvorgangs und wurde bei den hier durchgeführten Trocknungsversuchen angewendet. Dabei wurden pro Messung jeweils drei Proben von je 150–250 g des zu untersuchenden Materials entnommen, gewogen, getrocknet und erneut gewogen. Die drei Einzelergebnisse streuten jeweils nur gering; für die weiteren Berechnungen wurden Mittelwerte gebildet.

Feuchtemessung in der Trocknungsluft

Die Feuchte in der Trocknungsluft wurde für die Versuche bei niedrigen Temperaturen mit einem kapazitiven Feuchtefühler und bei hohen Temperaturen über ein Zweitemperatur-Psychrometer bestimmt. Während die Eintrittsfeuchte der Trocknungsluft vor dem Produktkontakt als Parameter für das Trocknungspotential von Interesse ist, kann die Austrittsfeuchte bzw. die Differenz zur Eintrittsfeuchte zur Bestimmung der Wasserverdampfung herangezogen werden.

Kapazitive Feuchtemessung

Die kapazitive Feuchtemessung beruht auf der sich ändernden dielektrischen Eigenschaft eines polymeren Kunststoffes in Abhängigkeit von der herrschenden relativen Luftfeuchte. Der Polymer ist hygroskopisch mit einem schnellen Ansprechverhalten. Die Wassermenge, welche im Polymer im Gleichgewichtszustand eingelagert ist, verändert die dielektrischen Eigenschaften des Polymers. Für die Berechnung der absoluten Feuchtwerte ist zusätzlich eine gleichzeitige präzise Messung der Lufttemperatur notwendig.

/38/

Bei Messungen der Abluftfeuchte bis zu einer Temperatur von ca. 60 °C liefert dieses Verfahren gute Messwerte. Bei höheren Temperaturen wird der Messbereich der Feuchte durch den Anstieg des maximalen Dampfdrucks größer und damit die Erfassung des Wasserdampfes über den Wert der relativen Feuchte zu einer messtechnisch anspruchsvollen Aufgabe. Bei Temperaturen über 100 °C und atmosphärischem Luftdruck übersteigt der Sattdampfdruck p'_d des Wassers den atmosphärischen Druck, wie in Bild 32 dargestellt. Damit kann über 100 °C die relative Luftfeuchte keine 100 % mehr erreichen und bei einer weiteren Temperaturerhöhung geht die maximale relative Luftfeuchte stetig zurück. Messgeräte, die die relative Luftfeuchte als Messgröße erfassen, werden infolgedessen bei höheren Temperaturen zur Messung der absoluten Wasserbeladung immer ungenauer. Zudem sind kapazitive Feuchtefühler vor Staub und sonstigen Verunreinigungen, die das hygroskope Verhalten des Messfühlers beeinflussen, zu schützen.

Zweitemperatur-Psychrometer

Ein für Temperaturen auch über 60 °C geeignetes Verfahren ist die Bestimmung der Trocken- und der Feuchtkugeltemperatur. Bei dieser, auch als Zweitemperaturmethode bezeichneten Messung, wird die Gastemperatur der trockenen Luft und die Kühlgrenztemperatur eines befeuchteten Thermometers bestimmt. Mit kleinen Korrekturen für die Übertragung der Theorie auf das reale Messgerät, kann aus den Temperaturwerten und der Messung des Luftdrucks der Dampfgehalt bestimmt werden.

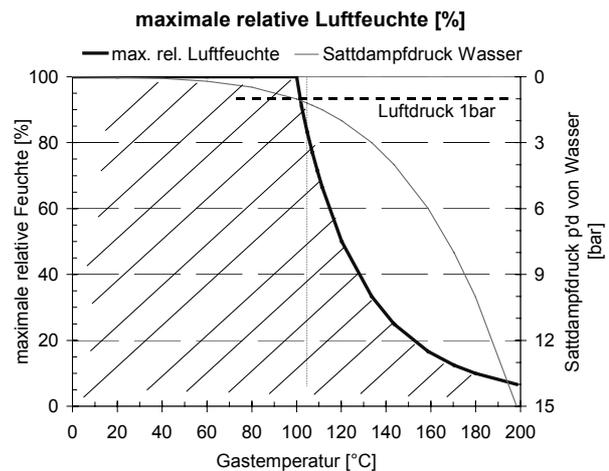


Bild 32 Maximal mögliche relative Feuchte über der Temperatur bei einem Luftdruck von 1 bar

5.2 Durchgeführte Versuche

Alle Versuche am Satztrockner wurden als instationäre Trocknungsvorgänge durchgeführt. Auf den Trocknungsverlauf wirken sich dabei eine Vielzahl von Einflüssen aus. Um Aussagen über den Einfluss der einzelnen Parameter machen zu können, wurde angestrebt, möglichst gleichartige Versuche durchzuführen und dabei immer nur eine Größe zu ändern. Aus den durchgeführten Versuchen wurden drei repräsentative Versuchsreihen ausgewählt, die im Folgenden dargestellt sind. Bei allen Versuchen wurde die Anfangs- und Endfeuchte des Trocknungsgutes jeweils im Trockenschrank bestimmt. Aus der zeitlichen Abnahme des Gewichtes der Horde kann die Trocknungszeit ermittelt werden. Die Austrittstemperatur zeigt die Umsetzung der zugeführten Trocknungsenergie an.

Versuchsreihe A

In Versuchsreihe A wurde eine mit derselben Art und Menge Grüngut gefüllte Horde bei Eintrittstemperaturen von 100, 120 und 140 °C mit Strömungsgeschwindigkeiten von 0,4 / 0,8 / 1,0 und 1,2 m/s (Geschwindigkeit bezogen auf den Normzustand der Luft) getrocknet. Es wurde unbehandeltes Weidelgras (Langware) als einheitliches Trocknungsgut verwendet. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 16 zusammengestellt.

Tabelle 16 Versuchsreihe A Weidelgras
Parameter sind Eintrittstemperatur und Strömungsgeschwindigkeit

| Versuch | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Eintrittstemperatur [°C] | 100 | 100 | 100 | 100 | 120 | 120 | 120 | 120 | 140 | 140 | 140 | 140 |
| Ström.-geschwindigkeit [m/s] | 0,8 | 0,4 | 1,2 | 1,0 | 0,8 | 0,4 | 1,0 | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 1,0 | 1,2 |

Versuchsreihe B

In der Versuchsreihe B mit Knaulgras wurde der Einfluss der Schnittlänge auf den Trocknungsvorgang untersucht (Tabelle 17). Dazu wurden unbehandelte Langware und rieselfähige Kurzware, hergestellt aus der Langware durch Häckselung auf 20 – 30 mm, verwendet. Die Trocknungstemperaturen wurden entsprechend der Versuchsreihe A gewählt.

Tabelle 17 Versuchsreihe B, Knaulgras:
Parameter ist die Schnittlänge (Kurzware / Langware)

| Versuch | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Eintrittstemperatur [°C] | 100 | 100 | 120 | 120 | 140 | 140 |
| Ström.-geschwindigkeit [m/s] | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Art des Trocknungsgutes | Langware | Kurzware | Langware | Kurzware | Langware | Kurzware |

Versuchsreihe C

Zur Untersuchung der Auswirkung einer Intensivaufbereitung wurde die Abtrocknung von jeweils zwei Chargen von unbehandeltem und von aufbereitetem Wiesengras durch Quetschung mit einem Schlagwerk bei unterschiedlichen Trocknungstemperaturen verglichen, Tabelle 18.

Tabelle 18 Versuchsreihe C, Wiesengras:
Parameter ist die mechanische Intensivaufbereitung

| Versuch | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | 8 |
|------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Eintrittstemperatur [°C] | 60 | 60 | 100 | 100 | 140 | 140 |
| Ström.-geschwindigkeit [m/s] | 0,9 | 0,5 | 1,1 | 0,8 | 1,2 | 1,1 |
| Produktbehandlung | un- behandelt | Auf- bereitet | un- behandelt | auf- bereitet | un- behandelt | auf- bereitet |

5.3 Auswertung der Versuche

5.3.1 Trocknungszeit / Ausgangs- und Endfeuchte

Die Trocknungszeit ist gemäß Gleichung (14) die Zeit zur Abtrocknung des Trocknungsgutes von einer definierten Anfangsfeuchte auf eine gewünschte Endfeuchte. Die Ausgangsfeuchte ergibt sich bei landwirtschaftlichen Erzeugnissen über die Produktfeuchte bei der Ernte. Für ausgewachsenes Grüngut liegt diese üblicherweise zwischen 70–82 %-WG. Frisches, regennasses oder taubedecktes Gras kann auch höhere Wassergehalte von 82–86 %-WG aufweisen. Für die Auswertung der Versuche am Satzrockner wurde zur Bestimmung der Trocknungszeit diese auf eine Anfangsfeuchte von 82 %-WG (450 %-FG) bezogen.

Als End- oder Zielfeuchte wird zweckmäßigerweise die Lagerfeuchte im Gleichgewichtszustand bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C verstanden. Diese beträgt bei Grüngut ca. 14 %-FG.

5.3.2 Ideale Trocknungszeit und Umsetzungsgrad

Als eine von der Produktfeuchte unabhängige Bezugsgröße kann die ideale Trocknungszeit τ gesehen werden. Diese errechnet sich aus der benötigten Verdampfungswärme Δh_{Verd} für die Trocknung zur nutzbaren Trocknungswärme. Die ideale Trocknungszeit ist eine theoretische Größe, die eine minimale Zeit für die Trocknung angibt.

$$\tau = \frac{\Delta h_{Verd} \cdot m_{H_2O_{Verd}}}{(T_{ein} - T_{KGT}) \cdot c_p \cdot \dot{m}_{Gas}} \quad \text{in [sec]} \quad (79)$$

Der Quotient aus der idealen Trocknungszeit τ und der Trocknungszeit t stellt den Umsetzungsgrad Φ der zugeführten Trocknungsenergie dar.

$$\Phi = \frac{\tau}{t} = \frac{Q_{Nutz}}{Q_{nutzbar}} \quad \text{in [-] oder [%]} \quad (80)$$

In Bild 33 ist zur Veranschaulichung der Trocknungsverlauf mit den Temperaturen T_{ein} , T_{aus} und T_{KGT} (Kühlgrenztemperatur) für eine Trocknungsschüttung gezeigt. Q_{Nutz} ist die an das Trocknungsgut übertragene Wärme zur Verdampfung, während $Q_{nutzbar}$ die vom technischen Prozess bereitgestellte und nutzbare Wärme von der Eintrittstemperatur bis zur Kühlgrenztemperatur darstellt. Damit lässt sich die ideale Trocknungszeit aus den Wärmemengen mit Gleichung (80) berechnen.

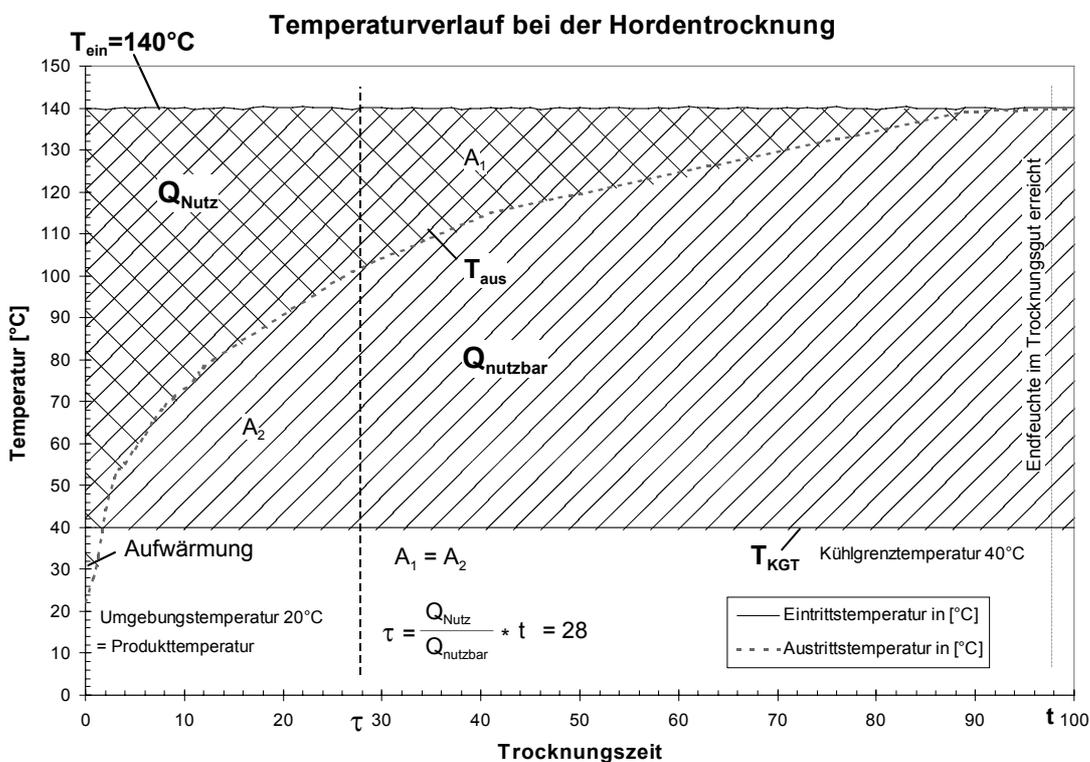


Bild 33 Ein- und Austrittstemperaturverlauf bei der Hordentrocknung

Eintrittstemperatur / Austrittstemperatur

Bei der Durchströmung einer Produktschicht kommt nur die oberste Produktlage mit dem Trocknungsgas der vorgegebenen Eintrittstemperatur in Kontakt, da jede Verdunstung mit einer Abkühlung des Trocknungsgases einhergeht. Zur Beschreibung der Wirkung der Trocknungstemperatur auf eine Produktschicht ist daher eigentlich die Angabe der Eintritts- und der Austrittstemperatur erforderlich. Die Austrittstemperatur ändert sich bei der Satztrocknung aber kontinuierlich, was eine Angabe unmöglich macht.

Diese Schwierigkeit lässt sich am einfachsten durch die Trocknung dünner Produktschichten umgehen. Dünne Produktschichten führen nur zu einer geringfügigen Abkühlung des Trocknungsgases, während bei dicken Produktschichten eine Trocknung mit fortschreitender Trocknungsgrenze, die die Produktschicht durchwandert, auftritt.

Messungen an kleinsten Mengen von Trocknungsgut sind wegen der auftretenden Störeinflüsse (Konvektionsströmung, Luftzug, Unsicherheit bei der Wägung,...) messtechnisch nur mit hohem Aufwand möglich. Eine gewisse Produktschüttung ist daher erforderlich.

Bei den Versuchen wurde darauf geachtet, dass stets ein ausreichender Abstand zur Kühlgrenztemperatur bestand. Ausgenommen hiervon war jeweils der erste Kontakt der Trocknungsluft mit dem kalten Produkt zu Beginn der Trocknung.

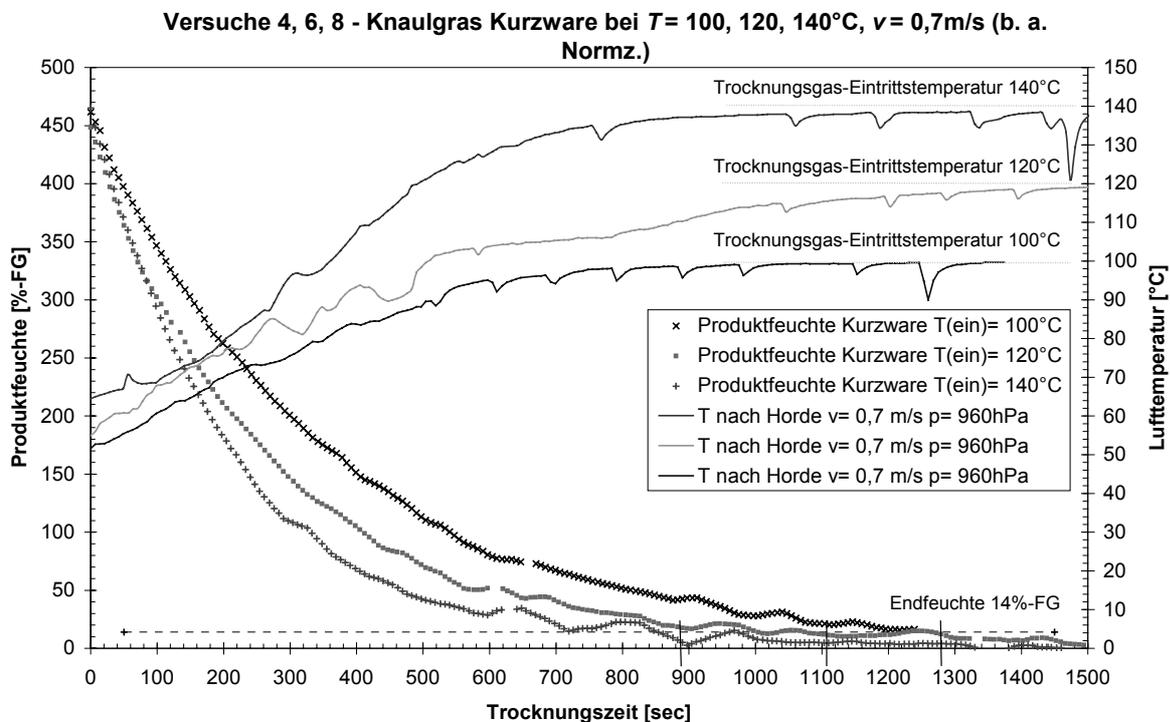


Bild 34 Verlauf des Trocknungsvorgangs von Grüngut (Versuchsreihe B)

In den Bildern 34 und 35 ist dargestellt, wie mit zunehmender Abtrocknung die Austrittstemperatur ansteigt, bis bei vollkommener Trockenheit des Produktes kein Temperaturabfall mehr über der Produktschüttung zu messen ist. Die Versuche zeigen die langsame Näherung der Austrittstemperatur an die Eintrittstemperatur. Aus den Temperaturverläufen ist auch der unterschiedliche Verlauf der Trocknung von Lang- und Kurzware der Versuchsreihe B zu erkennen.

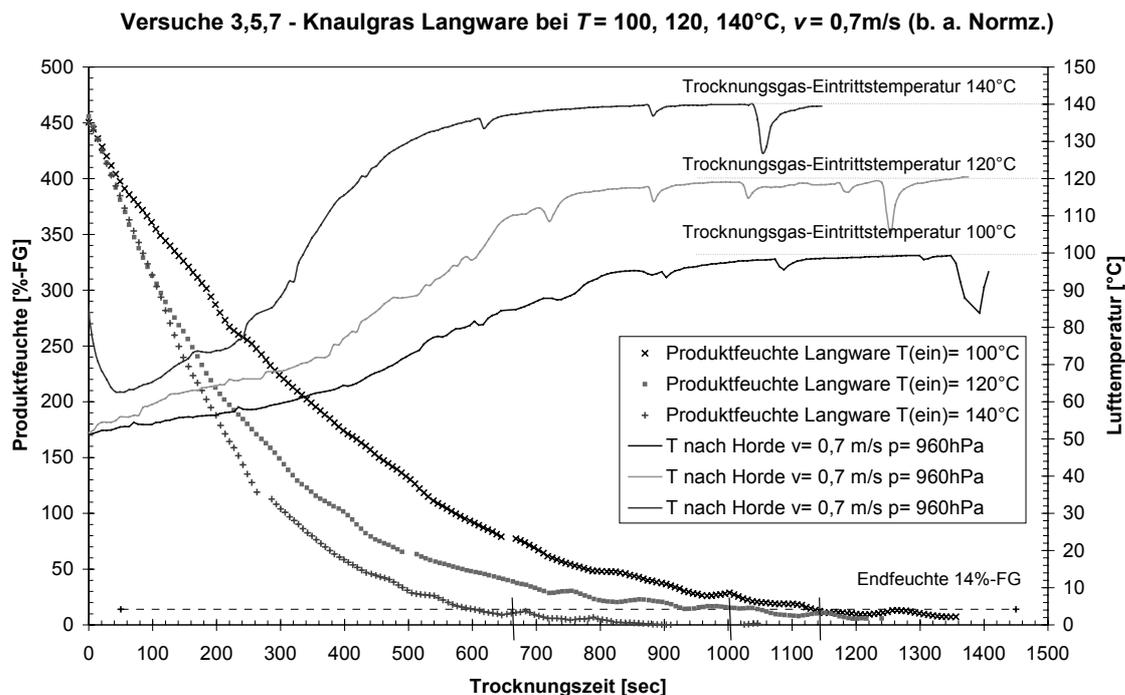


Bild 35 Verlauf des Trocknungsvorgangs von Grüngut (Versuchsreihe B)

Schütthöhe

Die Höhe der Produktschicht bestimmt bei homogenem Trocknungsprodukt die zum Austausch bereitgestellte Oberfläche und damit die Annäherung an die vollkommene Abkühlung der Trocknungsluft bis zur Kühlgrenztemperatur. Eine gleichmäßig dichte Packung und damit Schichthöhe in der Horde ist in der Realität kaum zu erreichen. Um dies auszugleichen, wurde die Trocknungshorde jeweils mit der gleichen Masse an Grüngut befüllt. Dabei ergaben sich Schütthöhen zwischen 80 und 90 mm für unbehandeltes Grüngut und zwischen 60 und 70 mm für kurzgehäckseltes Gut. Kurzgehäckseltes und auch aufbereitetes Grüngut, das durch die mechanische Bearbeitung in seiner Struktur zerstört wurde, bildet dichtere Schichten.

Die Schütthöhe sackt zudem mit fortschreitender Trocknung des Produktes zusammen, was zum Teil in einer plötzlichen Setzung des Materials durch äußere Erschütterungen erfolgt. Ein Zusammensacken um 10–20 % der Ausgangsschichthöhe konnte dabei festgestellt werden.

5.4 Ergebnisse aus den Trocknungsversuchen

5.4.1 Druckabfall über der Schüttung

Bei den Versuchen lag die Strömungsgeschwindigkeit der Austrittsluft oberhalb der Schicht zwischen 0,5–1,8 m/s. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1,3 m/s stellte sich dabei ein Druckabfall von 80 Pa ein (80 mm feuchte Produktschicht, Schüttdichte von 25–30 kg/m³ bezogen auf die Trockensubstanz). Das entspricht einem mittleren Strömungswiderstand von 1000 Pa/m für die feuchte Produktschicht. Es wurde ein Rückgang des Strömungswiderstandes um 10–20 % während der Trocknung beobachtet. Diese Verringerung lässt sich über den Masseverlust im Trocknungsprodukt und einem damit größeren freien Querschnitt erklären.

Wie beispielhaft in Bild 36 dargestellt, lässt sich bei den durchgeführten Trocknungsversuchen mit Grüngut keine Abhängigkeit der Fluggrenze von der Produktfeuchte bzw. der Dichte des Materials feststellen. Bei der hier untersuchten Langware aus Weidelgras beginnt das Produkt über 1,1 m/s Strömungsgeschwindigkeit zu fliegen. Das Produkt muss daher bei höheren Geschwindigkeiten entweder durch ein Oberband festgehalten oder die Anströmgeschwindigkeit soweit reduziert werden, dass die Auftriebskraft durch den Strömungswiderstand stets geringer als das Gewicht ist. Der Zusammenhang zwischen der Fluggrenze und der Strömungsgeschwindigkeit \bar{v} bzw. dem Strömungswiderstand C_w lässt sich nach Gleichung (81) beschreiben.

$$\vec{F}_d = C_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{Gas} \cdot \bar{v}^2 = \vec{g} \cdot A \cdot H \cdot \rho_{TG} \quad (81)$$

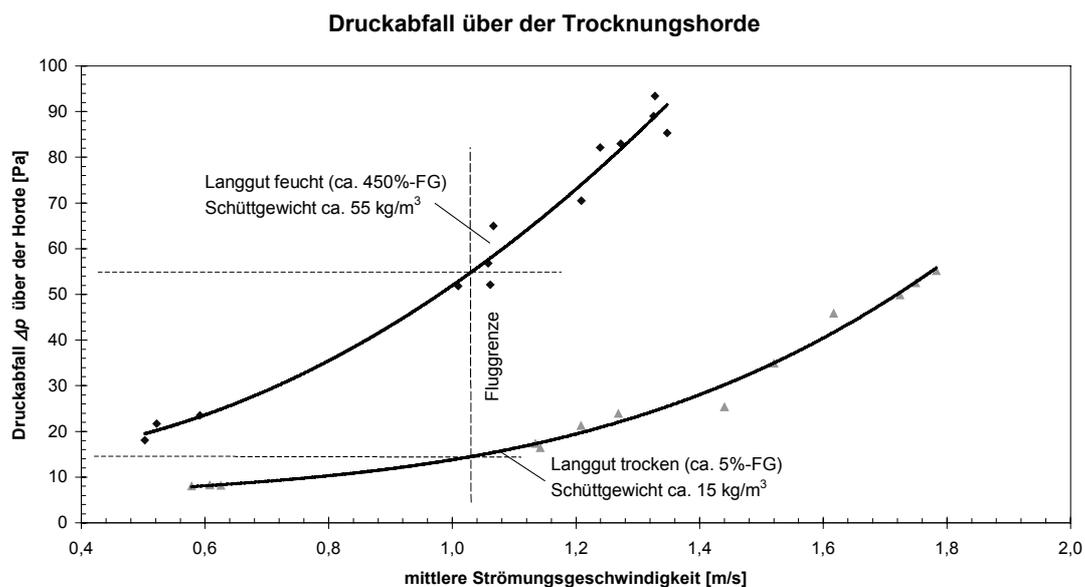


Bild 36 Druckabfall über einer Gutsschüttung aus Weidelgras mit theoretischer Fluggrenze (Versuchsreihe A)

5.4.2 Strömungsgeschwindigkeit, Eintrittstemperatur und Trocknungszeit

Über die Strömungsgeschwindigkeit und Eintrittstemperatur wird maßgeblich die zugeführte Energie und damit die Trocknungsleistung einer Anlage bestimmt. In Tabelle 19 ist der Einfluss dieser beiden Größen auf die Trocknungszeit dargestellt. Um einen Vergleich der einzelnen Trocknungsversuche zu ermöglichen, wurde eine konstante Strömungsgeschwindigkeit während der Versuchsdauer eingestellt.

Tabelle 19 Trocknungszeiten für Weidelgras/Langware von 450 %-FG bis 14 %-FG (Versuchsreihe A)

| Trocknungszeit in [sec] | Strömungsgeschwindigkeit v in [m/s] | | | |
|----------------------------|---------------------------------------|-----|-----|-----|
| | 0,4 | 0,8 | 1,0 | 1,2 |
| $T_{ein} = 100 \text{ °C}$ | 1.375 | 790 | 500 | 500 |
| $T_{ein} = 120 \text{ °C}$ | 860 | 510 | 390 | 390 |
| $T_{ein} = 140 \text{ °C}$ | 595 | 360 | 320 | 300 |

Tabelle 19 zeigt, dass sich eine Verringerung der Trocknungszeit nur für Gasgeschwindigkeiten bis ca. 1,0 m/s (bezogen auf Normzustand) erreichen lässt. Darüber hinaus wird für Temperaturen von 100 und 120 °C keine und bei 140 °C nur noch eine geringfügige Verkürzung der Trocknungszeit bewirkt. Damit ist bei einer Strömungsgeschwindigkeit um 1,0 m/s im Niedertemperaturbereich das Maximum an Wasserverdampfung erreicht. Eine weitere Steigerung der Gasgeschwindigkeit bleibt ohne Wirkung auf die Trocknungszeit. In Bild 37 ist beispielhaft für die Eintrittstemperatur von 120 °C und verschiedene Gasgeschwindigkeiten die Abnahme der Produktfeuchte dargestellt.

Die Auswirkung der Temperatur auf die Trocknungszeit wurde jeweils bei 100, 120 und 140 °C untersucht. In Bild 38 ist für die Geschwindigkeit von 1,0 m/s der Trocknungsverlauf von Weidelgras dargestellt. Die Trocknungszeit für 100 °C lag in diesen Versuchen bei 500 sec. Bei einer um 20 K höheren Eintrittstemperatur verkürzt sich die Trocknungszeit um 28 % auf 390 sec. Eine weitere Steigerung auf 140 °C führt nochmals zu einer Verkürzung der Trocknungszeit um 18 % auf 320 sec. Tabelle 19 zeigt, dass die Trocknungszeit bei niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten und höherer Temperatur größer ausfällt, während sich bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten eine höhere Temperatur kaum noch auswirkt. Das Maximum der räumlichen Nutzung des Trocknerquerschnitts wird erreicht, wenn bei weiterer Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit kein höherer Wasseraustrag erreicht werden kann. Trotz zur Verfügung stehender Wärmeenergie lässt sich nicht mehr Wasser verdampfen, da aus dem Pflanzeninneren die Diffusion den Feuchtetransport an die Oberfläche limitiert.

Versuche 7, 8, 9, 10 - Weidelgras Langware bei 120°C Eintrittstemperatur und verschiedenen Gasgeschwindigkeiten / Trocknungsgasströmen

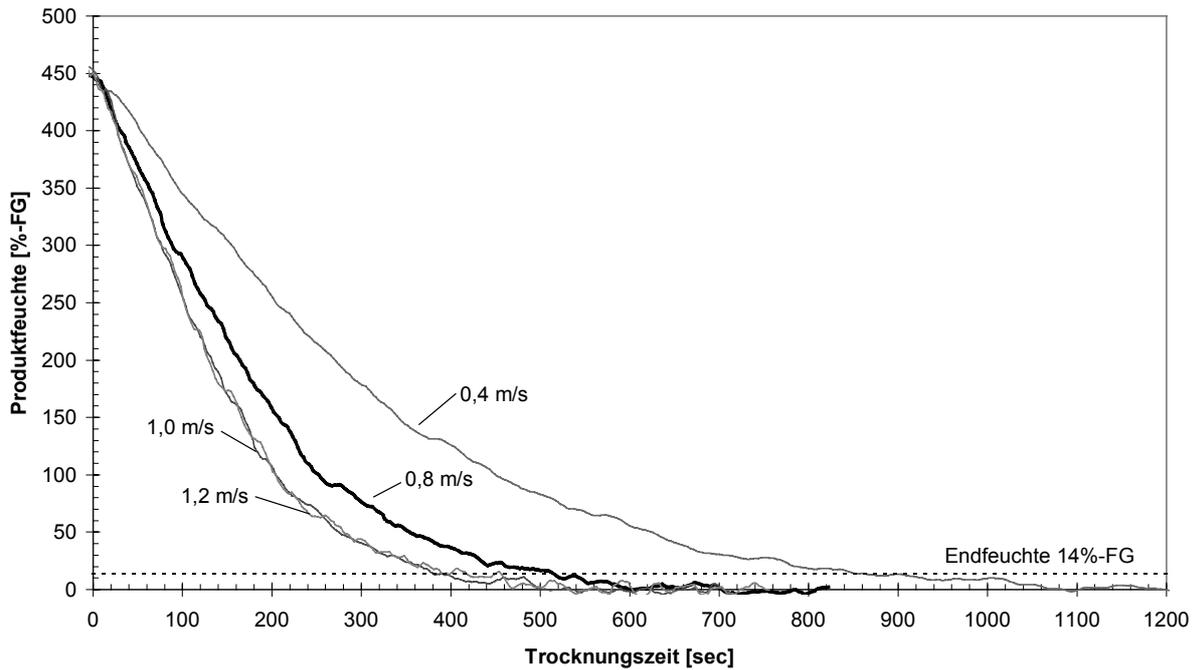


Bild 37 Verlauf der Trocknung von Weidelgras/Langware (450 %-FG – 14 %-FG) bei 120 °C und 0,4 / 0,8 / 1,0 und 1,2 m/s (bezogen auf Normzustand) (Versuchsreihe A)

Versuche 6, 9, 13 - Weidelgras Langware bei Eintrittstemperaturen 100, 120 und 140°C und bei einer Gasgeschwindigkeit von 1,0 m/s (bez. auf Normzustand)

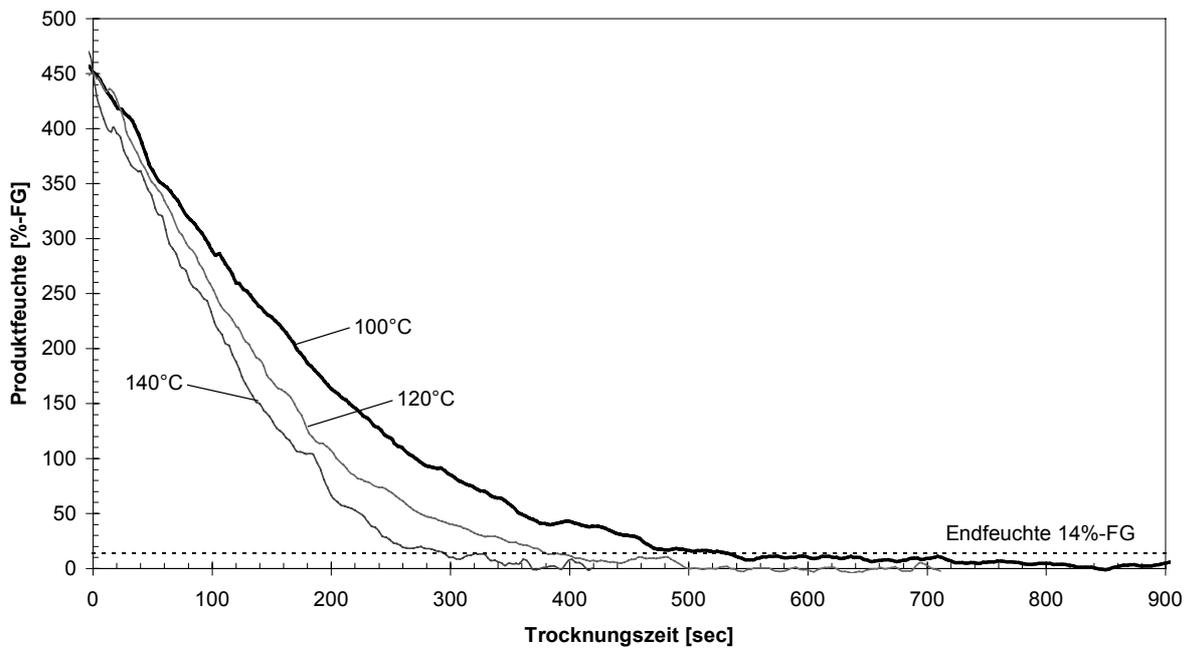


Bild 38 Verlauf der Trocknung von Weidelgras/Langware (450 %-FG – 14 %-FG) bei 1,0 m/s (bezogen auf Normzustand) und 100, 120 und 140 °C (Versuchsreihe A)

5.4.3 Umsetzungsgrad

Die Abkühlung der Trocknungsluft über der mit feuchtem Produkt gefüllten Horde ist ein Maß für die Umsetzung der bereitgestellten Trocknungsenergie. Voraussetzung zur Berechnung der Umsetzung ist die zeitgleiche Erfassung der Eintritts- und der Austrittstemperatur. Mit der Summation über den gesamten Trocknungszeitraum kann dann der Umsetzungsgrad für einen Trocknungsversuch berechnet werden.

Tabelle 20 Ideale Trocknungszeit und Umsetzungsgrad der Trocknungsenergie für die Trocknung von Weidelgras/Langware, Versuchsreihe A

| Strömungs- geschwindigkeit in [m/s] | ideale Trocknungszeit τ in [sec] | | | | Umsetzungsgrad Φ in [%] | | | |
|---|--|-----|-----|-----|---------------------------------|-----|-----|-----|
| | 0,4 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 0,4 | 0,8 | 1,0 | 1,2 |
| $T_{ein} = 100\text{ °C}$ | 284 | 146 | 115 | 99 | 22 | 19 | 23 | 20 |
| $T_{ein} = 120\text{ °C}$ | 231 | 116 | 93 | 78 | 28 | 23 | 23 | 19 |
| $T_{ein} = 140\text{ °C}$ | 191 | 96 | 76 | 63 | 32 | 25 | 25 | 18 |

Eine weitere Möglichkeit den Umsetzungsgrad der Trocknungsenergie zu ermitteln, ist es, das Verhältnis aus Trocknungszeit zur idealen Trocknungszeit nach Gleichung (79) zu bilden. Für die Versuchsreihe A ist in Tabelle 20 die ideale Trocknungszeit zusammen mit dem Umsetzungsgrad dargestellt.

Um verschiedenartiges Trocknungsgut und unterschiedliche Trocknungsparameter vergleichen zu können, können die ideale Trocknungszeiten und der Umsetzungsgrad betrachtet werden. In Tabelle 21 sind für die Versuchsreihe B mit Knaulgras die Trocknungszeiten, idealen Trocknungszeiten und der Umsetzungsgrad dargestellt.

Tabelle 21 Trocknungszeit, ideale Trocknungszeit und Umsetzungsgrad von Knaulgras als Langware und Kurzware von 450 %-FG bis 14 %-FG bei 0,7 m/s Trocknungsgeschwindigkeit (bezogen auf Normzustand) (Versuchsreihe B)

| Ein- tritts- temp- eratur | Knaulgras / Langware | | | Knaulgras / Kurzware | | |
|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| | Trocknungs- zeit t | ideale Trock- nungszeit τ | Umsetzungs- grad Φ | Trocknungs- zeit t | ideale Trock- nungszeit τ | Umsetzungs- grad Φ |
| | [sec] | [sec] | [%] | [sec] | [sec] | [%] |
| 100 °C | 1.140 | 175 | 15 | 1.250 | 177 | 14 |
| 120 °C | 930 | 141 | 15 | 1.100 | 141 | 13 |
| 140 °C | 660 | 116 | 18 | 875 | 116 | 13 |

5.4.4 Langware / Kurzware

Der Vergleich der Trocknungszeiten von Lang- und Kurzware ermöglicht eine Aussage mit welcher Konsistenz Grüngut am besten getrocknet werden kann. Kurzware hat ein deutlich besseres Schüttverhalten, wodurch die Bildung einer Schicht mit gleicher Dicke gut möglich ist. Damit ist eine gleichmäßige Durchströmung sichergestellt. Trotzdem benötigt Kurzware zur Trocknung deutlich längere Zeiten, wie aus Bild 39 und Tabelle 21 hervorgeht.

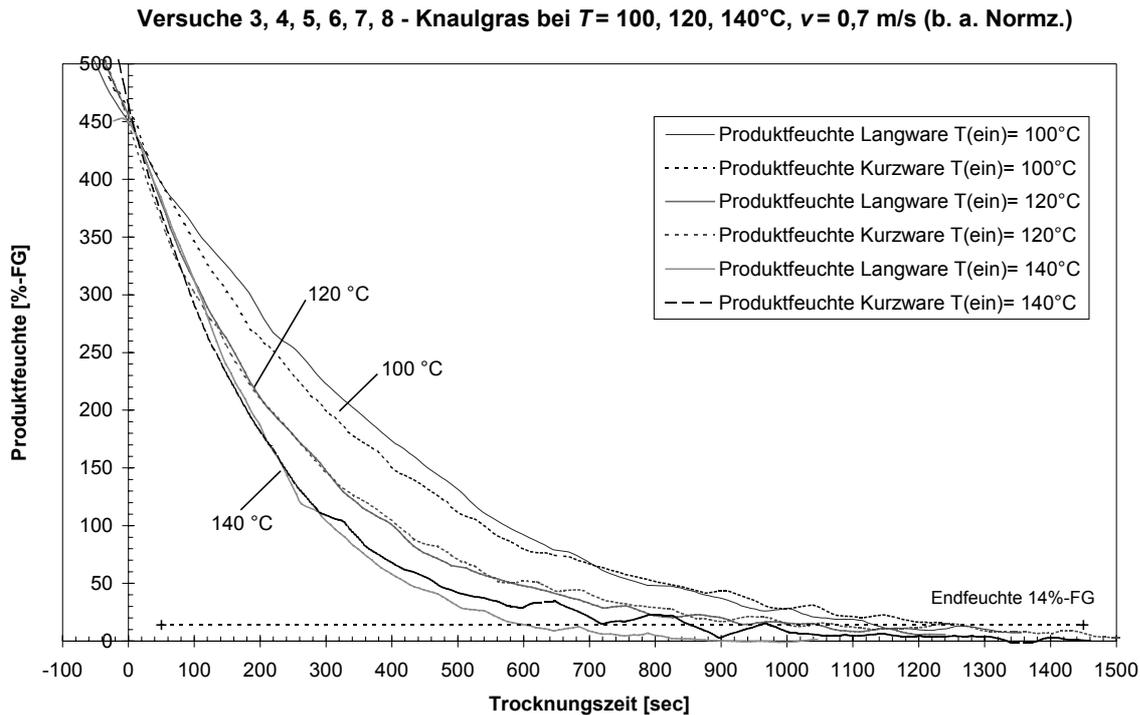


Bild 39 Trocknungskurven von Knaulgras als Langware und Kurzware von 450 %-FG bis 14 %-FG bei 0,7 m/s Trocknungsgeschwindigkeit (bezogen auf Normzustand) (Versuchsreihe B)

Eine Erklärung hierfür kann in dem beim Zerkleinern austretenden Pflanzensaft liegen, der ein Zusammenkleben einzelner Grashalme bewirkt. Die dadurch kleinere wirksame Oberfläche verlangsamt den Trocknungsvorgang.

5.4.5 Aufbereitung des Trocknungsgutes

In der Versuchsreihe C im Satztrockner wurde unbehandeltes und intensiv aufbereitetes Wiesengras mit einem Anfangswassergehalt von ca. 70–75 %-WG verglichen. Zur Aufbereitung wurde das Ausgangsmaterial mit einer Schlagvorrichtung intensiv bearbeitet. Die Aufbereitung war am Material durch Farbveränderung und Agglomerationserscheinungen deutlich erkennbar. Das Ausgangsprodukt wurde wieder unter möglichst konstanten Versuchsbedingungen

bis auf die Zielfeuchte von 14 %-FG getrocknet. In Bild 40 sind die Trocknungsverläufe von sechs Versuchschargen dargestellt.

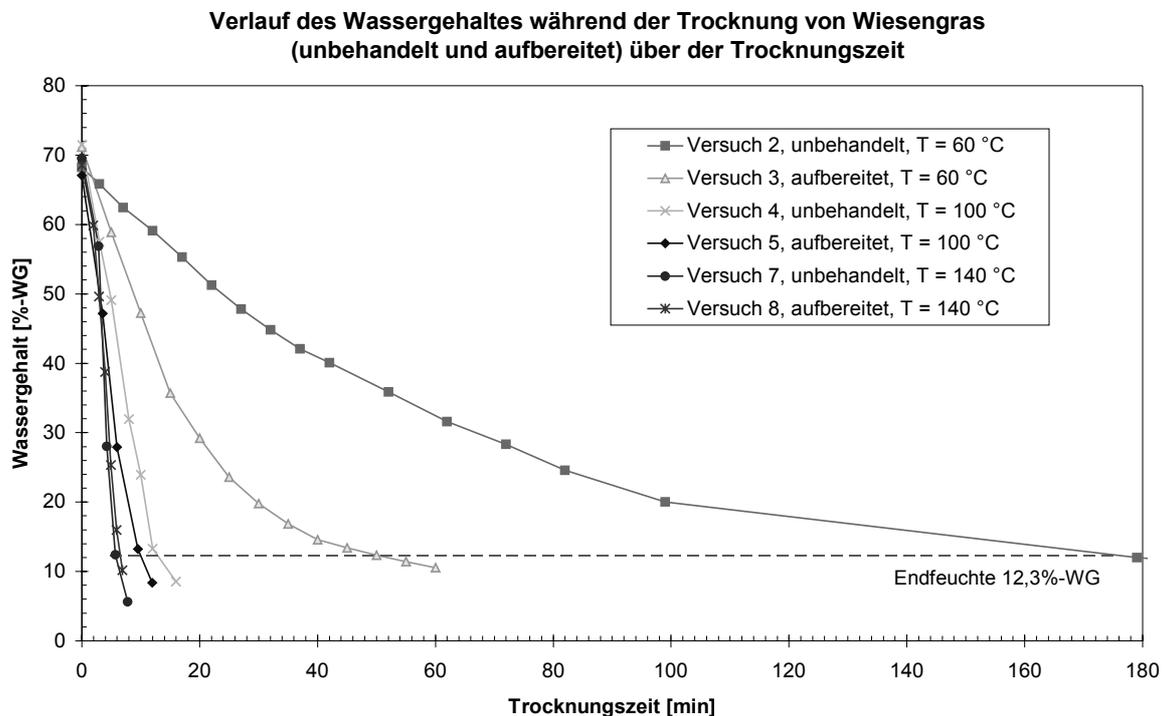


Bild 40 Verlauf der Abtrocknung von verschiedenen Wiesengrasschargen

Eine Aufbereitung des Produktes, bei dem die Zell- und Kapillarstrukturen des Grases zerstört werden, beschleunigt den Trocknungsvorgang bei niedrigen Temperaturen deutlich. Bei einer Trocknungstemperatur von 60 °C zeigen die Versuche 2 und 3 aus Tabelle 22, dass eine um 70 % kürzere Trocknungszeit desselben Ausgangsproduktes erreicht werden kann. Intensiv mechanisch behandeltes Material trocknet bei 60 °C in 50-60 min ab.

Tabelle 22 Gegenüberstellung der Trocknungszeiten von unbehandeltem und intensiv-aufbereitetem Grüngut (Versuchsreihe C)

| Trocknungszeit in [min] | Wiesengras als Trocknungsprodukt | |
|----------------------------|----------------------------------|----------------------|
| | Unbehandelt | Intensiv-aufbereitet |
| $T_{ein} = 60\text{ °C}$ | 180 – 210 | 50 – 60 |
| $T_{ein} = 100\text{ °C}$ | 15 | 10 – 12 |
| $T_{ein} = 140\text{ °C}$ | 6 | 5 – 6 |

Mit steigender Trocknungstemperatur nimmt die Wirkung der Aufbereitung ab. In den Versuchen 4 und 5 bei einer Trocknungstemperatur von 100 °C wird noch eine Verkürzung um 30 % erreicht, während bei den Versuchen 7 und 8 bei 140 °C kein Effekt mehr zu erkennen ist.

5.4.6 Weitere Einflüsse auf den Trocknungsverlauf

Luftfeuchtigkeit

Ein wesentlicher Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf den Trocknungsvorgang konnte bei Temperaturen über 60 °C nicht mehr festgestellt werden. Dies lag allerdings auch daran, dass bei den höheren Temperaturen keine hohe relative Feuchte in der Versuchsanlage realisiert werden konnte. Die dazu benötigten hohen Dampfbeladungen waren wegen ungenügender Isolierung und Dichtheit der Versuchsanlage nicht einstellbar.

Produktqualität

Bei einer Trocknungstemperatur von 60 °C konnte auch bei längerer Überdrying keine Produktschädigung z.B. durch Braunfärbung beobachtet werden.

Trockene Grashalme aus den Versuchen bei 100 und 140 °C weisen dagegen eine deutliche Braunfärbung auf. Diese Bräunung wird von der Maillard-Reaktion verursacht. Die festgestellten Restfeuchten zeigten, dass die Versuchschargen jeweils überdried waren, d.h. das Produkt wurde länger als notwendig hohen Trocknungstemperaturen ausgesetzt. Der Restfeuchtegehalt, ab dem es zu einem Anstieg der Produkttemperatur kommt, wird auch als Knickpunktsfeuchte bezeichnet. Die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt mit dem Übergang vom 1. zum 2. Trocknungsabschnitt stark ab und damit ist auch der Kühleffekt durch das verdampfende Wasser nicht mehr gegeben. Die Produkttemperatur kann dabei bis zur heißen Trocknungstemperatur ansteigen.

Trockenprodukt

Der Vergleich der Versuche von Wiesenras und Knaulras zeigt eine deutliche Abhängigkeit der Trocknungszeit von der untersuchten Rasart. Neben der Pflanzenart spielt auch das Wachstumsstadium der Pflanze zum Erntezeitpunkt eine Rolle. Beim Einsatz von vermehrt stängel- statt blattreicher Biomasse, wie z.B. bei Luzerne, ist eine längere Trocknungszeit messbar. Dies lässt sich durch die mehrschichtigen Zellverbände mit einer kleineren aktiven Oberfläche zur Verdampfung des Zellwassers erklären.

Die festgestellten Unterschiede in der Trocknungszeit liegen in einer für Naturprodukte zu erwartenden Schwankungsbreite. Die unterschiedliche Trocknungsdauer stellt erhöhte Anforderungen an die Regelungstechnik einer Trocknungsanlage.

6 Energieoptimierte Niedertemperaturtrocknung

Ziel von Betrachtungen und Verfahren muss es sein, ein energieoptimiertes Niedertemperaturtrocknungsverfahren auszuwählen. Der Bandtrockner ist von den gängigen thermischen Trocknungssystemen für Niedertemperatur geeignet. Eine Verwendung in der Grünguttrocknung ist bisher nicht bekannt und erfordert die Gestaltung als energieoptimiertes System. Dazu sind die Abgastemperatur und die Wasserbeladung des einfachen Durchlufttrockners und des Umlufttrockners zu betrachten. Der Energieeinsatz an Wärme und Strom muss berechnet und ein Minimum für den Energieeinsatz bestimmt werden. Zu diesem optimalen System lässt sich für geänderte Randparameter wie Trocknungstemperatur, Abgassättigung, Druckabfall und Kostenfaktor Wärme/Strom dann eine Sensibilitätsbetrachtung anstellen.

Über Trocknungsversuche mit Grüngut auf einem kleinen Versuchsbandtrockner lassen sich die Werte der Trocknungszeit und Strömungsgeschwindigkeit ermitteln, die für die Auslegung der Trocknungsanlage benötigt werden.

6.1 Auswahl des Niedertemperatur - Trocknungssystems

6.1.1 Auswahlkriterien

Zur Auswahl eines geeigneten Niedertemperaturtrockners wurden die gängigen thermischen Trocknungssysteme untersucht. In den folgenden Übersichten sind die gängigen Grundsysteme von Trocknungsanlagen dargestellt. Je nach Anwendungsgebiet und Trocknungsaufgabe sind diese Grundformen weiterentwickelt worden und daraus entsprechende Sonder- und Spezialtrockner entstanden. Oft wurden dabei noch Zusatzaggregate (Bürsten, Paddelwender, Düsenstöcke) in die Trocknungsanlagen integriert, um den speziellen Anforderungen der Produkte zu genügen.

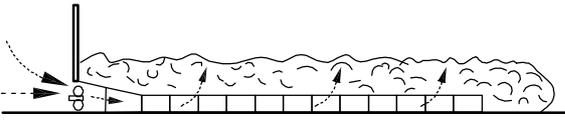
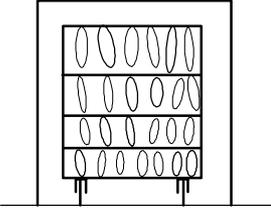
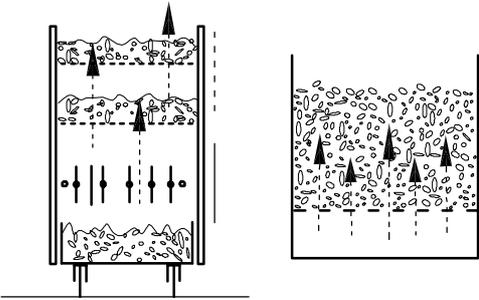
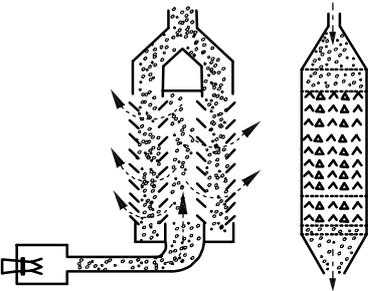
Der Bandtrockner hat sich dabei mit den Anforderungen:

- kontinuierlicher Prozess mit hohem Durchsatz
- indirekte Niedertemperaturtrocknung mit Dampfbeheizung und
- feuchtes Grüngut als Trocknungsgut

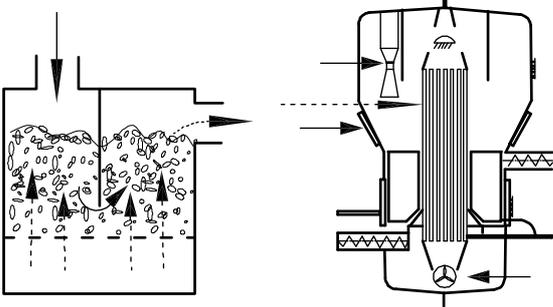
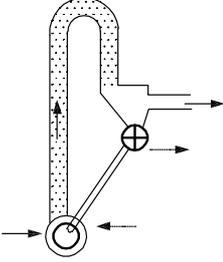
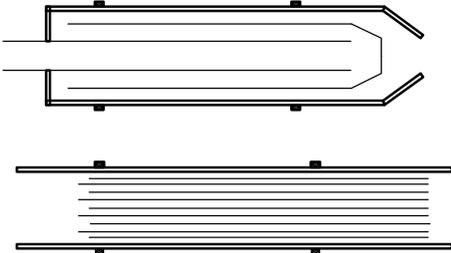
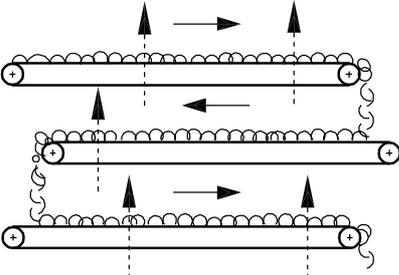
als das System mit den am besten geeigneten Voraussetzungen erwiesen. Für alle weiteren Betrachtungen wird daher nur noch das System Bandtrockner zugrundegelegt.

6.1.2 Trocknungssysteme mit niedriger Verdampfungsleistung

Trocknungssysteme mit niedriger Verdampfungsleistung sind meistens nur teilautomatisiert oder sogar nur manuell bedienbar. Der Durchsatz an Trockenprodukt ist daher oft gering, die Trocknungszeit des Trocknungsproduktes und Verweilzeit im Trockner ist lang und damit die räumliche oder flächenbezogene Verdampfungsleistung entsprechend niedrig.

| | |
|--|--|
| <p>Belüftungstrocknung</p>  <p>Einsatz: landwirtschaftlicher Betrieb, Nachtrocknung im Heuschober</p> <p>Merkmale: meist Kaltbelüftungssysteme, bedingt automatisierbar</p> <p>Produkt: langhalmiges Material</p> <p>Nachteil: lange Trocknungszeiten, großer Platzbedarf</p> <p>Beheizung: -</p> | <p>Kammertrockner</p>  <p>Einsatz: Holztrocknung, Lackierstraßen</p> <p>Merkmale: für nicht schüttfähige Produkte, längere Trocknungszeiten, relativ einfache Bedienbarkeit</p> <p>Produkt: Stückgüter</p> <p>Nachteil: diskontinuierliche oder taktweise Beschickung, große Abmessungen</p> <p>Beheizung: alle Formen der Beheizung üblich</p> |
| <p>Satz-, Horden- oder Flächentrockner</p>  <p>Einsatz: in der Nahrungsmittelerzeugung, Tee, Gewürztrocknung</p> <p>Merkmale: manueller Trockenmaterialwechsel</p> <p>Nachteil: wegen Bedienbarkeit nur kleine Trocknungsflächen, Wärmeverluste bei Hordenwechsel</p> <p>Beheizung: alle Formen der Beheizung üblich</p> | <p>Kontinuierlicher Schachttrockner</p>  <p>Einsatz: Getreide und Maistrocknung</p> <p>Merkmale: sehr gut rieselfähige Produkte, Körner, gut automatisierbar</p> <p>Nachteil: Verstopfungsgefahr, ungünstig bei wechselnden Produkteigenschaften, relativ träge Regelbarkeit</p> <p>Beheizung: meist direkt über Trocknungsgas</p> |

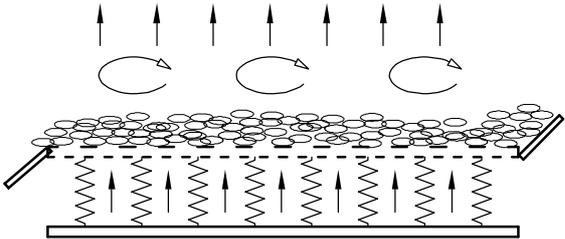
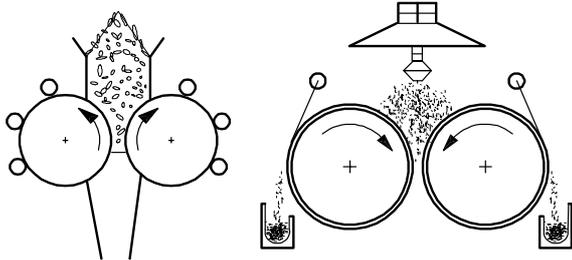
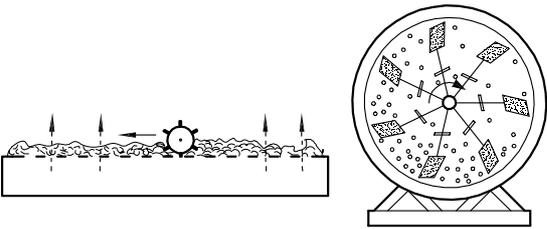
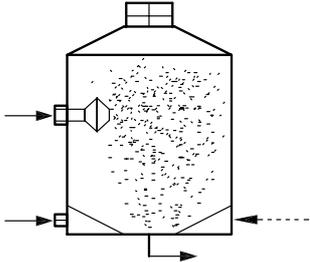
6.1.3 Trocknungssysteme mit hoher Verdampfungsleistung

| | |
|---|--|
| <p>Wirbelschichttrockner</p>  <p>Einsatz: industrielle Einsatzgebiete, Klärschlamm-trocknung</p> <p>Merkmale: hoher Wärmeaustausch bei nahezu isothermen Trocknungsbedingungen möglich</p> <p>Produkt: fluidisierbares, einheitliches Produkt</p> <p>Nachteil: Gutsbelastung / Abrieb durch ständige Bewegung im Bett, Abluft muss entstaubt werden</p> <p>Beheizung: vorzugsweise indirekt</p> | <p>Stromtrockner / pneumatischer Trockner</p>  <p>Einsatz: chemische Industrie</p> <p>Merkmale: konvektiver Wärmeaustausch während dem Produktmitriss im heißen Gasstrom, kurze Kontakt- und Trocknungszeit</p> <p>Produkt: flugfähige, pulverförmige oder feinkörnige homogene Materialien</p> <p>Nachteil: Verschleiß bei abrasiven Produkten, labiler Betriebszustand, Produktabtrennung und Entstaubung der Abluft</p> <p>Beheizung: direkte und indirekte Beheizung</p> |
| <p>Trommeltrockner</p>  <p>Einsatz: sehr vielseitiger Einsatz auch bei problematischem, klebrigem Material und Schlämmen</p> <p>Merkmale: hoher Produktdurchsatz möglich, diverse Ausführungsart durch Trommeleinbauten möglich</p> <p>Produkt: sehr vielseitiger Einsatz auch bei schwierigem Material, weiter Einsatzbereich für Produktstückigkeit unempfindlich gegen Gutwechsel bzw. Schwankungen in der Produkteigenschaft</p> <p>Nachteil: Gutsbelastung / Abrieb durch ständige Rotation, Abluft muss entstaubt werden</p> <p>Beheizung: direkte Befuerung mit Abgas üblich</p> | <p>Bandtrockner</p>  <p>Einsatz: Nahrungsmittelindustrie, Chemie, Tabaktrocknung, Faserherstellung, etc.</p> <p>Merkmale: Trocknungsgas durchströmt ruhendes Produkt im Kreuzstrom, wechselnde Strömungsrichtung ermöglicht sehr schonende Trocknung, langsame Trocknung, mit regelungstechnischem Aufwand gut automatisierbar</p> <p>Produkt: Stückgut und Schüttgut, auch strukturempfindliche Produkte, vielseitige Einsatzmöglichkeit</p> <p>Nachteil: längere Einstellzeiten erforderlich, empfindlich bei Gutwechsel und Änderungen der Produktausgangsfeuchte</p> <p>Beheizung: Dampf, Thermoöl, ...</p> |

Trocknungssysteme mit hoher Verdampfungsleistung und Durchsatz an Trocknungsprodukt sind oft vollautomatisiert. Über die Beheizung wird eine große räumliche bzw. flächenbezogene Verdampfungsleistung erreicht.

6.1.4 Sonderarten von Trocknungssystemen

Aus den vorgestellten Grundtypen wurden diverse Sonderbauformen für spezielle Produkte entwickelt. Vier häufig eingesetzte Sondertrockner sind hier dargestellt:

| | |
|--|--|
| <p>Vibrationstrockner</p>  <p>Einsatz: Chemieindustrie Merkmale: ähnlich Bandtrockner, aber Produktfortbewegung durch vibrierendes Lochband oder Rost Produkt: schüttfähige, körnige Produkte stark klebende Materialien Beheizung: indirekte Beheizung üblich</p> | <p>Walzentrockner</p>  <p>Einsatz: Papierindustrie, Nahrungsmittelindustrie Merkmale: Trocknungswärmezufuhr über Wärmeleitung durch beheizte Walzen, kurze Trocknungszeiten Produkt: pastöse, fließfähige Produkte Beheizung: indirekt mit Dampf, Thermoöl, ...</p> |
| <p>Wurfschaufeltrockner</p>  <p>Einsatz: Ausführungen als Band- und Trommeltrockner, geschlossene Trocknersysteme Merkmale: umlaufende Schleuderscheiben mischen und fördern das Trocknungsgut Produkt: Materialien hoher Feuchte, Schlämme, geruchsintensive Stoffe Beheizung: direkte und indirekte Beheizung</p> | <p>Sprühtrockner</p>  <p>Einsatz: Chemieindustrie, Nahrungsmittelindustrie Merkmale: Versprühung des Trocknungsstoffes, schnelle Abtrocknung im Fallstrom, pulverisiertes Endprodukt Produkt: gelöste Produkte, Emulsionen, Suspensionen Beheizung: indirekte Beheizung üblich</p> |

6.2 Energieoptimierung beim Niedertemperaturtrockner

6.2.1 Niedertemperaturtrockner im Durchluftbetrieb

Das einfachste thermische Trocknungssystem mit einem Bandtrockner besteht in einer Durchlufttrocknung bei dem der Trocknungsgasstrom das Trocknungsband im Kreuzstrom durchströmt. Der Betriebsbereich für solche Systeme liegt üblicherweise zwischen 60 und 160 °C Eintrittstemperatur. In Bild 41 ist ein Durchlufttrockner gezeigt und in Bild 42 ist für 140 °C Eintrittstemperatur der Trocknungsverlauf im h-x Diagramm dargestellt.

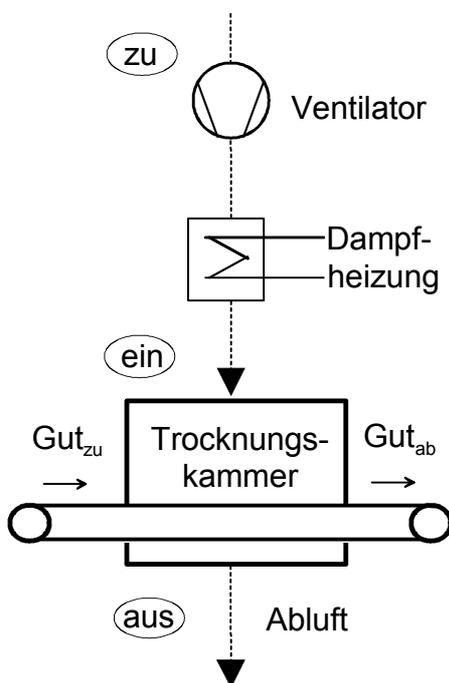


Bild 41 Durchlufttrocknung

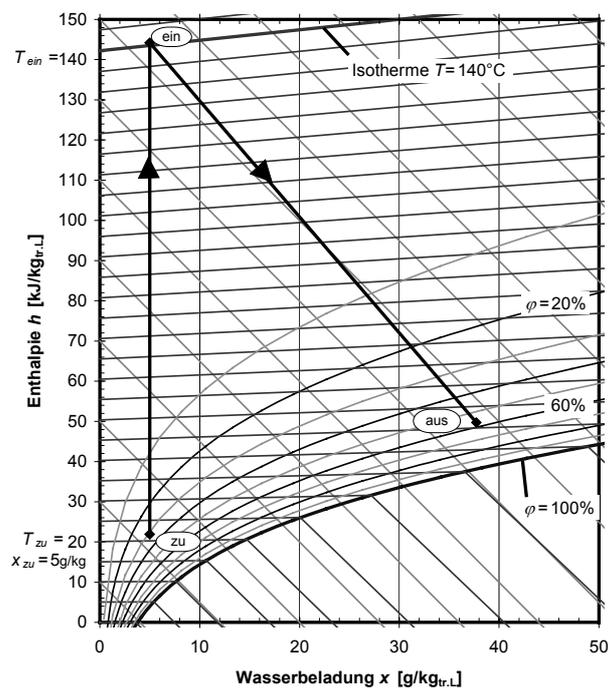


Bild 42 Trocknungsverlauf im h-x Diagramm

Prinzipiell ist dabei auch eine kalte Durchlüftung ohne Beheizung möglich. Dieses System würde der Belüftungstrocknung aus Kapitel 6.1.2 entsprechen. Ob dabei eine Trocknung stattfindet, hängt vom Zustand der Luft und der Feuchte des Trocknungsgutes ab.

Eine Beheizung des Trocknungsgases bringt mit steigender Temperatur folgende Effekte mit sich:

- die Wasseraufnahme des Trocknungsgases wird erhöht (Bild 43),
- der Wasserentzug aus dem Produkt wird beschleunigt,
- die Trocknungszeit für das Produkt wird verkürzt und

- der Bedarf an elektrischer Energie für die Wasserverdampfung geht stark zurück (Bild 44).

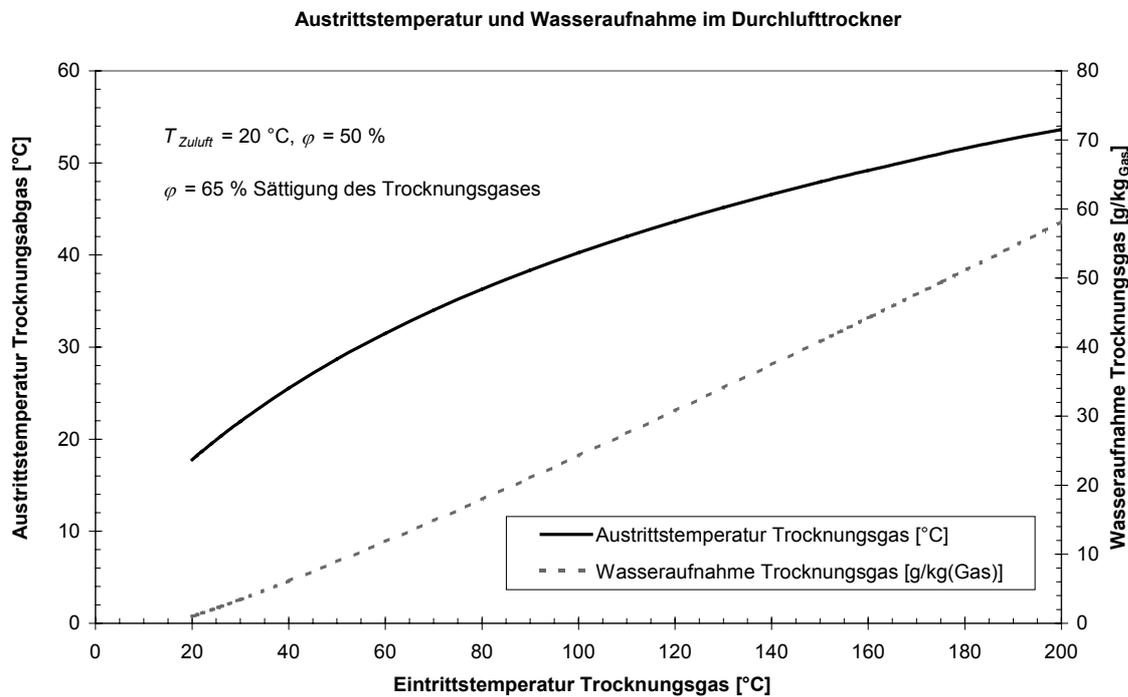


Bild 43 Austrittstemperatur und Wasseraufnahme eines Trocknungsgases mit steigender Eintrittstemperatur

Eine hohe Energieausnutzung könnte mit einem Durchlufttrockner erreicht werden, wenn sich die erwärmte Trocknungsluft nach dem Kontakt mit dem Produkt wieder bis nahe der Zulufttemperatur bzw. Umgebungstemperatur abkühlt. Der überwiegende Teil der über die Beheizung zugeführten Energie verläßt dann den Trockner in Form von Verdampfungswärme des ausgetriebenen Wassers, während nur ein kleiner Teil an Restwärme im Trocknungsmedium verbleibe. Der Systemnutzungsgrad η_s wäre hoch. Da aber mit steigender Eintrittstemperatur wegen der zunehmenden Wasserbeladung des Trocknungsgases auch die Fortlufttemperatur ansteigt, ist eine Abkühlung wieder bis auf Zulufttemperatur meist nicht möglich. Wie Bild 44 zeigt, führt dieser Effekt zu einem erhöhten Wärmebedarf im Trockner, der allerdings mit steigender Eintrittstemperatur von einem Maximum bei ca. 50 °C (für die hier gewählten Zustände von $\varphi_{zu} = 50\%$ und $\varphi_{aus} = 65\%$) kontinuierlich zurückgeht. Der Gesamtenergiebedarf von Wärme und Strom hat sein Maximum bei der kalten Durchlufttrocknung und sinkt bei einer Erwärmung der Trocknungsluft kontinuierlich. Die Berechnung der Gesamtenergie aus dem Wärme- und Strombedarf ist in Kapitel 6.2.3 erläutert.

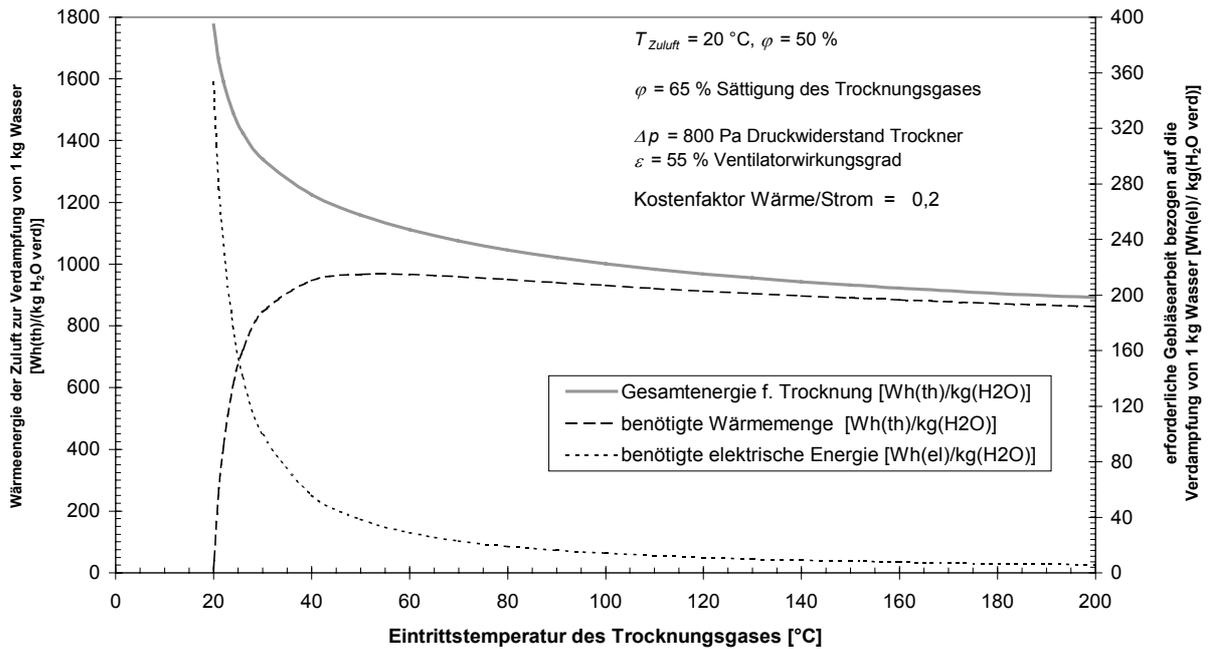


Bild 44 Energiebedarf einer einfachen Durchlufttrocknung in Abhängigkeit von der Eintrittstemperatur des Trocknungsgases

6.2.2 Niedertemperaturtrockner im Umluftbetrieb

Zur Verringerung des Wärmebedarfs gegenüber dem Durchlufttrockner kann das Abgas zurückgeführt und der Zuluft beigemischt werden. Die Menge des Abgases und entsprechend die Zuluftmenge wird dadurch stark reduziert. Das zurückgeführte Trocknungsgas wird wieder aufgeheizt und mit dem Produkt erneut in Kontakt gebracht. Durch die Zurückführung entfällt die Aufheizung der Zuluft von Umgebungstemperatur bis zur Abgastemperatur. Ein derartiger Umluftbetrieb ist in Bild 45 zusammen mit dem Verlauf der Umlufttrocknung im h-x Diagramm dargestellt.

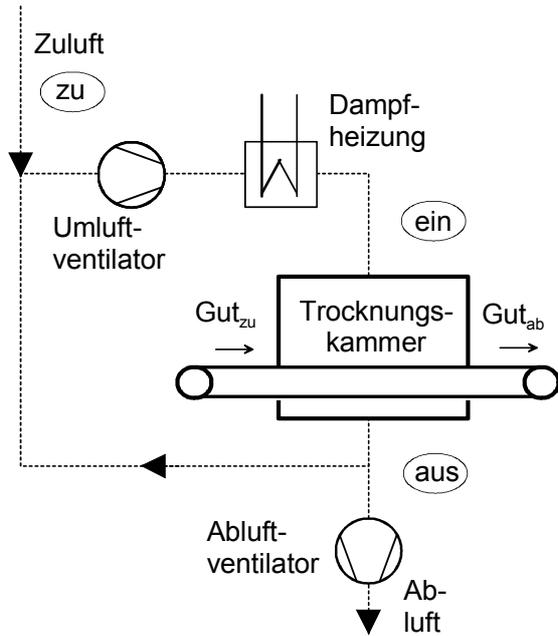


Bild 45 Einfacher Umlufttrockner

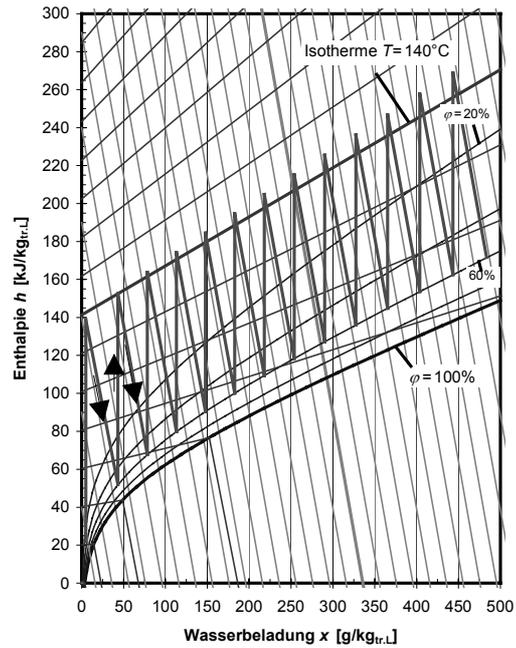


Bild 46 Umlufttrocknung im h-x Diagramm

Bei jedem Umlauf des Trocknungsmediums nimmt dieses über die Aufheizung und Abkühlung Wasserdampf auf. Der Wassergehalt im Trocknungsgas erhöht sich. Im Gegenzug bleibt das Trocknungsgas beim Verlassen des Trockners wärmer. In Bild 47 ist die steigende Abgastemperatur und die Kühlgrenztemperatur, welche die Produkttemperatur bestimmt, bei einer 65 %-igen Sättigung des Abgases über der Umlaufzahl dargestellt.

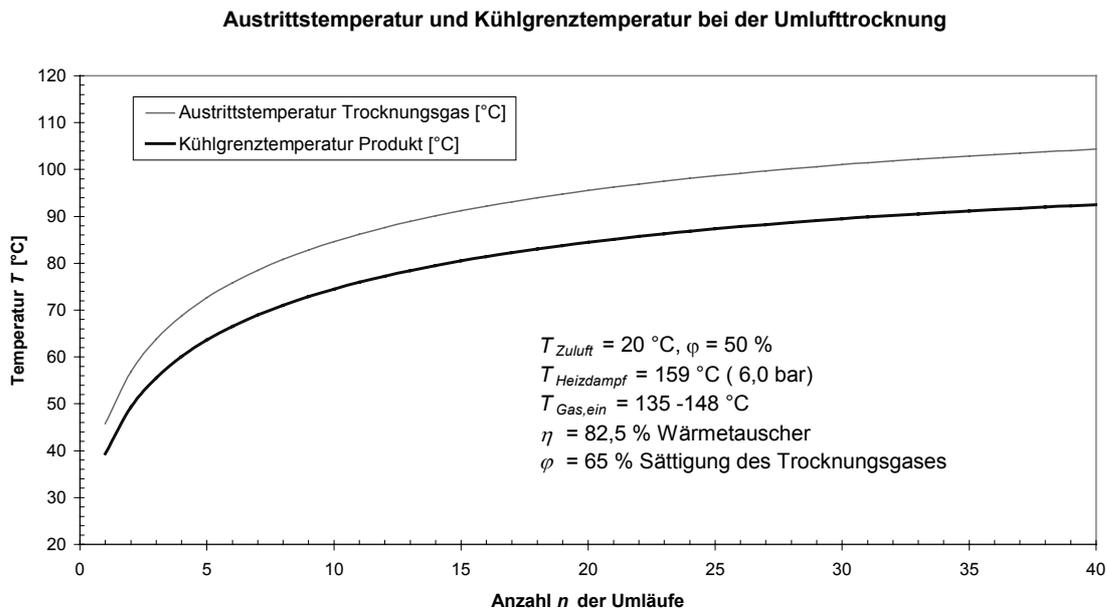


Bild 47 Austrittstemperatur eines Bandtrockners und Kühlgrenztemperatur des Produktes in Abhängigkeit von der Anzahl der Umläufe

Trotz steigender Abgas- und Produkttemperatur geht der benötigte Wärmebedarf für die Trocknung aufgrund der reduzierten Menge an trockenem Trägergas mit höherer Umlaufzahl zurück (Bild 48).

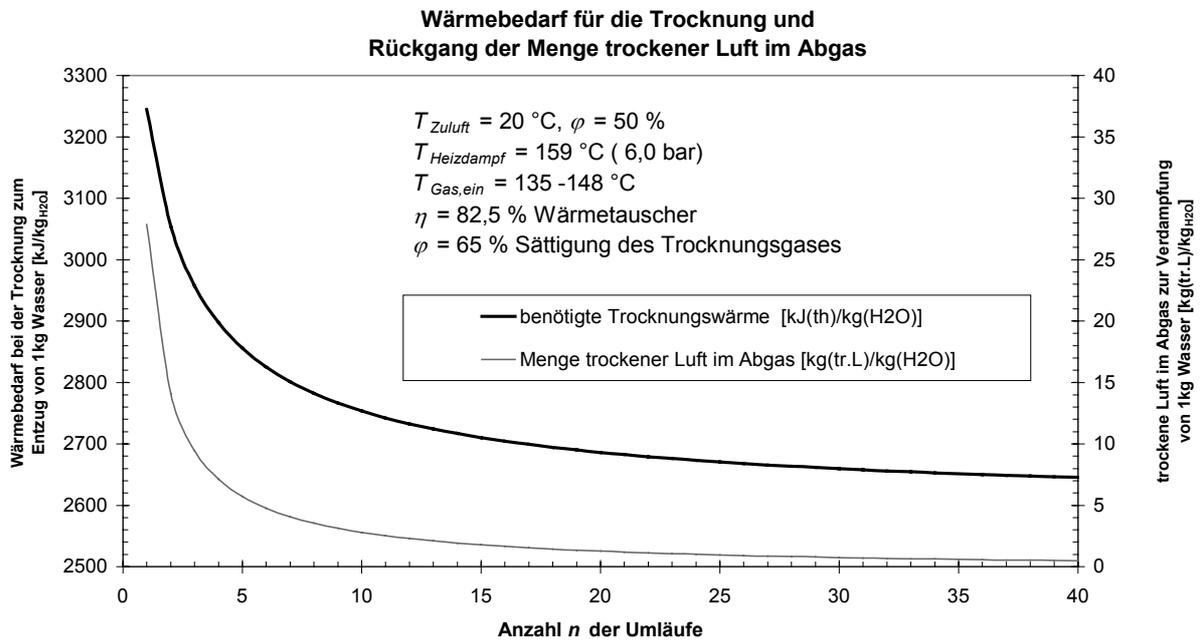


Bild 48 Wärmebedarf für die Trocknung und Rückgang der trockenen Luft im Abgas

Ungünstig für das Umluftsystem ist, dass mit der Zunahme der Wasserbeladung die Abgastemperatur (Bild 47) ansteigt und damit die nutzbare Energie infolge der kleineren Temperaturspanne zur Verdampfung des Wassers zurück geht. Dies ist in Bild 49 am Rückgang der Wasseraufnahme pro Umlauf zu erkennen.

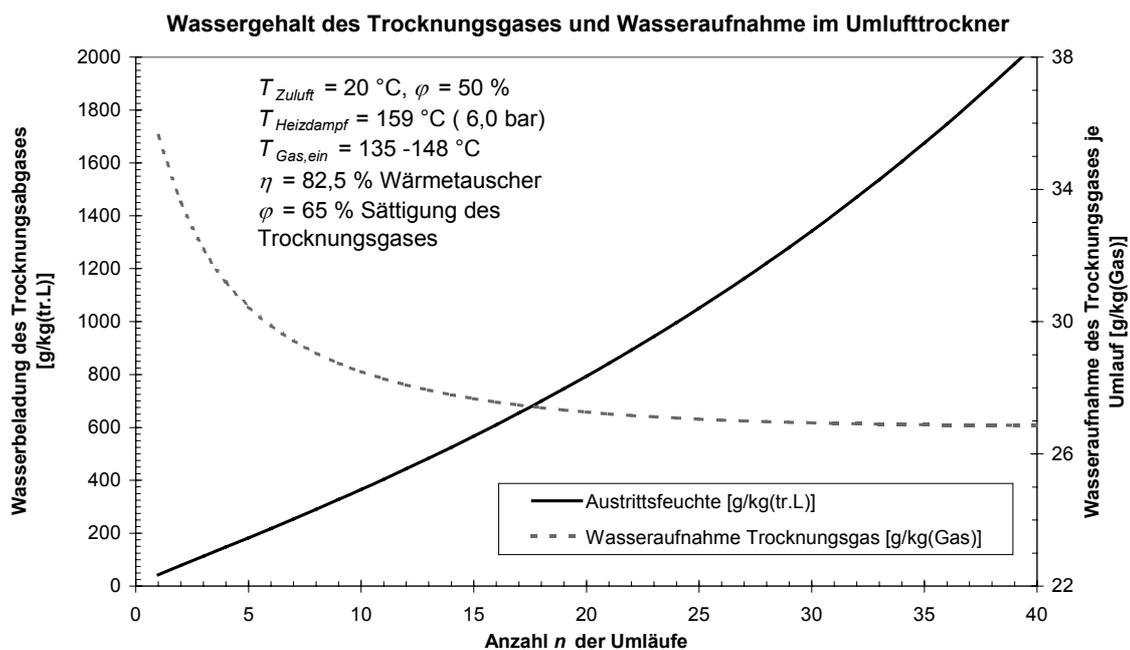


Bild 49 Steigender Wassergehalt im Trocknungsgas und Wasseraufnahme pro Umlauf

Trocknungsatmosphäre

Beim Betrieb eines Trockners im Umluftverfahren lässt sich Zahl der Umläufe des Trocknungsmediums nahezu beliebig erhöhen. Der Wassergehalt der trockenen Frischluft steigt mit der Umlaufzahl an und könnte bis zu einer Dampfatmosfera mit geringem Restluftanteil geführt werden. Bei einem theoretisch möglichen luftdichten System würde die Trocknung dann zunehmend mit dem Trocknungsmedium Dampf bzw. überhitztem Dampf erfolgen. Das Abgas aus dem Trockner wäre Dampf bei über 100 °C. Frischluft tritt aber bei einem realen System immer im Unterdruckteil des Trockners und über das Grüngut ein. Die sich einstellende Wasserbeladung der Zuluft zum Trockner errechnet sich dann aus dem Verhältnis von Frischluft zum umlaufenden Trocknungsgas.

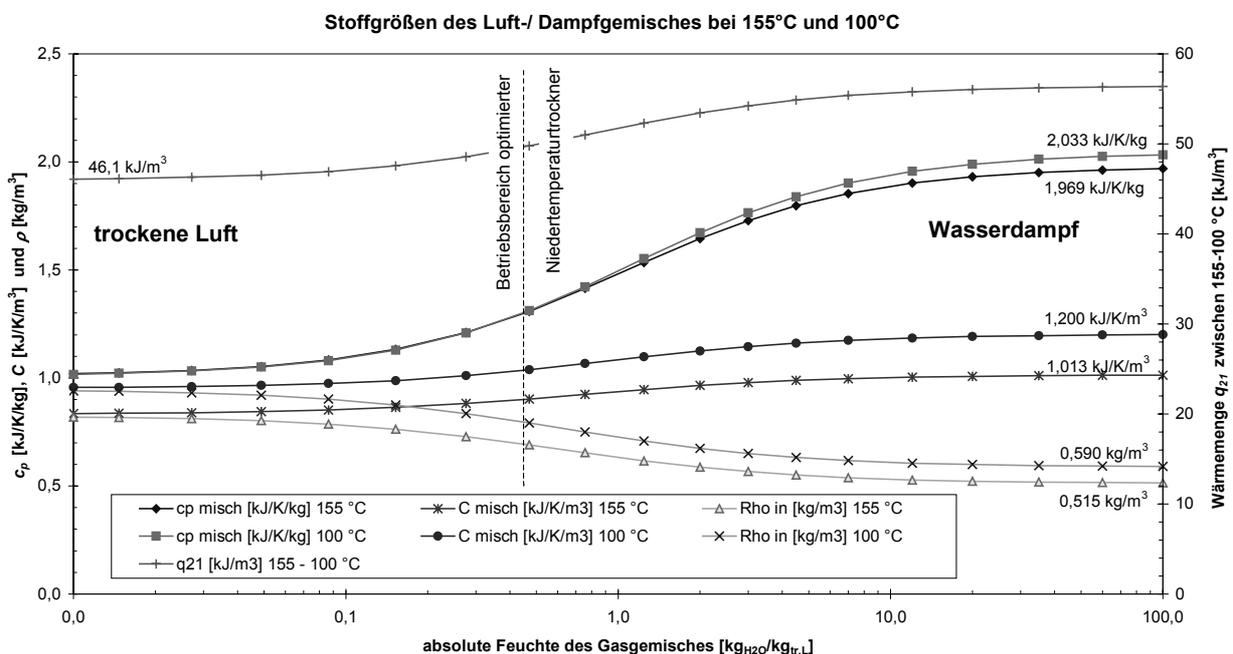


Bild 50 Stoffgrößen über dem Mischungsverhältnis von trockener Luft und Wasserdampf

In Bild 50 ist die Änderung der gewichts- und volumenbezogenen Wärmekapazitäten \bar{c}_p und \bar{C} , der Dichte ρ und der nutzbaren Wärme q_{21} zwischen 155 und 100 °C über dem Mischungsverhältnis von Luft mit Wasserdampf aufgetragen. Wie auch schon in den Kapiteln 4.1.5 bis 4.1.7 dargestellt, ist eine Trocknung mit Wasserdampf als Trocknungsmedium wegen des pro Volumeneinheit höheren Energieinhaltes vorteilhaft gegenüber der Trocknung mit Luft.

Eine Umlufttrocknung mit steigendem Wassergehalt ist daher energieoptimal und zugleich führt die Wasserdampfatmosfera zu günstigeren Stoffwerten im Gasmischung.

6.2.3 Energieoptimierter Bandtrockner für Niedertemperatur

Wärme- und Strombedarf

Für die Trocknung muss das Gas durch den Wärmeübertrager, die Produktschicht und das Trocknerband hindurchströmen, wofür Strömungsenergie benötigt wird. Der bei jeder Strömung auftretende Druckverlust und der damit verbundene Bedarf an elektrischer Energie bringen es mit sich, dass ein betriebliches Optimum von Wärme- und Strombedarf existiert. In Bild 51 sind der Wärmebedarf und der elektrische Energiebedarf zur Verdampfung von Wasser bei steigenden Umlaufzahlen aufgetragen.

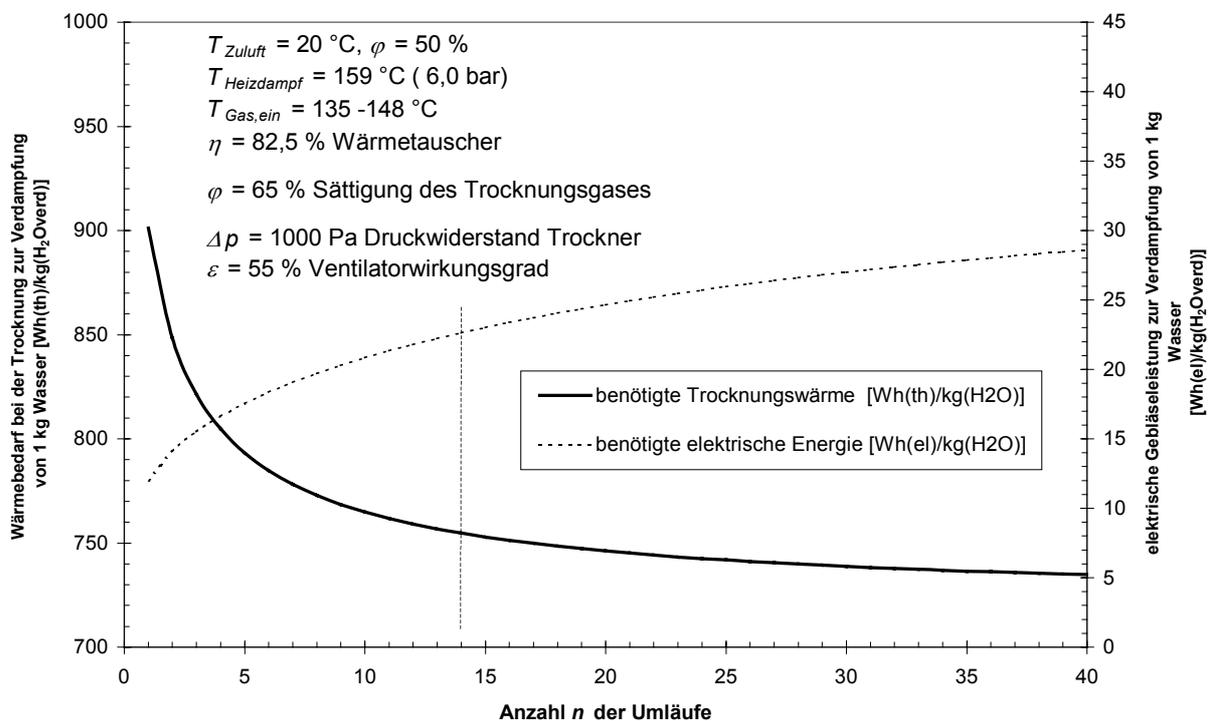


Bild 51 Wärmebedarf und Gebläseleistung bezogen auf eine Verdampfung von 1 kg Wasser

Durch die Bewertung der thermischen und elektrischen Energie über das Preisverhältnis zu dem diese bezogen werden können, lässt sich ein Optimum für die Umlaufzahl berechnen. In Bild 52 ist für einen Kostenfaktor Wärme/Strom von 0,2 die Entwicklung des Gesamtenergieaufwandes dargestellt (z.B. Wärmepreis $1,6 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}_{th}}$ und Strompreis $7,9 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}_{el}}$). Das energetische Optimum für den Kostenfaktor Wärme/Strom von 0,2 liegt etwa bei 14 Umläufen.

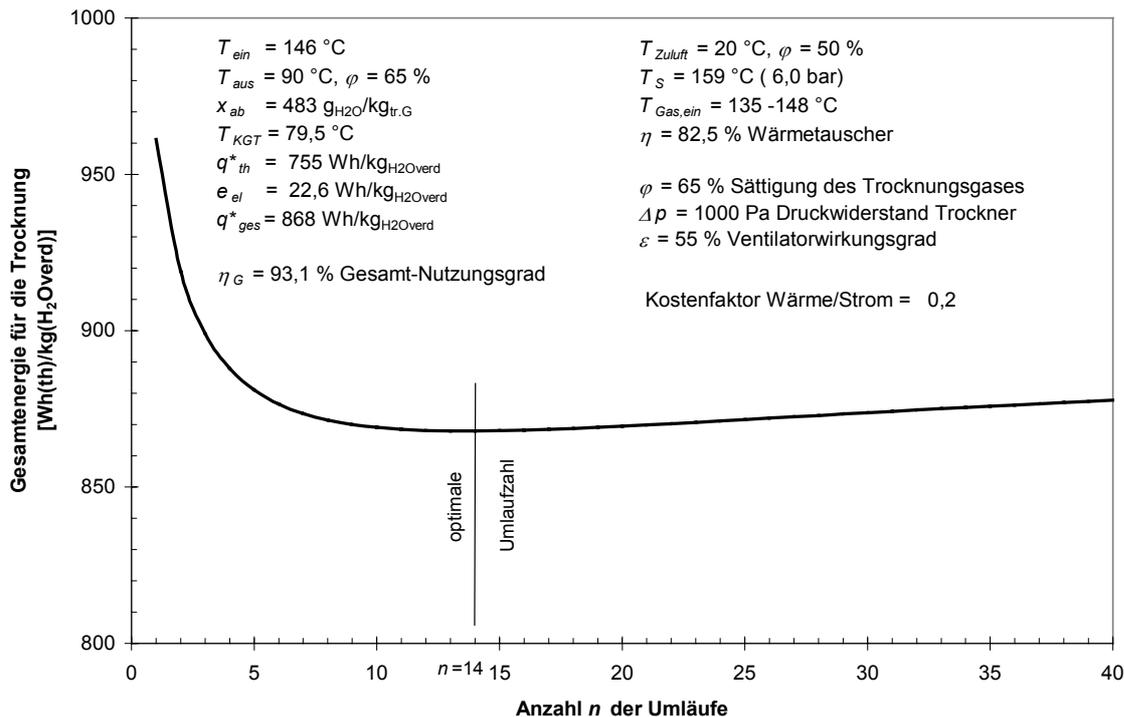


Bild 52 Gesamtenergie für die Trocknung über der Anzahl der Umläufe

Für die optimale Umlaufzahl von 14 ergibt sich eine Eintrittstemperatur von 146 °C, eine Austrittstemperatur von 90 °C und eine Wasserbeladung im System von 483 g/kg_{tr.G}. Eine weitere Aufsättigung mit Wasserdampf kostet mehr elektrische Energie als diese an Einsparung von thermischer Energie erbringt. Eine weitere Erhöhung der Umlaufzahl und damit die Schaffung einer höher konzentrierten Dampfatmosfera ist erst gerechtfertigt, wenn der Abdampf in einem weiteren System kondensiert und die Wärme daraus nochmals genutzt werden könnte. Auf diese Möglichkeit wird hier wegen der Problematik der Entsorgung des belasteten Kondensats nicht eingegangen. Festzustellen ist, dass der Wärmebedarf mit 755 Wh_{th}/kg_{H₂O} ohne Berücksichtigung der sonstigen Verlustwärme niedriger und der Strombedarf mit 22,6 Wh_{el}/kg_{H₂O} eines optimierten Umlufttrockners etwas höher als bei der Heißlufttrocknung aus Kapitel 2.2.4 liegen.

6.2.4 Sensibilitätsbetrachtungen zur optimalen Umlaufzahl

Die optimale Umlaufzahl von 14 wurde für die in Bild 52 gegebenen Zustände berechnet. Für die Parameter Eintrittstemperatur, Abgassättigung, Druckabfall in der Trocknungsanlage und Kostenfaktor Wärme/Strom wurden realistische Werte verwendet. Im Folgenden wird die Auswirkung auf die optimale Umlaufzahl für veränderte Zustände betrachtet.

Eintrittstemperatur

Ausgehend von einer mit 6 bar-Dampf ($T_s = 159\text{ }^\circ\text{C}$) beheizten Trocknungsanlage steigt die optimale Umlaufzahl bei einer Erhöhung des Dampfdruckes weiter an (Bild 53). Bei einem niedrigeren Druck des Heißdampfes geht die optimale Umlaufzahl zurück bis schließlich bei 0,3 bar ($T_s = 69\text{ }^\circ\text{C}$ und $T_{in} = 60\text{ }^\circ\text{C}$) Kondensationsdruck eine reine Durchlufttrocknung ohne Rückführung ($n=1$) am wirtschaftlichsten ist. Zudem ist in Bild 53 die zugehörige Änderung des Gesamtwärmeverbrauchs eingetragen, der bei niedriger Eintrittstemperatur entsprechend ansteigt.

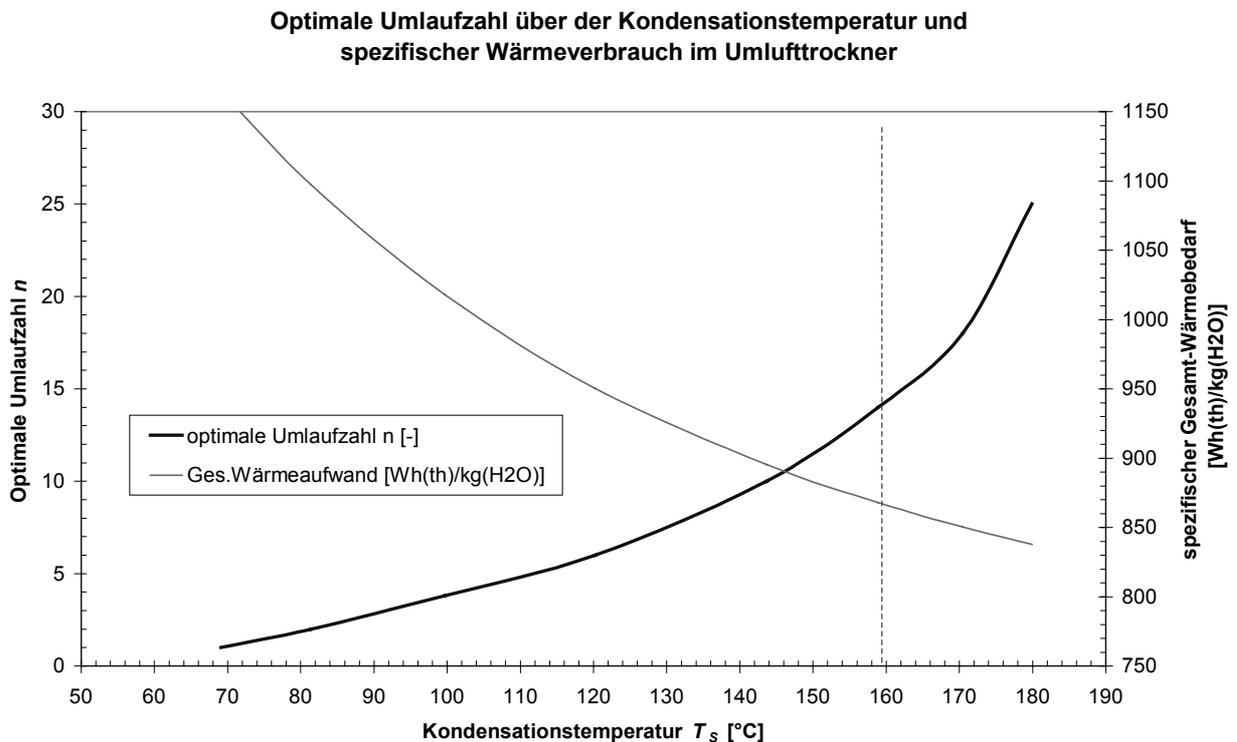


Bild 53 Optimale Umlaufzahl über der Kondensationstemperatur T_s

Abgassättigung

Die für die Berechnungen angesetzte Abgassättigung von 65 % ist hoch, sollte aber mit einer Trocknungsmediumsführung vom trockenen zum feuchten Produkt erreichbar sein. Aber auch wenn das Trocknungsabgas nur mit 50 % Sättigung oder sogar noch trockener abgeführt werden müsste, würde die Umlaufzahl nur geringfügig abfallen. Der Gesamtwärmebedarf im Umlufttrockner ändert sich vor allem aufgrund der höheren Abgastemperatur (Bild 54).

Optimale Umlaufzahl über der Sättigung des Trocknerabgases und spezifischer Gesamt-Wärmeverbrauch im Umlufttrockner

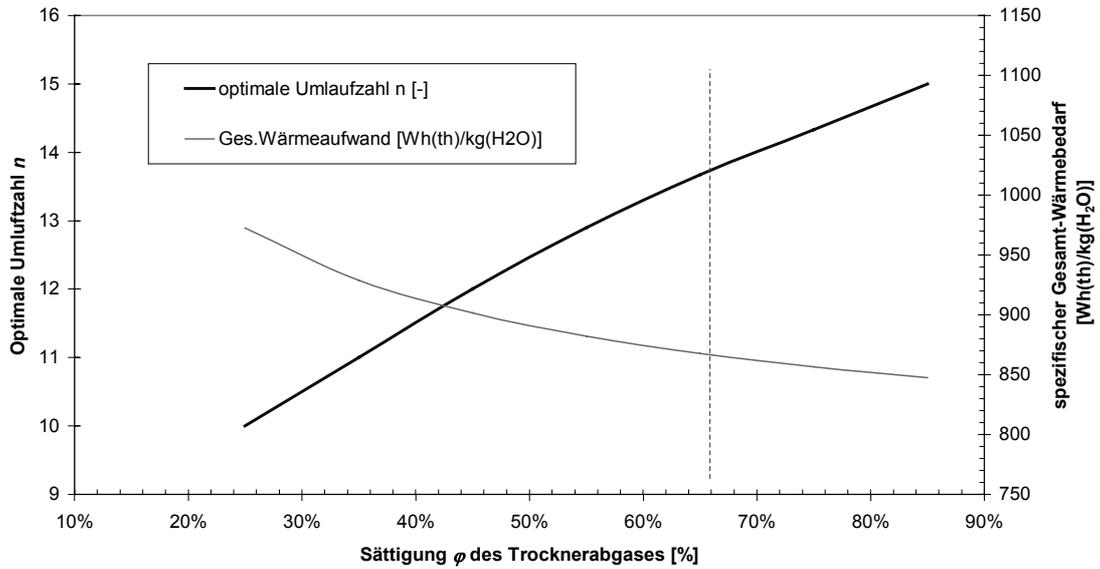


Bild 54 Optimale Umlaufzahl über der Sättigung φ des Trocknerabgases

Druckabfall in der Trocknungsanlage

Der Druckabfall in der Trocknungsanlage wird von den Komponenten des Trocknungsbandes, dem Wärmeübertrager und der strömungstechnischen Gestaltung des Trocknerinnenraumes sowie der Produktschüttung auf dem Band bestimmt. Die Höhe des Druckabfalls hängt von der Strömungsgeschwindigkeit im Betriebszustand des Trockners ab.

Optimale Umlaufzahl über dem Druckabfall und spezifischer Gesamt-Wärmeverbrauch im Umlufttrockner

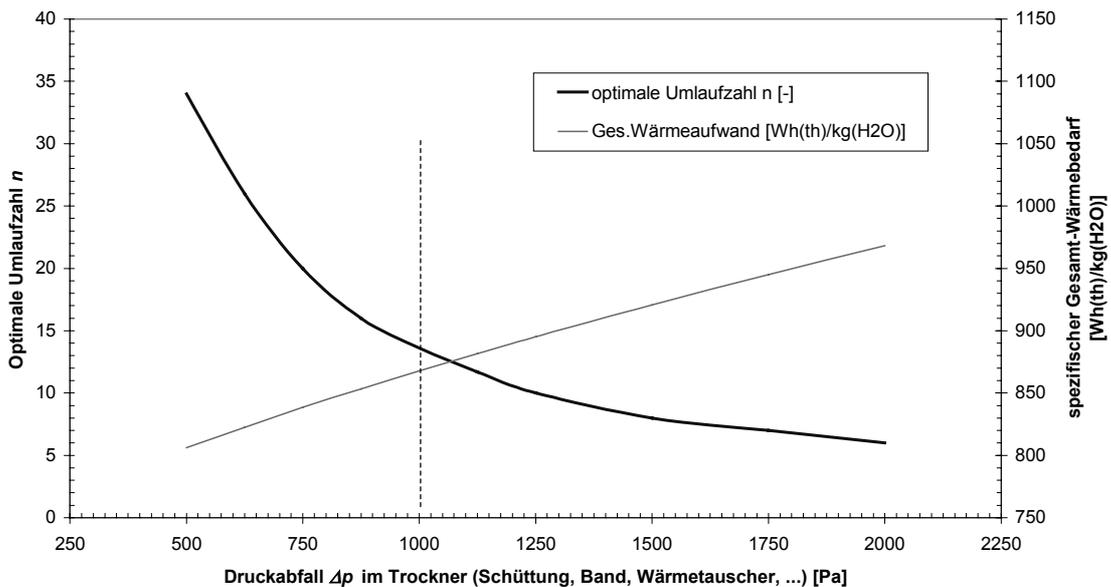


Bild 55 Optimale Umlaufzahl über dem Druckabfall Δp im Trockner

In Bild 55 wurde, ausgehend vom Auslegungsfall von 1000 Pa, ein Bereich von 500 Pa bis 2000 Pa betrachtet. Dabei geht mit steigendem Druckabfall Δp die Umlaufzahl zurück. Da eine Änderung des Druckabfalls im Trockner proportional zur benötigten mechanischen Leistung ist, kann diese Betrachtung auch für einen vom Auslegungsfall von 55 % geänderten Wirkungsgrad des Ventilators verwendet werden.

Kostenfaktor Wärme/Strom

Der Kostenfaktor Wärme/Strom beschreibt, wie teuer Wärme im Verhältnis zu Strom ist. Wird die elektrische Energie gegenüber der Wärme teurer, liegt das Optimum bei weniger Umläufen, während bei einer günstigeren elektrischen Energie das Optimum bei einer höheren Anzahl von Umläufen liegt. Halbiert oder verdoppelt sich der Kostenfaktor Wärme/Strom vom Auslegungspunkt von 0,2, steigt die Umlaufzahl auf 34 an bzw. geht auf 5 Umläufe zurück (Bild 56).

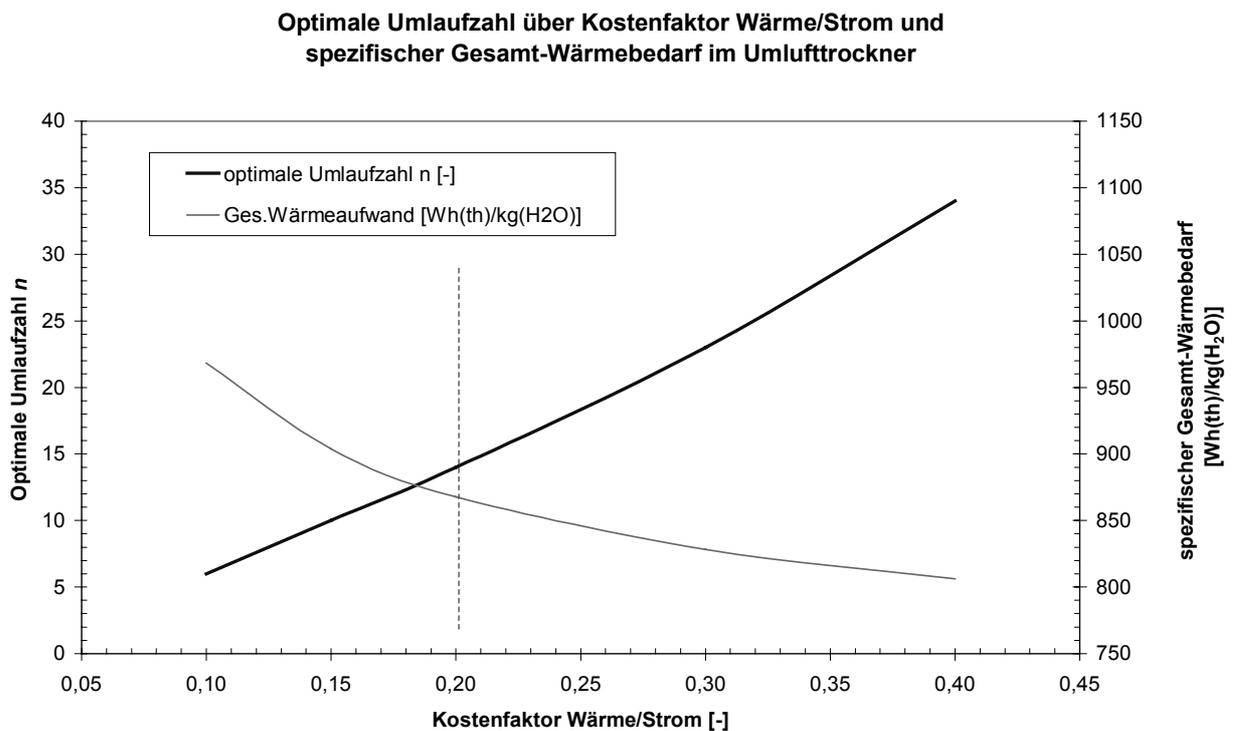


Bild 56 Optimale Umlaufzahl über dem Kostenfaktor Wärme/Strom

6.3 Messungen an einem Bandtrockner

Zur Simulation des Trocknungsvorgangs von Grüngut auf einem Bandtrockner und zur Überprüfung von Auslegungsdaten bieten sich Messungen an einem Versuchsbandtrockner an. Ein solcher Versuchsbandtrockner der Firma Laxhuber aus Massing stand bei der Futtertrocknungsgenossenschaft Altenstadt zur Verfügung. Bild 57 zeigt den Aufbau des Trockners.

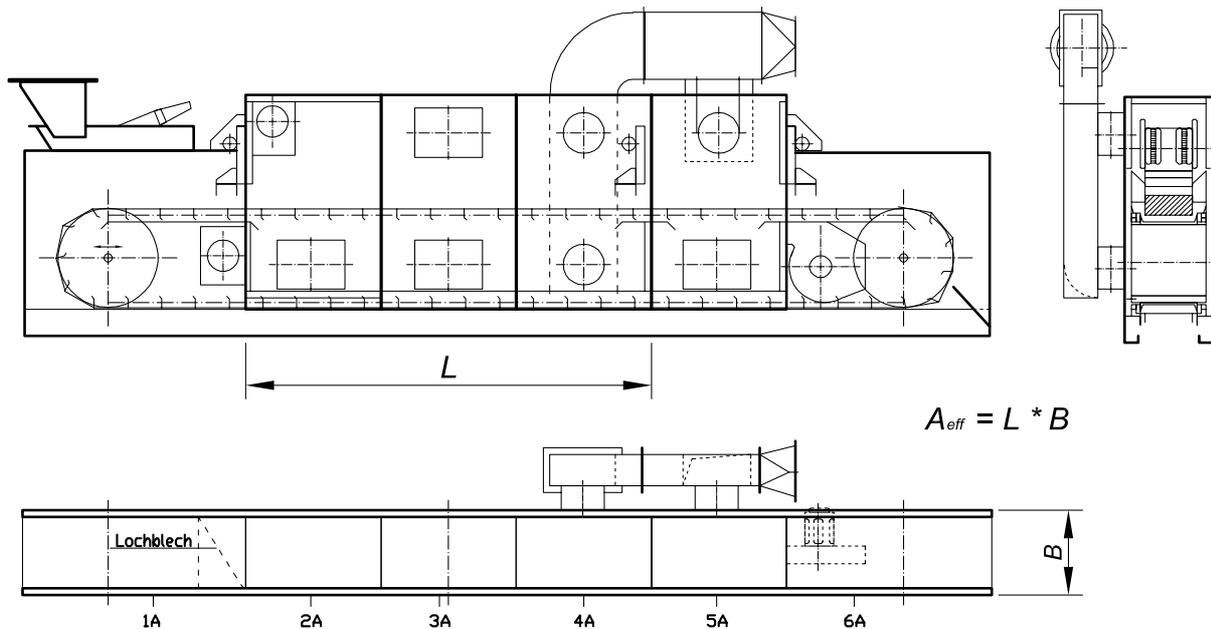


Bild 57 Versuchsbandtrockner, $A_{eff} = 0,72 \text{ m}^2$, $T_{max} = 150 \text{ °C}$, $\dot{V}_{max} = 1.500 \text{ m}^3/\text{h}$ (Normz.)

6.3.1 Beschreibung des Versuchsbandtrockners

Der Trockner besitzt ein umlaufendes Plattenband aus Edelstahl, das Trocknergehäuse ist aus Aluminium gefertigt. Das Plattenband hat eine Rundlochperforation mit ca. $\varnothing 1,2 \text{ mm}$, wobei das Lochblech zu ca. 20 % ausgestanzt ist. Die einzelnen Platten haben in Laufrichtung eine Teilung von 200 mm und überlappen zur vollständigen Abdeckung leicht. Die Bandgeschwindigkeit kann über drei wechselbare Zahnräder zwischen langsam, mittel und schnell vorgewählt werden. Über einen Frequenzumrichter ist eine stufenlose Feineinstellung möglich, so dass die Bandgeschwindigkeit in einem Bereich von 0,03 - 0,71 m/min variiert werden kann.

Der Trockner ist vom Aufbau her in sechs Sektionen 1A - 6A mit je 800 mm Breite unterteilt. In der ersten Sektion 1A erfolgt die Produktaufgabe, in der letzten Sektion 6A der Produktaustrag. Die vorletzte Sektion 5A kann optional mit Kaltluft zur Produktkühlung beaufschlagt werden. Für die Warmlufttrocknung

stehen die drei Sektionen 2A, 3A und 4A zur Verfügung. In diesen Abschnitten kann die Luftführung von unten nach oben („up“) oder auch in umgekehrter Richtung von oben nach unten („down“) durch das Band geführt werden.

Die effektive Bandbreite beträgt 300 mm. Je nach Geometrie und Größe des Produktes entstehen durch ungenügende Belegung Kanäle für seitliche Leckluft. Bei dem Versuchsbandtrockner wirkt sich der lange Umfang (Ränder) verglichen mit der kleinen Trocknungsfläche negativ aus. Durch eine sorgsame manuelle Produktaufgabe wurde versucht, die Randeffekte zu minimieren. Die Höhe der Produktschicht auf dem Trocknerband kann in einem Bereich von 20 mm bis 170 mm gewählt werden.

Zusätzlicher Falschlufteintritt in die heißen Trocknungszonen entsteht durch die Schleusen am Ein- und Austritt des Grüngutes über dem produktbelegten Band. Eine vollständige Abdichtung gegen Falschlufteintritt oder Warmluftaustritt ist hier nur mit hohem Aufwand möglich. Während der Versuche wurde versucht, über eine angepasste Druckaufteilung mit einem drückenden Frischluft- und einem saugenden Abgasventilator den Falschluffanteil zu minimieren. Dies wurde durch eine gleichzeitige Messung der Zu- und Abströmmengen und dem Abgleich beider Gasströme durchgeführt.

Über die drei Trocknungszonen 2A - 4A von 2,4 m Gesamtlänge L und 0,3 m Breite B stehen $0,72 \text{ m}^2$ effektive Bandfläche für die Trocknung zur Verfügung.

Beheizung des Versuchstrockners

Der Versuchstrockner wird mit einem mit Propangas befeuerten Heißgaserzeuger beheizt. Der Heißgaserzeuger stellt bis zu $1.500 \text{ m}^3/\text{h}$ Trocknungsgas, bezogen auf den Normzustand, bereit. Damit werden auf der heißen Seite des Trockners Luftgeschwindigkeiten von bis zu 1 m/s erreicht. Die maximale Brennerleistung beträgt $75 \text{ kW}_{\text{th}}$. Die Bestimmung der zugeführten Heizenergie wurde über das Gewicht der Propangasflaschen erfasst. Aus der Gewichtsabnahme kann die zugeführte Heizleistung sehr genau bestimmt werden.

Belegung des Trocknungsbandes

Die Belegung des Trocknungsbandes musste wegen des Fehlens einer automatischen Aufgabe von Hand durchgeführt werden. Das gehäckselte Grüngut wurde so geschichtet, dass einerseits eine kompakte Belegung vorhanden war, andererseits keine übermäßige Verdichtung stattfand, um eine gute Durchströmung mit Trocknungsluft zu gewährleisten. Die Trocknungszeit im Bandtrockner bei Niedertemperatur beträgt je nach Art des Grüngutes zwischen 12 und 30 min. Da ein Bandtrockner auf eine Störung nur sehr träge reagiert, ist zur Einstellung und Regelung der Endfeuchte eine vorausschauende Fahrweise erforderlich.

wurde. Zudem ist eine indirekte Berechnung der Trocknungsgasmenge aus dem praktisch verlustfrei arbeitenden Heißgaserzeuger über den Brennstoffstrom und die Temperaturen des Zuluft- und Trocknungsgases möglich. In Bild 86 im Anhang ist der Zusammenhang grafisch aufgetragen. Der Vergleich mit der direkten Volumenstrommessung aus Bild 85 zeigt eine gute Übereinstimmung.

6.3.3 Versuchsdurchführung

Mit dem Versuchsbandtrockner ist es möglich, quasi stationäre Zustände aus einem Trocknungsablauf zu erhalten. Dabei wurden folgende Parameter variiert:

- Verweilzeit des Produktes
- Schütthöhe
- Art und Aufbereitung des Trocknungsproduktes
- Luftverteilung „up“ / „down“
- Eintrittstemperatur des Trocknungsgases / zugeführter Wärmestrom

Tabelle 23 beinhaltet eine Zusammenstellung sämtlicher am Bandtrockner durchgeführten Versuche und der dabei eingestellten Parameter.

Tabelle 23 Zusammenstellung der durchgeführten Versuchsläufe am Versuchsbandtrockner

| Nr. | Anzahl Durchläufe | Trocknungsprodukt | Anfang-Wassergehalt | End-Wassergehalt | Durchlaufzeit (Bandgeschwindigkeit) | Schütthöhe | Schüttgewicht (feucht) | Schüttgewicht (trocken) | Trocknungstemperatur (zu) | Strömungsgeschwindigkeit | Betriebsweise | Strömungsrichtung |
|-------|-------------------|-------------------|---------------------|------------------|-------------------------------------|------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------|
| | [-] | | [%-WG] | [%-WG] | [min/2,4m] | [cm] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [°C] | [m/s] | [Umluft/Durchluft] | [up/down] |
| 1.) | 2 | Grüngut (Häcksel) | 82,0 | 2,0 | 12,8 / 12,8 | 12 | 173 | 16 | 145 | 0,58 | DL | up |
| 2.) | 2 | Grüngut (Häcksel) | 74,7 | 2,6 | 12,8 / 12,8 | 12 | 111 | 31 | 145 | 0,58 | DL | up |
| 3.) | 4 | Grüngut (Häcksel) | 86,1 | 21,9 | 7,4/7,4/7,4/7,4 | 12 | 166 | 26 | 145 | 0,46 | DL | up |
| 4.) | 2 | Grüngut (Häcksel) | 85,5 | 19,4 | 9,8 / 8,3 | 8 | 165 | 27 | 145 | 0,64 | DL | up |
| 5.) | 2 | Grüngut (Häcksel) | 83,7 | 22,1 | 7,4 / 11,0 | 10 | 201 | 37 | 145 | 0,62 | DL | up |
| 6.) | 2 | Grüngut (Häcksel) | 83,7 | 15,1 | 7,4 / 11,4 | 8 | 257 | 47 | 145 | 0,62 | DL | up |
| 7.) | 3 | Grüngut (Häcksel) | 83,8 | 52,8 | 7,4 / 7,4 / 7,4 | 10 | 280 | 51 | 145 | 0,64 | DL | up |
| 8.) | 2 | Grüngut (Häcksel) | 81,5 | 13,6 | 7,4 / 5,5 | 12 | 189 | 39 | 145 | 0,64 | DL | up |
| 9.) | 1 | Grüngut (Häcksel) | 73,0 | 7,2 | Satztrocknung | 16 | 229 | 69 | 145 | 0,64 | DL | up |
| 10.) | 3 | Grüngut/Ampfer | 83,2 | --- | 6,1 / 11,2 / 5,4 | 12 | 170 | 32 | 145 | 0,63 | DL | up |
| 11.) | 3 | Mais (gehäcksel) | 78,6 | 22,9 | 7,6 / 11,4 / 7,0 | 10 | 220 | 53 | 145 | 0,63 | DL | up |
| 12.) | 2 | Grüngut (Häcksel) | 83,8 | 45,7 | 7,4 / 11,3 | 12 | 190 | 34 | 145 | 0,62 | DL | up |
| 13.) | 3 | Grüngut (Häcksel) | 83,8 | 39,3 | 10 / 10 / 12 | 10 | 300 | 54 | 145 | 0,45 | UL | up |
| 14.) | 1 | Grüngut (Häcksel) | 79,9 | | 7,4 | 8 | 167 | 38 | 145 | 0,63 | DL | down |
| 15.) | 2 | Grüngut (Häcksel) | 77,2 | 8,1 | 6,1 / 9,6 | 8 | 231 | 59 | 145 | 0,59 | DL | down |
| 16.a) | 2 | Grüngut (Häcksel) | 78,9 | 20,6 | 6,8 / 9,6 | 8 | 198 | 47 | 145 | 0,59 | UL | down |
| 16.b) | 2 | Grüngut (Langgut) | 81,4 | 20,2 | 6,7 / 9,3 | 12 | 70 | 15 | 145/116 | 0,59 | UL | down |
| 17.) | 2 | Grüngut (Häcksel) | 77,2 | 8,1 | 5,8 / 10,0 | 8 | 143 | 37 | 145 | 0,58 | DL | down |
| 18.) | 2 | Grüngut (Häcksel) | 77,4 | 8,8 | 5,8 / 5,4 | 10 | 161 | 41 | 145 | 0,58 | DL | down |
| 19.) | 1 | Grüngut (Häcksel) | 77,3 | 57,9 | 5,4 | 11 | 165 | 42 | 170 | 0,58 | DL | down |

Ziel der Versuche war die Simulation eines Bandtrockners mit zwei oder drei Bändern und eine Trocknung des Grüngutes bis auf eine Endfeuchte von 14 %-FG. Dazu wurde das Grüngut zwei- oder dreimal nacheinander in den Versuchsbandtrockner gegeben. Entsprechend der Vegetation und der Witterung

wurde Grünfutter im jungen physiologischen Stadium und im frischen bis regennassen Feuchtezustand eingesetzt.

In Bild 59 ist der Temperaturverlauf während des Trocknungsvorgangs beispielhaft für zwei Produktdurchläufe von Versuch 1 dargestellt. Die Vor- und Nachläufe sind jeweils erforderlich, um über dem eigentlichen Messzeitraum konstante Bedingungen im Versuchstrockner zu erhalten.

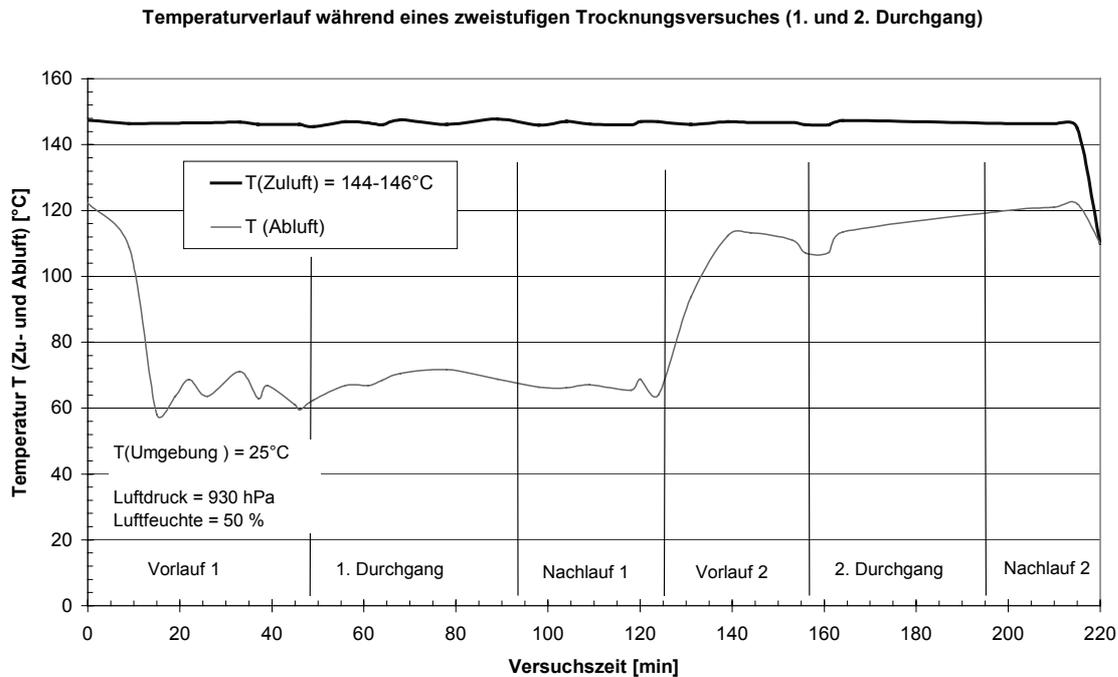


Bild 59 Trocknungstemperatur der Zu- und Abluft bei einem 2-stufigen Trocknungsvorgang mit Vorlauf, Produktdurchgang und Nachlauf (Beispiel Bandtrocknung 1. Versuch)

Für verschiedene Ausgangsfeuchten, Schütthöhen, Arten von Grüngut und Aufbereitungstechniken soll die Ausnutzung der Trocknungsgaswärme und damit eine thermodynamisch optimale Luftführung für die Trocknungsanlage ermittelt werden. Aus den sonstigen Versuchsbeobachtungen konnten wertvolle Hinweise zu den Anforderungen an eine Trocknung von Grüngut bei Niedertemperatur gewonnen werden.

6.3.4 Ergebnisse

Trocknungszeit und Erreichen der Endfeuchte

Bei den meisten Versuchsläufen konnte innerhalb von zwei Durchgängen eine Trocknung des Produktes bis auf Endfeuchte erreicht werden. Die Verweilzeit je Durchgang im Trockner betrug dabei zwischen 5 und 13 min.

1. Durchgang: Im ersten Durchgang wurde die Schütthöhe und die Bandgeschwindigkeit so eingestellt, dass über die gesamte Bandfläche eine maximale Abkühlung der Trocknungsluft bis nah an die Taupunkttemperatur realisiert werden konnte. Eine optimale Ausnutzung der Trocknungsgaswärme ist damit in diesem Trocknungsabschnitt sichergestellt.

2. Durchgang: Beim zweiten Durchgang wurde versucht, die Schütthöhe und die Bandlaufzeit so einzustellen, dass am Trocknerausgang die gewünschte Endfeuchte des Grüngutes von 14 %-FG erreicht wird. Zum Teil waren die Chargen mit Durchlaufzeiten von nur 10 min zu klein, um eine genaue Einstellung der Bandgeschwindigkeit zum Erreichen der Endfeuchte vorzunehmen. Die spätere Ermittlung der tatsächlichen Endfeuchte im Trockenschrank zeigte dann Abweichungen gegenüber der Zielfeuchte auf.

Schwankungen bei der Durchtrocknung

Schwankungen in der Trocknungszeit ergeben sich durch unterschiedliche Anfangsfeuchte, Schütthöhen und Schüttdichten des Produktes sowie der selbst während eines Versuches nie völlig homogenen Zusammensetzung des Grüngutes. Da für die Bestimmung der Produktfeuchte kein kalibriertes Feuchtemessgerät (z.B. N-IR) zur Verfügung stand, konnte die Endfeuchte nur durch Fühlen per Hand abgeschätzt werden. Während bei feinblättrigem Material stets eine gute Durchtrocknung feststellbar war, kam es bei stängeligen Produkt nach einer gewissen Liegezeit zu einem Feuchtigkeitsausgleich zwischen dem Kernmaterial und der Oberfläche, so dass eine Nachtrocknung des Materials erforderlich war.

Feuchteverlauf

In Bild 60 ist für eine Auswahl von Trocknungsversuchen der Feuchteverlauf über der Trocknungszeit aufgetragen. Je nach Anfangsfeuchte des Grüngutes ergeben sich unterschiedlich lange Trocknungszeiten. Zum besseren Vergleich sind in Bild 60 alle Trocknungsverläufe mit einem gemeinsamen Aufpunkt von 340 %-FG (=77 %-WG) dargestellt.

Bandtrocknungsversuche von Grüngutchargen

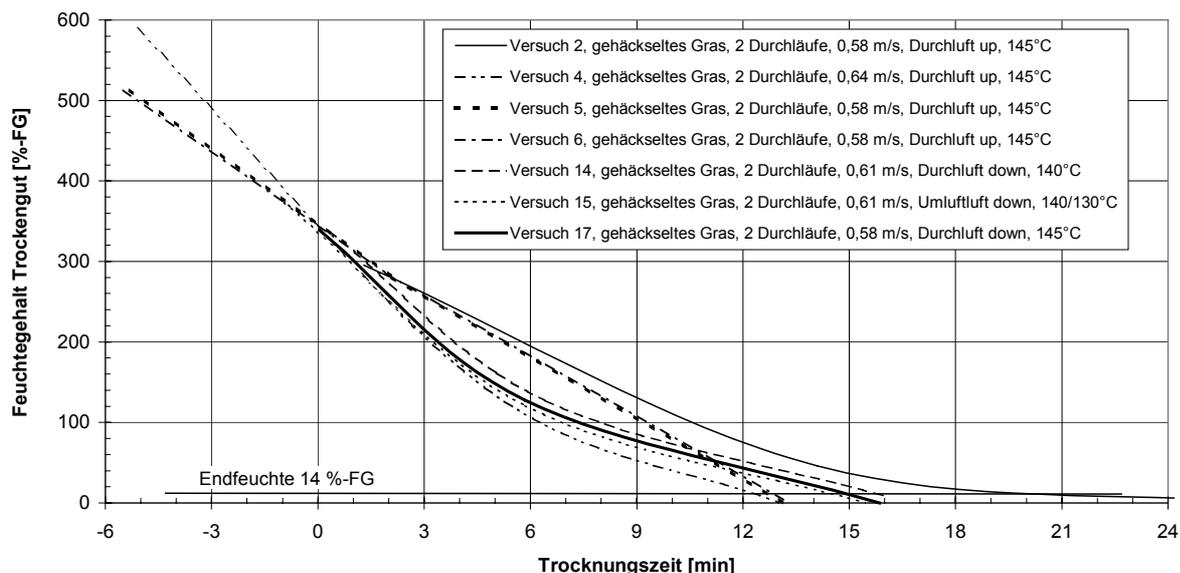


Bild 60 Trocknungsverlauf von Grüngutchargen (gehäckselt) im Versuchsbandtrockner bei 145 °C Trocknungstemperatur (in Aufpunkt von 340 %-FG verschoben)

Die Feuchteverläufe liegen, trotz unterschiedlicher Arten von Grüngut, bei den einzelnen Versuchen eng zusammen. Die Zielfeuchte von 14 %-FG wird bei allen Versuchen nach einer Trocknungszeit von 12 bis 22 min erreicht.

Wechsel der Strömungsrichtung

Wünschenswert ist eine möglichst gleichmäßige Durchtrocknung der gesamten auf dem Trocknungsband liegenden Produktschicht. Ein Überhitzen ist dabei genau so zu vermeiden wie eine unzureichende Durchtrocknung einzelner Produktteile. Eine gute Durchmischung des Produktes trägt zur gleichmäßigen Durchtrocknung bei, kann aber nur bei einer Umschichtung des Trocknungsmaterials von einem Band zum Band der nächsten Ebene erfolgen. Eine einseitige Trocknungsluftzugabe führt zwangsweise zu einer schnelleren Abtrocknung der angeströmten Seite, während die Seite, auf der die Trocknungsluft abströmt, nur langsamer zu trocknen vermag. Bei nicht zu hohen Produktschichten führt ein mehrfacher Wechsel der Durchströmungsrichtung zu einer gleichmäßigen Durchtrocknung der gesamten Schüttung.

Wahl der Strömungsrichtung „up“ / „down“

Es wurden Versuche mit einer Durchströmung des Trocknungsproduktes von oben nach unten, im Folgenden mit „down“ bezeichnet und in umgekehrter Richtung von unten nach oben, im Folgenden mit „up“ bezeichnet, durchgeführt. Aus thermodynamischer Sicht gibt es keinen Vorzug für eine Strömungsrichtung,

wohl aber Vorteile bei der Verfahrenstechnik und den strömungstechnischen Bedingungen.

Die Versuche haben ergeben, dass es vorteilhaft ist, am Anfang der Trocknung mit der Durchströmung von oben nach unten zu beginnen. Bei umgekehrter Durchströmung „up“ würde sich das Produktband auf Trocknungsgastemperatur aufheizen. In den Versuchen wurden dabei häufiger Anbackungen des Produktes am Band festgestellt. Ursachen hierfür sind die vielfach am Trocknungsprodukt haftenden Tautropfen oder an Schnittkanten austretendes Zellwasser. Trifft diese Feuchtigkeit des Produktes auf das heiße Trocknerband, klebt das Produkt fest. Bei oberflächentrockenem Produkt treten diese Anbackungen viel weniger oft und stark auf.

Ein weiterer Vorteil bei der Durchströmung „down“ liegt in der Einbindung kleiner Produktteile wie z.B. Samenkörnern. Anhand des Staubanfalls bei beiden Strömungsführungsvarianten wurde festgestellt, dass diese in die Produktschicht hineinfallen, wodurch der Austrag über die Trocknungsluft tendenziell verringert wird. In den Versuchen konnte auch eine Auswirkung der Strömungsrichtung mit und gegen die Schwerkraft auf die Verdichtung des Haufwerks festgestellt werden. Eine Druckdifferenz über der Schütthöhe im Trockner wurde im Bereich zwischen 30-130 Pa in Abhängigkeit von der Schüttdichte, der Schütthöhe und der Strömungsgeschwindigkeit festgestellt. Ein Gasstrom „down“ wirkt auf die Schüttung tendenziell verdichtend, während ein Gasstrom „up“ einer Verdichtung entgegen wirkt. Zudem sind beim hier untersuchten Trocknungsprodukt Grüngut der Geschwindigkeit des Gasstromes „up“ aufgrund der Fluggrenze einzelner Produktteile wegen des Fehlens eines Oberbandes enge Grenzen gesetzt, da ein Austrag des Produktes durch Abheben vom Trocknungsband nicht erfolgen darf.

Grüngut weist, wie auch andere Trocknungsprodukte, im feuchten Zustand eine mäßige und im trockenen Zustand eine hohe Stabilität auf. In dem dazwischenliegenden Zustand ist, durch die fehlende Masse des ausgetriebenen Wassers, eine gewisse Labilität feststellbar. Daher treten vor allem in diesem Feuchtebereich Setzungserscheinungen in der Grüngutschicht auf, denen durch einen Gasstrom „up“ entgegengewirkt werden kann. Höhere Strömungsgeschwindigkeiten können hingegen zu Beginn und am Ende des Trocknungsvorgangs mit einem Gasstrom „down“ realisiert werden.

Aufbereitung und Fördertechnik

Grüngut, das aus überwiegend Blattware besteht, kann als Langware ohne Aufbereitung gleichmäßig durchgetrocknet werden. Bei stängeligem Gut, wie Klee oder Löwenzahn, kann eine schnellere Abtrocknung durch einen Aufschluss oder Aufbruch des Materials erreicht werden. Eine gleichmäßige und dabei luftdurchlässige Schichtung des Grüngutes auf dem Band ist für eine einheitliche Durchtrocknung wichtig. Kurz geschnittenes Grüngut unter 120 mm erwies sich

als deutlich günstiger in der Riesel- bzw. Bandbelegfähigkeit als Langware. Aufbereitung von Grüngut führt zu vermehrtem Austreten von Pflanzensaft, der zur Verklebung vom Produkt mit dem Trocknungsband führt. Eine Ausführung des Trocknungsbandes aus Edelstahl, eine langsamlaufende Bürste zur schonenden Entfernung von angehaftetem Material sowie eine Bandwaschanlage zur Reinigung sollten vorgesehen werden.

Die Intensivaufbereitung führt, vermutlich infolge der Sauerstoffeinwirkung und enzymatischer Vorgänge, zu einer Dunkelfärbung des Grüngutes. Bei kurzgeschnittenem Grüngut und Langware bleibt hingegen die Farbe weitgehend erhalten. Eine Braunfärbung tritt erst nach längerer Übertrocknung und bei Temperaturen über 170 °C auf.

Verschmutzung, Staubemissionen

Die Ablagerung von Staub und feinen Partikeln während der Trocknung sind unvermeidlich. Kleine trockene Futterpartikel beginnen bei Luftgeschwindigkeiten von 0,5 m/s zu fliegen. Ablagerungen entstehen an strömungsberuhigten Stellen unabhängig von der Belüftungsrichtung. Entsprechende Reinigungsvorrichtungen, wie ein Bodenreiniger müssen vorgesehen werden. Um Staubemissionen so gering wie möglich zu halten, ist es empfehlenswert, die Abluft aus dem Trockner möglichst aus Bereichen abzusaugen, an denen das Feuchtprodukt aufgegeben wird. Dadurch kann die filternde Wirkung der feuchten Produktschicht genutzt werden. Ist über dies eine weitere Abluftabgabe aus Kammern mit überwiegend trockenem Produkt notwendig, muss diese über eine Staubreinigungsvorrichtung wie einen Zyklon oder ein Filter erfolgen.

6.4 Auslegung eines Bandrockners

6.4.1 Verweildauer des Trocknungsproduktes im Bandrockner

Die notwendige Verweildauer des Grüngutes in der Trocknungsanlage bei vorgegebenen Trocknungsbedingungen ergibt sich aus der Trocknungszeit des Gutes. Diese ist wiederum von der Produktseite bestimmt durch:

- Art des Produktes (Gras, Klee, Luzerne, ...),
- Gesamtfeuchte des Gutes,
- Dicke und Oberfläche des Gutes und
- Struktur des Grüngutes durch Häckselqualität, Produktaufbereitung, sich bildende Agglomerationen, Auffaserung,

Von der Trocknungsgasseite sind die wesentlichen Einflussfaktoren:

- die Eintrittstemperatur und
- die Strömungsgeschwindigkeit des Trocknungsgases.

Bei Bandrocknern wird die Verweildauer über die Gesamtlänge $L_{TK,eff}$ der Trocknungskammern und die Bandgeschwindigkeit w_{Band} eingestellt.

$$t_{TK} = \frac{L_{TK,eff}}{w_{Band}} \quad (82)$$

Während der Trocknungszeit wird die benötigte Wärme an das Produkt übertragen und die gesamte Feuchte entweicht durch Verdampfung bzw. Verdunstung. In den in Kapitel 5.4 beschriebenen Versuchen wurden für Grüngut Verweilzeiten zwischen 15 bis 30 min je nach Produktart ermittelt. Diese Verweilzeiten müssen in einem Bandrockner einstellbar sein.

6.4.2 Trocknerlänge

Die maximale Bandgeschwindigkeit w_{Band}^{max} ist durch die Mechanik des Bandes und den Verschleiß bei hohen Bandgeschwindigkeiten begrenzt. Sie liegt für Plattenbänder bei 2,5 – 3 m/min und für Gewebebänder bei 4,5 – 5 m/min.

Mit der kürzesten Trocknungszeit t_{min} eines Produktes und der maximalen Bandgeschwindigkeit w_{Band}^{max} berechnet sich über Gleichung (82) die Trocknerlänge $L_{TK,eff}$. Längere Verweilzeiten sind durch eine Verringerung der Bandgeschwindigkeit einstellbar.

Tabelle 24 Auslegung der Trocknerlänge für Grüngut

| | Band-Geschwindigkeit | Grüngut-Trocknungszeit | Gesamt-Trocknerlänge |
|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Plattenband – maximal | $w_{max} = 3,0 \text{ m/min}$ | $t_{min} = 15 \text{ min}$ | $L_{Tk,eff} = 45 \text{ m}$ |
| Plattenband – minimal | $w = 1,5 \text{ m/min}$ | $t_{max} = 30 \text{ min}$ | $B_{max} = 3 \text{ m}$ |
| Gewebeband – maximal | $w_{max} = 5,0 \text{ m/min}$ | $t_{min} = 15 \text{ min}$ | $L_{Tk,eff} = 75 \text{ m}$ |
| Gewebeband – minimal | $w = 2,5 \text{ m/min}$ | $t_{max} = 30 \text{ min}$ | $B_{max} = 6 \text{ m}$ |

Damit ergibt sich für ein Plattenband eine maximale Trocknerlänge von 45 m und für eine Gewebeband eine Länge von 75 m. Die Trocknerbreite B hingegen legt die Produktionsmenge fest und ist hauptsächlich durch die Ausführungsbreite beschränkt. Für Trockner mit Plattenband sind Ausführungen bis zu 3 m Breite und bei Gewebeband bis zu 6 m Breite üblich.

6.4.3 Flächenbezogene Wasserverdampfung im Bandtrockner

Zur Bestimmung der Leistung und der Größe von Bandtrocknungsanlagen ist die pro Fläche erreichbare Verdampfungsleistung nach (83) entscheidend. Werte von $30 - 80 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ sind für die Wasserverdampfung bei Grüngut üblich.

$$\pi_{\text{Band}} = \frac{\dot{m}_{\text{Verd}}}{A_{\text{Bd}}} \quad \text{in} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right] \quad (83)$$

Die Wasserverdampfung \dot{m}_{Verd} nach Gleichung (75) ergibt sich aus der dem Trockner zugeführten Heizleistung $\Delta q_{\text{Gas}}(zu)$ aus Gleichung (47). Damit lässt sich Gleichung (83) folgendermaßen schreiben:

$$\pi_{\text{Band}} = \frac{\Delta q_{\text{Gas}}(zu) \cdot \dot{m}_{\text{tr.G}}}{A_{\text{Band}} \cdot q_{\text{Verd}}} = \frac{\tilde{c}_{p,\text{Gas}} \cdot (T_{\text{Gas,ein}} - T_{\text{Gas,zu}}) \cdot \rho \cdot v_{\text{Gas}}}{q_{\text{Verd}}} \quad (84)$$

Frei wählbare Variablen der Gleichung (84) sind die Eintrittstemperatur $T_{\text{Gas,ein}}$ und der Gasstrom $\dot{m}_{\text{tr.G}}$ bzw. die Strömungsgeschwindigkeit v_{Gas} . Die Wärmekapazität $\tilde{c}_{p,\text{Gas}}$ und die Dichte ρ aus Gleichung (84) sind Stoffparameter und auch die spezifische Verdampfungswärme q_{Verd} liegt weitgehend über das Trocknungssystem fest.

In Bild 61 ist die flächenbezogene Verdampfungsleistung für einen Bandtrockner über der Eintrittstemperatur für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten nach dem Produktdurchgang aufgetragen.

Flächenbezogene Verdampfungsleistung eines Bandrockners

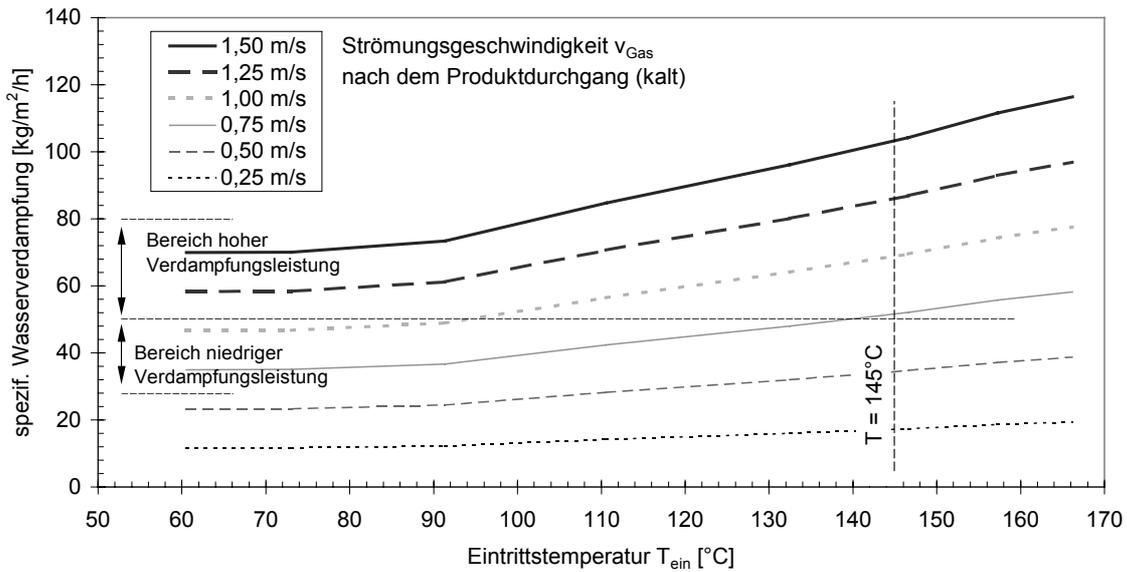


Bild 61 Flächenbezogene Verdampfungsleistung als Funktion der Eintrittstemperatur T_{ein} und der Strömungsgeschwindigkeit v_{Gas} (kalt)

Messwerte für die Wasserverdampfung

Bei den Untersuchungen an dem Versuchsbandrockner aus Kapitel 6.3 wurde die Wasserverdampfungsleistung bestimmt.

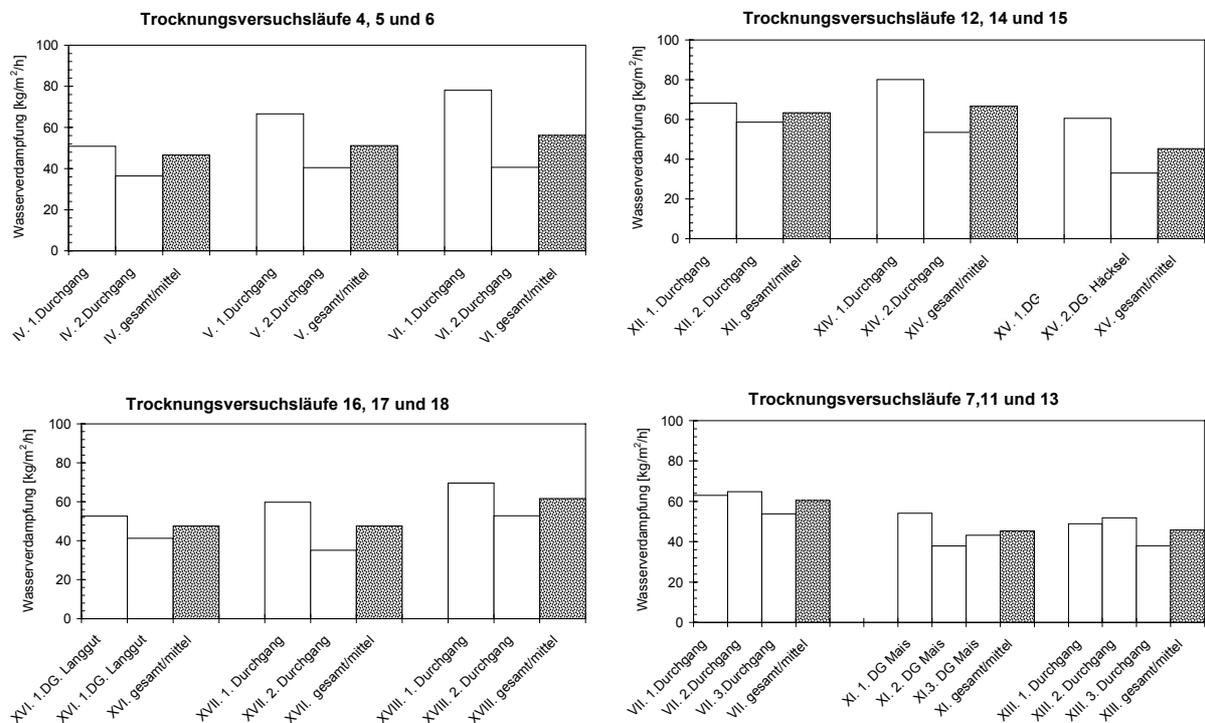


Bild 62 Wasserverdampfungsleistung bei zwei- und dreimaligem Produktdurchlauf

Je nach Grüngut waren zwei- bzw. dreimalige Durchläufe bei einer Eintrittstemperatur von 145 °C erforderlich. Beim ersten Banddurchlauf mit Feuchtmaterial ergab sich durch die höhere Sättigung der Abluft eine Wasserverdampfung von 50–80 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$. Im zweiten bzw. dritten Durchlauf bei der Trocknung auf Endfeuchte wurden noch 30–50 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ erreicht. Die Wasserverdampfungsrate aus den Versuchen in Bild 62 wurde über Produktwägung ermittelt. Die berechneten Werte aus Bild 61 werden bestätigt.

6.4.4 Schütthöhe und Bandgeschwindigkeit

Bei den Versuchen konnte das Gut mit Schüttdichten bezogen auf Trockenmaterial in einem Bereich von 30–60 $\text{kg}_{\text{TG}}/\text{m}^3$ auf das Band aufgelegt werden. Die Schüttdichte des frischen Grüngutes schwankte entsprechend in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit in einem Bereich von 150 bis 250 $\text{kg}_{\text{FG}}/\text{m}^3$. Für eine durchschnittliche Schüttdichte von 45 $\text{kg}_{\text{TG}}/\text{m}^3$ im trockenen Zustand ist in Bild 63 die Entwicklung des Wassergehaltes U und der Feuchte X über der Schüttdichte $\rho_{\text{FG}}^{\text{Schütt}}$ nach Gleichung (85) aufgetragen.

$$\rho_{\text{FG}}^{\text{Schütt}} = \rho_{\text{TG}}^{\text{Schütt}} \cdot \frac{1 + X_{\text{FG}}}{1 + X_{\text{TG}}} \quad (85)$$

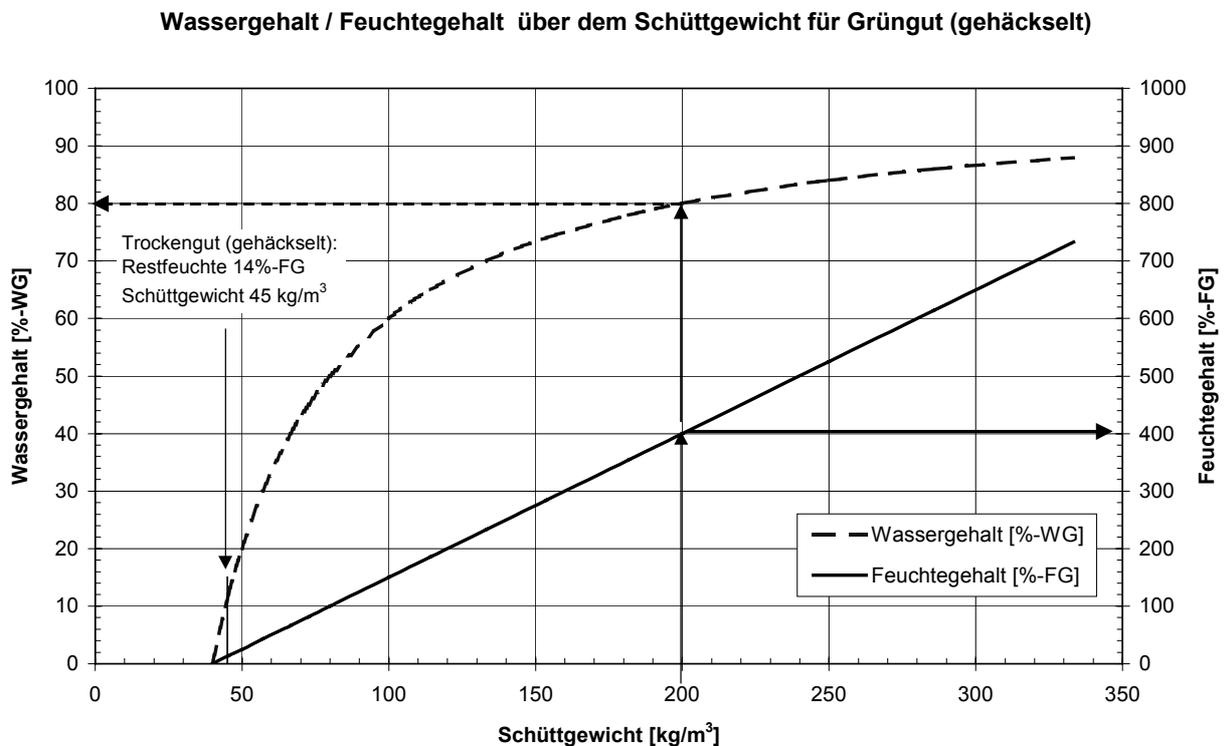


Bild 63 Darstellung des Wassergehaltes U und des Feuchtegehaltes X über dem Schüttgewicht $\rho_{\text{Gut}}^{\text{Schütt}}$ von gehäckseltem Grüngut

Für dieselbe Schüttung ist in Bild 64 die Belegung einer Bandfläche mit zu verdampfender Feuchtigkeit $m_{H_2O_{Band}}$ für verschiedene Schütthöhen H dargestellt.

$$m_{H_2O_{Band}} = H \cdot (\rho_{FG}^{Schütt} - \rho_{TG}^{Schütt}) \quad (86)$$

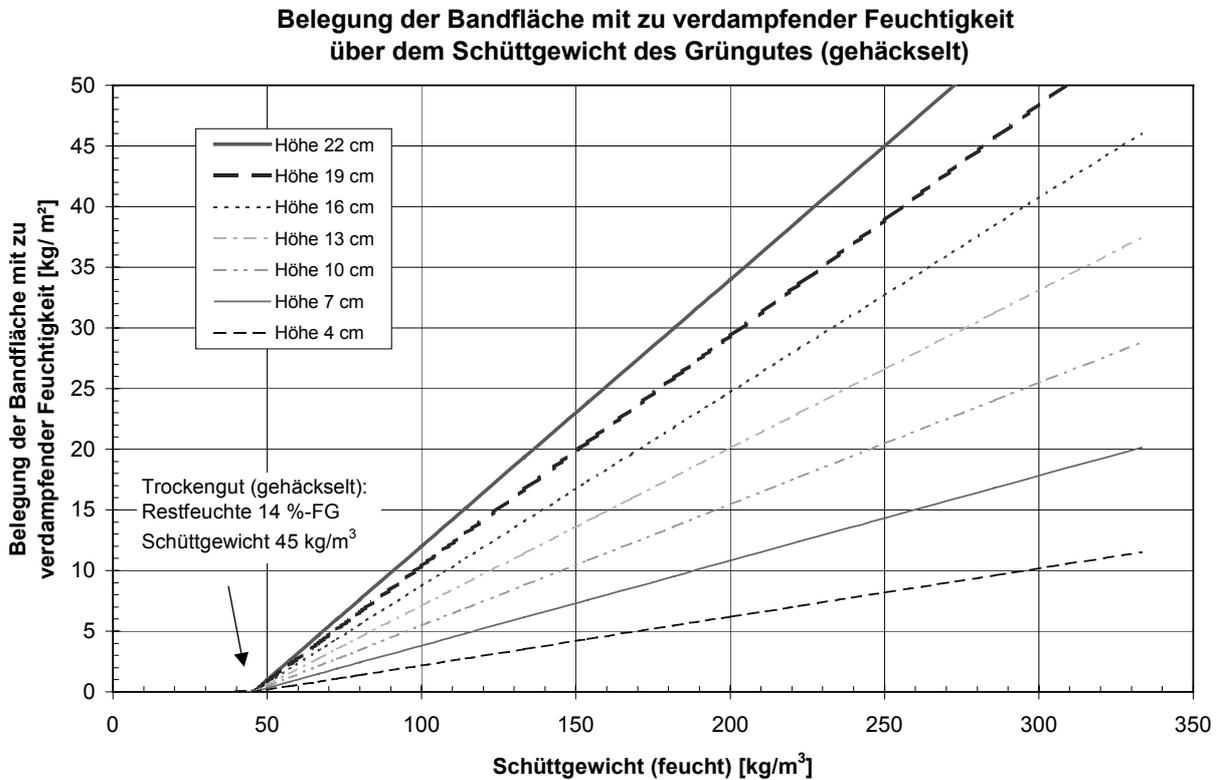


Bild 64 Bandbelegung mit zu verdampfender Feuchtigkeit über dem Schüttgewicht $\rho_{Gut}^{Schütt}$ bei einem Trockenschüttgewicht von 45 kg/m^3 und einer Restfeuchte von 14 %-FG

Die Wasserverdampfung π_{Band} einer Trocknungsanlage wird über die Eintrittstemperatur und die Strömungsgeschwindigkeit entsprechend Bild 61 eingestellt. Aus den Vorgaben der Wasserverdampfung π_{Band} , der Bandgeschwindigkeit w_{Band} sowie der Trocknerlänge $L_{TK,eff}$ lässt sich die Produktschütthöhe H berechnen (Bild 65).

$$H = \frac{\pi_{Band} \cdot L_{TK,eff}}{(\rho_{FG}^{Schütt} - \rho_{TG}^{Schütt}) \cdot w_{Band}} = \frac{\pi_{Band}}{(\rho_{FG}^{Schütt} - \rho_{TG}^{Schütt})} \cdot t_{TK} \quad (87)$$

Bei einer Verdampfungsleistung von ca. $50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$, die bei den Trocknungsversuchen bereitgestellt wurde, führen Schütthöhen von 8 bis 15 cm zu einer guten Durchtrocknung des Grüngutes.

Schütthöhe für Grüngut über der Bandgeschwindigkeit

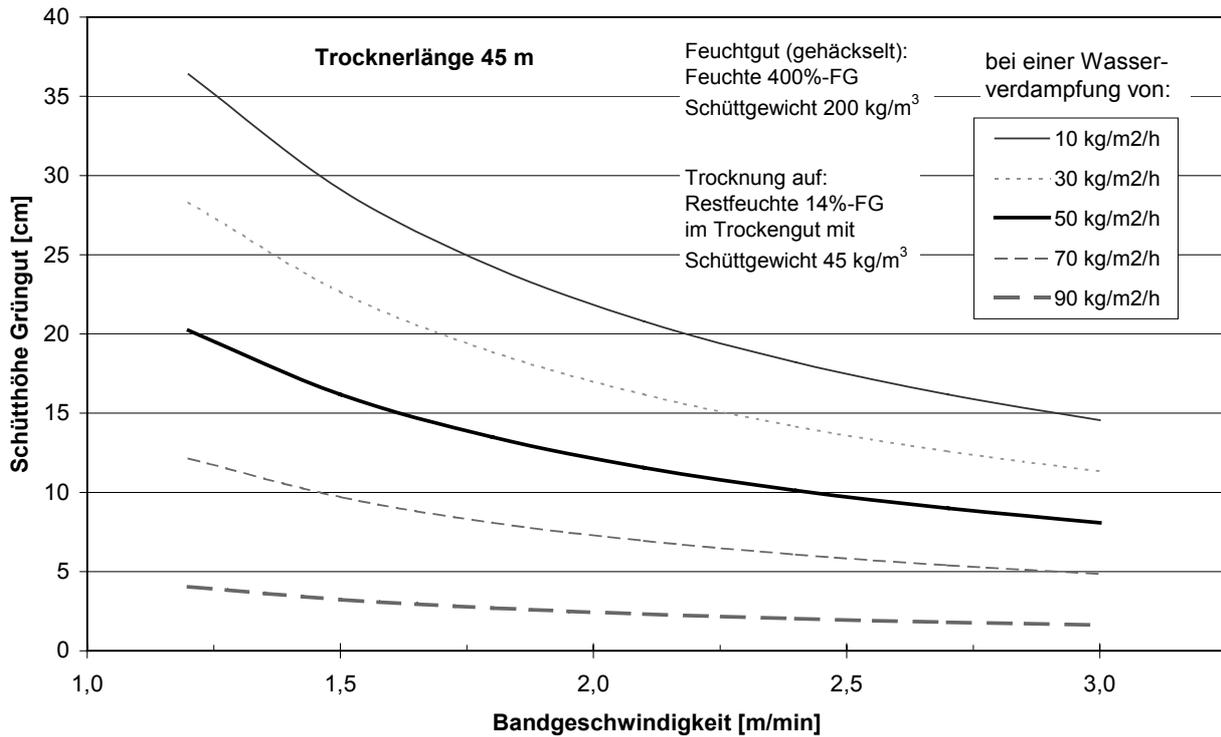


Bild 65 Schütthöhe H von Grüngut (Anfangsfeuchte 400 %-FG) bei verschiedenen Verdampfungsleistungen π_{Band} und Bandgeschwindigkeiten w_{Band}

6.4.5 Sättigung der Abluft / Produktumwurf

Um eine optimale Trocknung zu erreichen, sollte die Trocknungsluft beim Durchgang durch das Trocknungsmaterial möglichst hoch mit Wasserdampf beladen sein, ohne dass dabei Kondensation eintritt.

In Bild 67 ist für einen zweimaligen und in Bild 68 für einen dreimaligen Trocknungsdurchlauf der Verlauf der Austrittstemperatur und der Gutfeuchte über dem Trocknerband aufgetragen.

Anhand der Austrittstemperatur und dem Verlauf der daraus berechneten relativen Trocknungsluftfeuchte erkennt man, dass eine vollständige Abkühlung und damit Sättigung nur zu Beginn der Trocknung und bei feuchtem Produkt erreicht wird. Bei fortschreitender Trocknung muss die Schütthöhe H und damit die zur Verfügung stehende Austauschfläche vergrößert werden, um bei sonst gleichen Bedingungen weiterhin eine weitgehende Sättigung des Trocknungsgases zu erreichen.

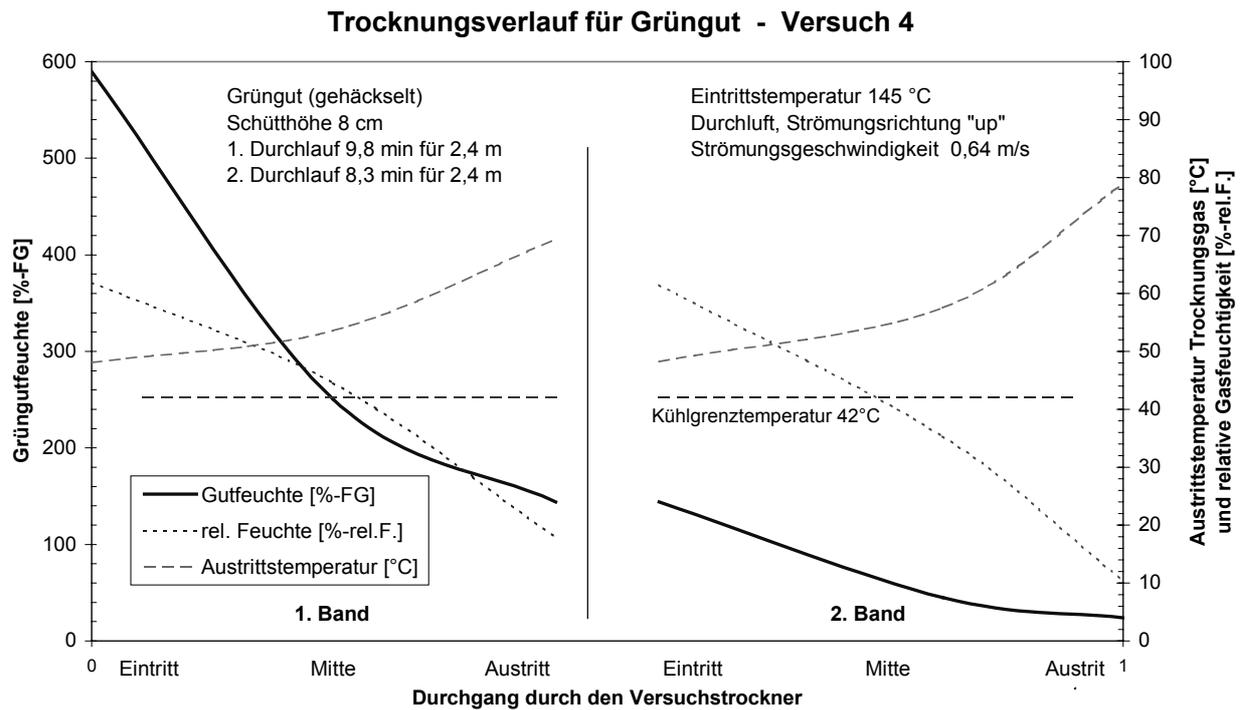


Bild 66 Verlauf der Gutfeuchte und der Austrittstemperatur bei einem zweistufigen Bandtrockner (Versuch 4)

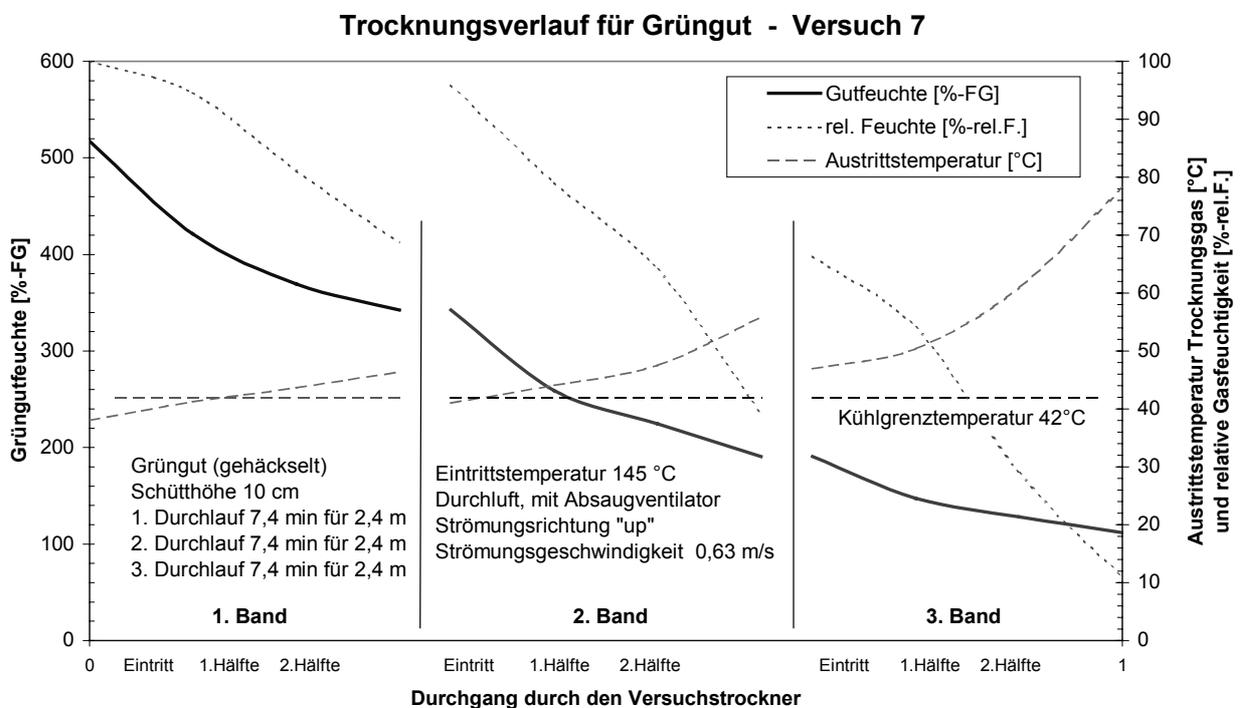


Bild 67 Verlauf der Gutfeuchte und der Austrittstemperatur bei einem dreistufigen Bandtrockner (Versuch 7)

Aus den Sorptionsisothermen von Grüngut lässt sich ablesen, welche maximale Luftfeuchte nach dem Produktdurchgang in der Trocknungsluft vorhanden sein sollte, damit in der gesamten Produktschicht ein Feuchteaustrag stattfindet.

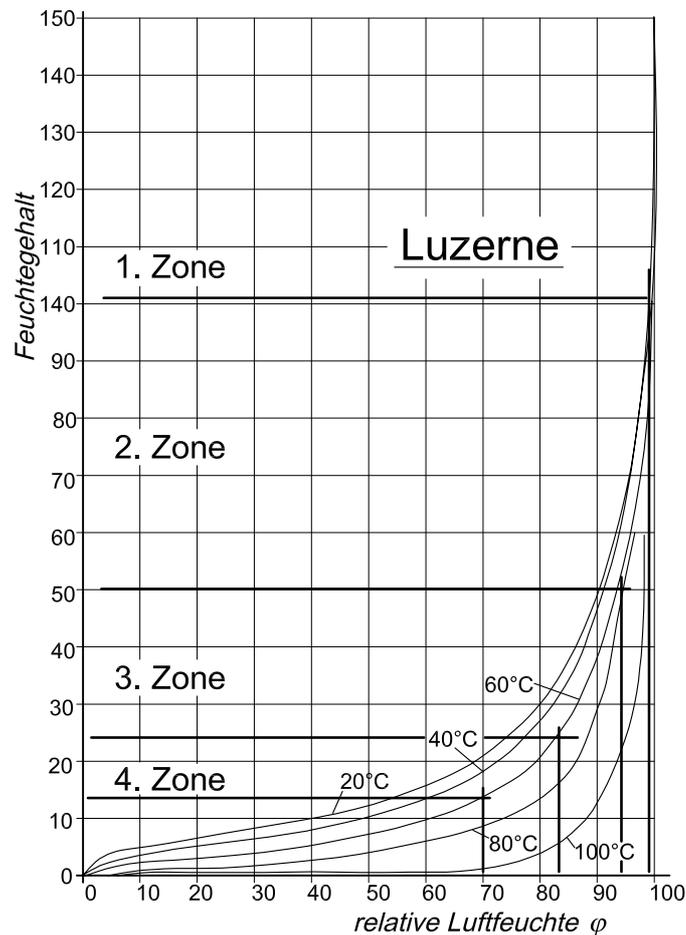


Bild 68 Sorptionsisotherme von Luzerne /41/ mit eingezeichneten Trocknungszonen

Zur Auslegung von Trocknungsanlagen ist eine Unterteilung des Trocknungsvorgangs in Abschnitte entsprechend der Feuchte hilfreich. Eine Unterteilung in vier Trocknungszonen und die Werte der erreichbaren Abgassättigung hierfür sind in Tabelle 25 aufgeführt.

Die erreichbare Abgassättigung muss dabei immer deutlich von der maximalen Abgassättigung entfernt sein, um in der Trocknungsanlage für die Regelung noch genügend Eingriffsmöglichkeit zu haben. Die maximale Abgassättigung hängt auf der Seite des Trocknungsmediums von der Temperatur und der Wasserbeladung ab. Die Partialdruckdifferenz zwischen dem Trocknungsgas und der Oberfläche des Trocknungsgutes legt letztendlich die Höhe der maximalen Abgassättigung für einen Trocknungsvorgang fest. Über die Sorptionsisothermen des Produktes und die Kühlgrenztemperatur, die über weite Bereiche die Produkttemperatur bestimmt, lässt sich dabei der Partialdruck an der Oberfläche ermitteln. Die im

Trocknungsgas erreichbare Sättigung ist über die Trocknungsgasgeschwindigkeit, die Schütthöhe und die Aufbereitung des Trocknungsgutes beeinflussbar.

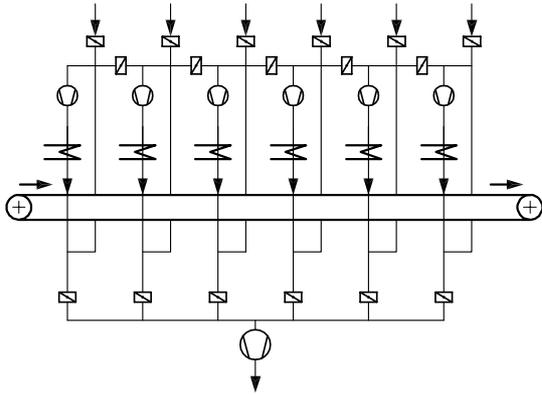
Tabelle 25 Anhaltswerte zur maximalen und erreichbaren Abgassättigung in Abhängigkeit der Produktfeuchte für Grüngut

| Zone | Produktfeuchte | maximale Abgassättigung | Erreichbare Abgassättigung |
|-------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | – 100 %-FG | ≤ 95 %-rel.F | ≤ 70 %-rel.F |
| 2 | 100 – 50 %-FG | ≤ 85 %-rel.F | ≤ 55 %-rel.F |
| 3 | 50 – 25 %-FG | ≤ 75 %-rel.F | ≤ 40 %-rel.F |
| 4 | 25 – 14 %-FG | ≤ 65 %-rel.F | ≤ 30 %-rel.F |

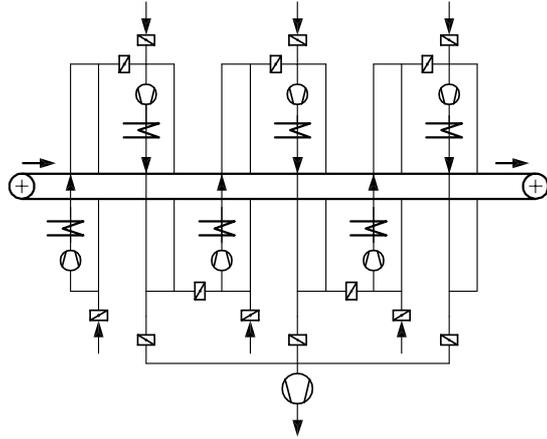
Für die Sorptionsisothermen von 60 °C darf zum Erreichen der gewünschten Endfeuchte von 14 %-FG bei Grüngut die relative Trocknungsgasfeuchte maximal 65 % betragen. Zur Sicherstellung der Regelbarkeit der Anlage bei verschiedenartigem Trocknungsgut wird empfohlen, höchstens bis zur Hälfte an den möglichen Sättigungswert heranzufahren. Dies bedeutet wegen der starken Nichtlinearität der relativen Luftfeuchte allerdings nicht, dass das energetische Potential auch nur zu 50 % ausgenutzt ist. Bei voller Ausnutzung ergibt sich in Abhängigkeit vom Wassergehalt eine Steigerung der Energieeffizienz von maximal 5 %.

6.4.6 Strömungsführung im Trocknungssystem

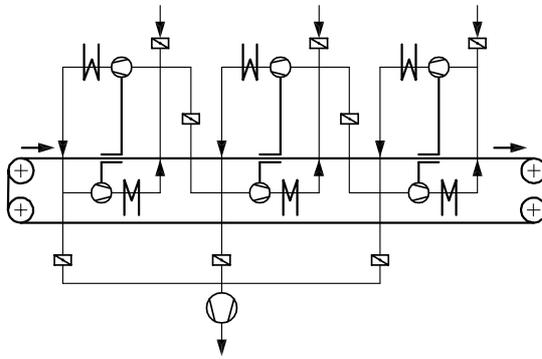
Die Wasserbeladung des Trocknungsmediums in den einzelnen Trocknungskammern des Umlufttrockners lässt sich durch Mischung und Teilausschleusung von Trocknungsbrüden einstellen. So kann in Abhängigkeit von der Produktfeuchtigkeit im Trocknungsverlauf das Trocknungsgas konditioniert werden. Beispielsweise kann der Trocknungsgasstrom von Trocknungskammer zu Trocknungskammer im Gleich- oder im Gegenstrom relativ zum Produktdurchlauf geführt werden. In Bild 69 sind vier mögliche Schaltungsvarianten für die Luftführung in Trocknungsanlagen gezeigt. Die auszuführende Luftführung ist vom Produkt und dem gewünschten Trocknungsverlauf abhängig.



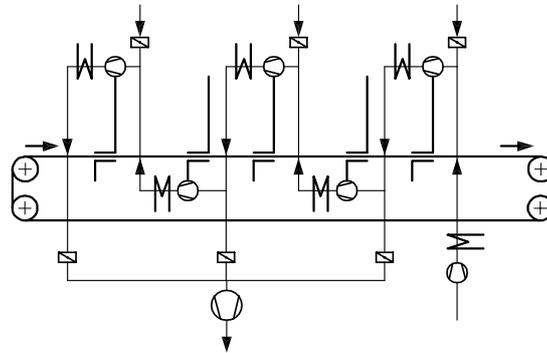
1.) Strömungsführung von oben nach unten durch das Produkt („down“), seitliche Rückführung des Trocknungsgases



2.) Abschnittsweise wechselnde Strömungsführung „up“ und „down“ durch das Produkt, seitliche Rückführung des Trocknungsgases



3.) Strömungsführung im Kreis, Ventilatoren über und unter dem Trocknungsband



4.) Alternierende Strömungsführung gegen den Produktfluss, Ventilatoren über und unter dem Trocknungsband

Bild 69 Strömungsführungen im Umluftbandtrockner

7 Bandrockner für Grüngut / Maße und Kosten

Bei den Grüngutrocknungen in Deutschland ist eine Trocknerleistung von 15 t/h Wasserverdampfung eine übliche Leistungsgröße. Für diese Verdampfungsleistung werden die Größenabmessungen eines Niedertemperaturtrockners festgelegt und der Aufbau und die Funktion der Komponenten des Bandrockners beschrieben. Für die übliche Trocknergröße von 15 t/h wurden Kosten für die Herstellung einer Niedertemperaturanlage bei Firmen erfragt und aus den Optimierungsüberlegungen die Betriebskosten berechnet. Damit kann eine Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Bandtrocknung erfolgen und diese mit der herkömmlichen Heißlufttrocknung verglichen werden. Abschließend sollen Kennzahlen beider Systeme gegenübergestellt werden.

7.1 Dimensionen einer Bandtrocknungsanlage

Als technisch gut realisierbare Größe für einen Niedertemperaturtrockner mit Plattenband hat sich im Rahmen der Untersuchung eine Trocknerleistung von 5 - 7,5 t/h ergeben. Für 15 t/h Wasserverdampfung müssen entweder drei schmalere oder zwei etwas breitere Trocknerlinien aufgestellt werden. Die Trocknerlänge, die Anzahl der Trocknungskammern je Linie und die effektive Trocknerbandfläche wären bei der zwei- und dreiliniigen Ausführung gleich. Bei einer durchschnittlichen Verdampfungsleistung von $45 - 55 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ ergibt sich eine effektive Bandfläche von 300 m^2 .

Zur optimalen Platzausnutzung bietet sich eine mehrstöckige Aufstellung des Trockners an. Bei einer ungeraden Anzahl von drei Stockwerken liegt Produkteinlauf und Produktauswurf vorteilhaft auf den gegenüberliegenden Seiten des Trockners. Die Trocknerhöhe pro Band beträgt 1,5 - 2 m; ein dreistöckiger Bandrockner weist damit eine Höhe von ca. 5 - 6 m auf.

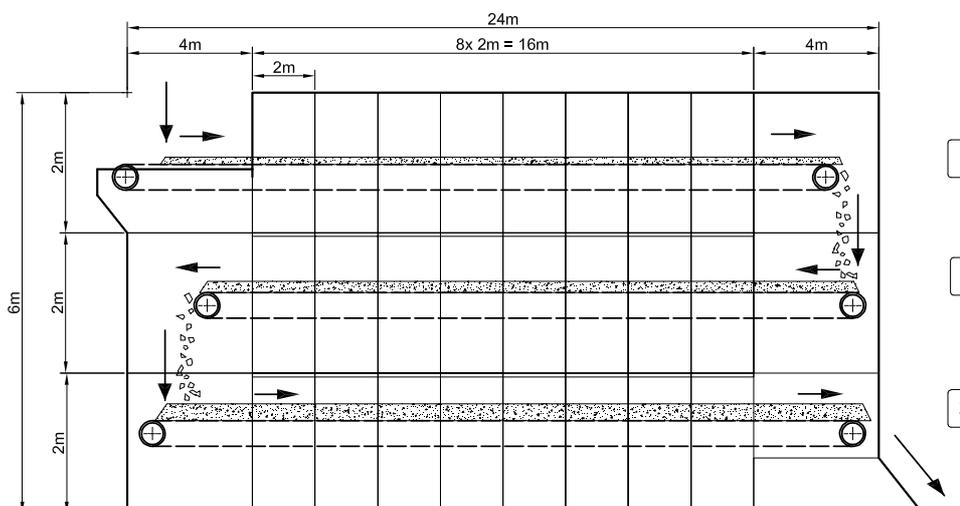


Bild 70 Dimensionen eines 7,5 t/h Plattenbandrockners zur Futtertrocknung

In Bild 70 sind die Außenmaße für einen 7,5 t/h Trockner eingetragen und in Tabelle 26 wichtige Geometriedaten für einen dreistöckigen Bandtrockner zusammengestellt. Zum Erreichen einer hohen Abgassättigung bei schon abgetrocknetem Produkt wird die Produktschicht auf dem 2. und 3. Trocknerband durch einen langsameren Bandlauf erhöht.

Tabelle 26 Geometrische Abmessungen für einen 7,5 t/h Bandtrockner zur Trocknung von Grüngut mit Niedertemperatur

| Bandtrockner 7,5 t/h Wasserverdampfung | Dimension / Größe |
|--|--|
| Bandbreite für einen Trockner mit Plattenband aus Metall | ca. 3,1 m |
| Verhältnis (Heizkammer : Bandbreite) Breite der seitlichen Heizkammer | 3 : 1 1,0 m = 1 : 3 x 3,1 m |
| Trocknerbreite / Trocknergesamtbreite | 4,1 m = 1 m + 3,1 m |
| Trocknerlänge / Trocknergesamtlänge | ca. 16 m / 48 m |
| Anzahl der Trocknerkammern (á 2m) | 8 je Band |
| Trocknergrundfläche | 80 m ² = 20 m x 4,1 m |
| effektive Trocknerfläche pro Trockneretage | 50 m ² = 16 m x 3,1 m |
| Anzahl der Stockwerke / Trockneretagen | 3 |
| Ein- / Austritt | Gegenüberliegend |
| gesamte effektive Trocknerfläche | 150 m ² = 50 m ² x 3 |
| max. Bandgeschwindigkeit Platte | 2,5 - 3 m/min |
| kürzeste Durchlaufzeit Platte | 16 - 20 min |
| Etagenhöhe | ca. 2 m |
| Bauhöhe gesamt | ca. 6 m 2 m x 3 |
| Werkstoffe für - produktberührende Teile - sonstige Teile - Wärmetauscher | Edelstahl Normalstahl Edelstahl oder Kupfer-Messinglegierung |
| Wandstärke doppelwandige Elemente | 100 mm Isolation Steinwolle |
| Anzahl der Produktumlenkungen | 2 |
| Größe der Produktaufgabestation | Länge x Breite (2,5 m x 4,1 m) |
| Größe der Produktabwurfstation | Länge x Breite (1,5 m x 4,1 m) |

7.2 Aufbau und Funktion

Ein Bandtrockner besteht aus folgenden Hauptkomponenten und funktionalen Bauteilen.

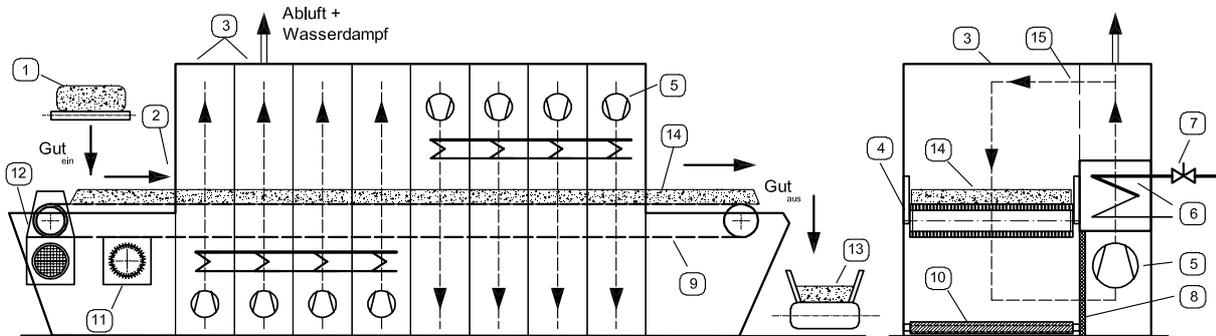


Bild 71 Einliniger Bandtrockner mit acht Trocknungskammern

| | | |
|---------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 1 Produktaufgabestation | 6 Heizung, Wärmetauscher | 11 Bandreinigungsvorrichtung |
| 2 Abdichtung zum Trockner | 7 Regelventil Dampf | 12 Bandantriebsmotor |
| 3 Trocknungskammer | 8 Filter | 13 Produktsammelvorrichtung |
| 4 Laufschienen | 9 Trocknungsband | 14 Trocknungsgut |
| 5 Ventilatoren | 10 Bodenredler | 15 Trocknungsgas |

Produktaufgabestation (1)

An der Produktaufgabestation wird das Grüngut von einer Zuführung kommend auf das Band des Trockners aufgelegt. Hierfür kann ein Schwenkarm mit vertikaler Drehachse oder ein spezielles Aufgabeförderband mit Rückwurfabstreifer, wie in Bild 72 gezeigt, eingesetzt werden. Über die Schütthöhe wird die Menge des pro Quadratmeter aufgelegten Wassers festgelegt. Dabei richtet sich die Menge des auf dem Band aufgelegten Produktes nach der Verdampfungsleistung, die pro Flächeneinheit erreicht wird.

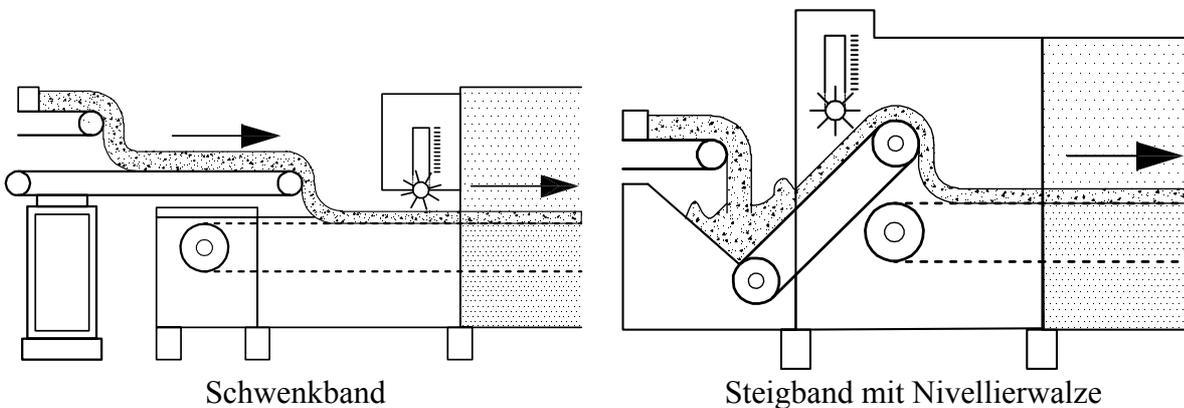


Bild 72 Produktaufgabesysteme für Grüngut

Abdichtung zu den Trocknungskammern (2)

An die Produktaufgabestation schließen sich die einzelnen Trocknungskammern an. Je nach dem, ob in der ersten Trocknungskammer ein geringer Über- oder Unterdruck gegenüber der Umgebung herrscht, tritt aus der Trocknungskammer Luft an die Umgebung aus bzw. in den Trockner ein. Ein Austreten von Trocknungsgas z.B. über die Produktzufuhr ist meist unerwünscht, da es zur Kondensation der Schwaden kommen kann. Zur Abdichtung gibt es verschiedene Vorkehrungen, die oft nur mit einer aufwendigen Konstruktion zu realisieren sind.

Trocknungskammer (3)

Die einzelnen Trocknungskammern eines Bandtrockners sind oft modular aufgebaut. Dabei hat eine Trocknungskammer meist eine Länge von ca. 2 m. Die einzelnen Trocknungskammern können nahezu beliebig aneinandergereiht werden, so dass die Länge des Trockners variabel aufgebaut werden kann. Bei den Trocknungskammern unterscheidet man zwei Typen je nach Richtung der Luftführung durch das Produkt und das Trocknerband. Der Aufbau einer Trocknungskammer mit einer Luftführung von oben nach unten („down“) durch das Produkt und das Band wird bei leichten Produkten bevorzugt. Eine Trocknungskammer mit entgegengesetzter Luftführung von unten nach oben („up“) unterscheidet sich im Aufbau nur durch die horizontal gespiegelte Anordnung der Aggregate (Bild 73).

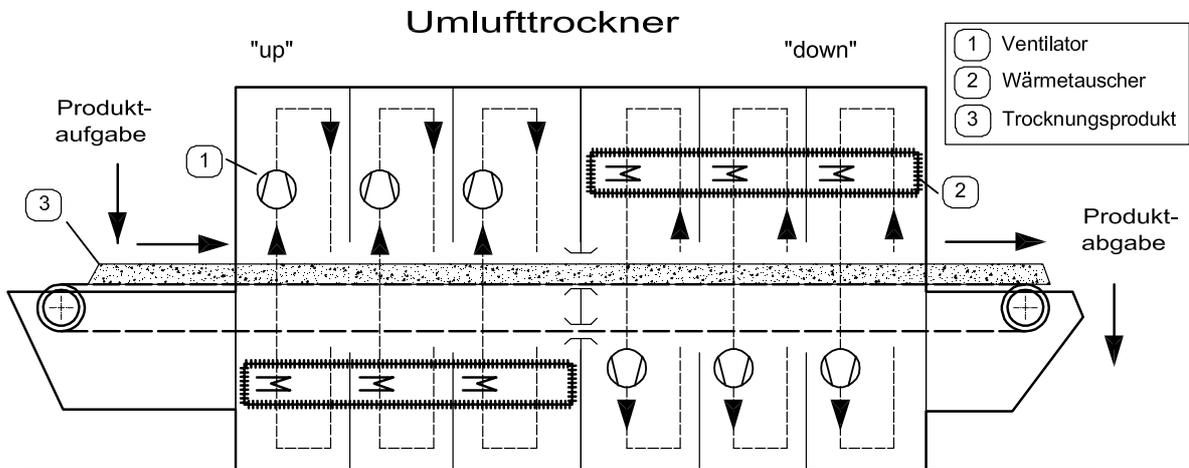


Bild 73 Umlufttrockner mit wechselnder Luftführung

Teile der Trocknungskammer

Eine Trocknungskammer besteht aus folgenden Komponenten:

- **Grundgestell** mit **Boden**, **Decke** und **seitliche Wände** bzw. **Türen**, wobei die nach außen abschließenden Teile mit einer Wärmeisolierung zu versehen sind, die zum Trocknerinnenraum hin gasdicht sein sollte.
- **Dampfheizung (6)** zur indirekten Erwärmung der Trocknungsluft. Eine individuelle Regelung der Trocknungstemperatur in der Kammer erfolgt über das Regelventil (7). Alternativ zum Heizmedium Dampf kann auch Heißwasser oder Thermoöl verwendet werden.
- **Ventilator (5)** mit Antriebsmotor. Der Ventilator stellt den Druck bereit, um die Trocknungsluft durch die Trocknungskammer zirkulieren zu lassen. Da bei mittleren Luftgeschwindigkeiten über dem mit Produkt belegten Trocknungsband nur ein geringer Druckabfall überwunden werden muss, sollten Niederdruckventilatoren eingesetzt werden. Direkt angetriebene Ventilatoren sind wegen des besseren Wirkungsgrades zu bevorzugen.
- **Laufschienen (4)** für das Trocknungsband. An den Innenwänden der Trocknungskammern sind Laufschienen angebracht, auf denen das Trocknungsband mit dem Produktteppich durch die Trocknungskammer geführt wird. In die Laufschienen ist dabei oft eine Dichtung integriert, die einen seitlichen Luftdurchtritt vorbei am Trocknungsgut verhindert.

Ebenso müssen Laufschienen für den Rücklauf des Bandes vorhanden sein.

- **Bodenredler (10)**. Diese Vorrichtung dient zur Verhinderung von Staubansammlungen oder anderen Verschmutzungen durch ein regelmäßiges Abkehren am Boden des Trockners. Dadurch können die Gefahr einer Staubexplosion sowie hygienische Verunreinigungen vermieden werden.

Trocknungsband (9)

Als Trocknungsband kann sowohl ein Gliedermaschenband als auch ein Plattenband verwendet werden. Bei Gliedermaschenbändern aus Metall oder auch aus Spezialkunststoffen liegt der Vorteil in der sehr feinen Struktur der Bänder, die ein Durchfallen von Feinteilen fast vollkommen verhindern. Bei klebrigem Produkt kann ein Zusetzen des Bandes auftreten. Bei Kunststoffbändern besteht eine Zerstörungsgefahr im Brandfall. Eine Funkenerkennung mit automatischer Löschvorrichtung sollte beim Produkt Grüngut vorgesehen werden.

Sehr viel robuster sind Plattenbänder, bei denen Stahlplatten mit eng aneinanderliegenden ausgestanzten Langlöchern an einem Kettenband beidseitig geführt werden. Diese Plattenbänder lassen sich leicht reinigen, sind vom Geradeauslauf unproblematisch und bedürfen nur einer mäßigen Spannung im Bereich der Führungskette.

Trocknungsband-Reinigungsvorrichtung (11)

Bei der Trocknung von frisch geschnittenem Gras tritt an den Schnittflächen Grassaft aus, der sich auf dem Trocknungsband und den Seitenwänden anlegt und dort zu Antrocknungen und Ablagerungen führt. Dieser Grassaft verschmutzt vornehmlich das erste Trocknungsband. Daher sollte dieses aus hochwertigem, gegen Korrosion beständigem Material bestehen und zur Bandreinigung mit einer nassen Bürstenreinigungsvorrichtung ausgerüstet sein.

Bandantrieb (12)

Zum Antrieb der Trocknungsbänder wird ein Elektromotor mit einem Untersetzungsgetriebe eingesetzt. Jedes Trocknungsband ist mit einem eigenen Antriebsmotor ausgerüstet. Zur Regelung der Bandgeschwindigkeit werden die Antriebsmotoren über einen Frequenzumrichter angesteuert. Dies erlaubt neben der genauen Einstellung der Bandgeschwindigkeit auch ein sanftes Anfahren.

Produktumwurfvorrichtung

An den Enden der Trocknerbänder, an denen eine Produktübergabe von einem Trocknungsband auf das nächste stattfindet, ist eine Produktumwurfvorrichtung vorzusehen. Diese Umwurfstation muss die sichere Übergabe des Produktteppichs von einem Trocknungsband zum nächsten gewährleisten. Dabei ist, je nach Art des Trocknungsgutes und der Gestaltung des Trockners, ein gezieltes Umlegen des Produktteppichs oder ein vollkommenes Durchmischen erwünscht. Zudem muss an den Enden der Trocknungsbänder dafür gesorgt werden, dass der Produktteppich, der eventuell im Laufe der Trocknung leicht an dem Band anhaftet, von diesem abgehoben wird und kein Trocknungsprodukt am Band verbleibt. Hierfür ist eine spezielle produktabnehmende Vorrichtung wie z.B. eine langsamlaufende trockene Bürste vorzusehen.

Mess- und Regeltechnik

Die Gastemperatur wird ein- und austrittsseitig an mehreren Stellen im Trockner gemessen, um damit den Trocknungsvorgang steuern und die Qualität des Trocknungsproduktes sicher stellen zu können. Als Stellgrößen können dabei die Eintrittstemperatur, der Trocknungsgasstrom sowie die Bandgeschwindigkeit und Bandbelegungshöhe eingestellt werden. Besonders über die zwei Parameter Trocknungstemperatur und Umluftmenge kann jede Trocknungskammer individuell geregelt und damit der Trocknungsablauf gezielt beeinflusst werden. Über ein Regelventil wird die Dampfmenge, d.h. der Mengendurchsatz zur Beheizung eingestellt. Die Ventilatoren sollten zur Leistungsregelung mit Frequenzumrichtern ausgestattet sein. Der hierfür erforderliche regelungstechnische Aufwand wird von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) übernommen.

In Bild 74 ist das Schema eines zweistöckigen Bandrocknersystems mit den Temperaturmessstellen für die Regelung dargestellt.

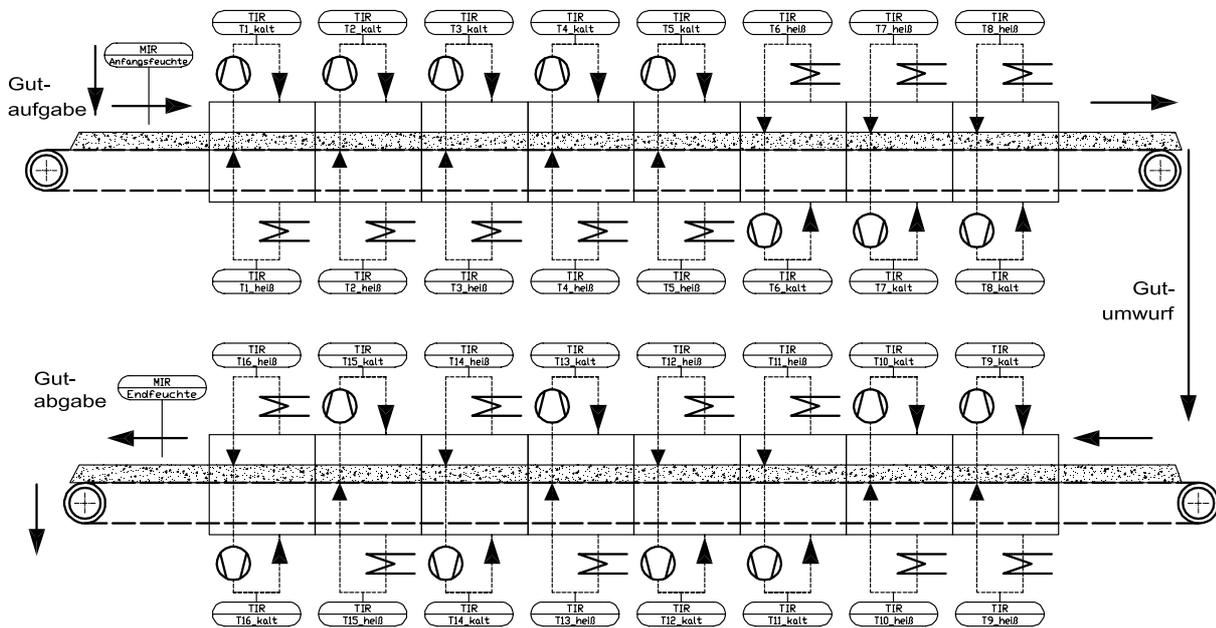


Bild 74 Schema eines Bandrockners mit Temperatur- und Feuchtemessstellen

Die Erfassung der ein- und austrittsseitigen Temperatur in jeder Trocknungskammer ermöglicht eine sehr gute Überwachung und Steuerung des Trocknungsvorgangs.

Produktsammelvorrichtung (13)

Am Ende des Trockners erfolgt der Produktaustrag. Das Produkt fällt in einen Sammelbehälter, aus dem es für die weitere Verarbeitung abgezogen wird.

7.3 Herstellungskosten

Zur Abschätzung der Herstellungskosten für einen indirekt beheizten Bandtrockner mit 15 t/h Wasserverdampfungsleistung wurden Material- und Fertigungskosten bei Firmen erfragt und die sonstigen Leistungen bis zur vollständigen Errichtung abgeschätzt. Das System ist für das Produkt Grüngut konzipiert und bezüglich des Wärme- und Strombedarfs optimierbar. Für die Ermittlung der Kosten wurde für die Beheizung von Niederdruckdampf mit 6,0 bar bzw. einer Kondensationstemperatur von 159 °C ausgegangen. Damit steht zur Trocknung je nach Betriebsweise 140-145 °C heißes Trocknungsgas zur Verfügung.

Tabelle 27 Gesamtherstellungskosten einer Trocknungsanlage für 15 t/h ^(*)

| indirekt beheizter Bandtrockner für Grüngut Kondensationsdruck / -temperatur | Ermittelte Gesamtherstellungskosten für eine Wasserverdampfungsleistung 15 t/h |
|---|---|
| $p_S = 3,6 \text{ bar} / T_S = 139 \text{ °C}$ | 2.760.000 € |
| $p_S = 6,0 \text{ bar} / T_S = 159 \text{ °C}$ | 2.450.000 € |
| $p_S = 9,8 \text{ bar} / T_S = 179 \text{ °C}$ | 2.200.000 € |

Die durchschnittlichen Herstellungskosten einer Trocknungsanlage für 15 t/h belaufen sich auf 2,45 Mio. €. In den Gesamtherstellungskosten sind sämtliche Kosten mit Ein- und Austragssystem, die Mess- und Regeltechnik, die gesamte externe Verrohrung, die Luft- und Abluftkanäle, die Installation und Montage, alle Planungsleistungen sowie Versicherung und Fracht enthalten.

Zum Vergleich verschiedener Trocknungsanlagen kann man die spezifischen Herstellungskosten mit Bezug auf die Wasserverdampfungsleistung und die Bandfläche heranziehen. Für einen mit 6,0 bar beheizten Trockner ergeben sich spezifische Herstellungskosten von 163.000 € pro t/h Wasserverdampfung und auf den Quadratmeter Bandfläche bezogene Kosten von 8.200 € (Tabelle 28).

Tabelle 28 Spezifische Herstellungskosten von Bandtrocknern

| Spezifische Herstellungskosten pro Kondensationsdruck / -temperatur | Wasserverdampfung in $[\frac{\text{Euro}}{\text{t}_{H_2O}/\text{h}}]$ | Bandfläche in $[\frac{\text{Euro}}{\text{m}^2_{\text{Band}}}]$ |
|--|--|---|
| $p_S = 3,6 \text{ bar} / T_S = 139 \text{ °C}$ | 184.000 | ≤ 8.200 |
| $p_S = 6,0 \text{ bar} / T_S = 159 \text{ °C}$ | 163.000 | 8.200 |
| $p_S = 9,8 \text{ bar} / T_S = 179 \text{ °C}$ | 147.000 | ≥ 8.200 |

^(*) die Herstellungskosten und sonstigen Preise wurden in DM zwischen 1998 und 2000 ermittelt und in Euro (gerundet) umgerechnet (1 € = 1,95583 DM)

Aus den Betrachtungen zu den Durchluft- und Umlufttrocknersystemen aus Kapitel 6.1 lässt sich die benötigte Trocknungsfläche in Abhängigkeit von der Trocknungsgaseintrittstemperatur bestimmen. Da sich die Kosten eines Bandtrockners proportional zur Trocknungsfläche ändern, lassen sich über die Fläche die Herstellungskosten für andere Eintrittstemperaturen des Trocknungsgases berechnen. In Bild 75 ist die relative Änderung der Herstellungskosten in Abhängigkeit von der Trocknungsgastemperatur dargestellt.

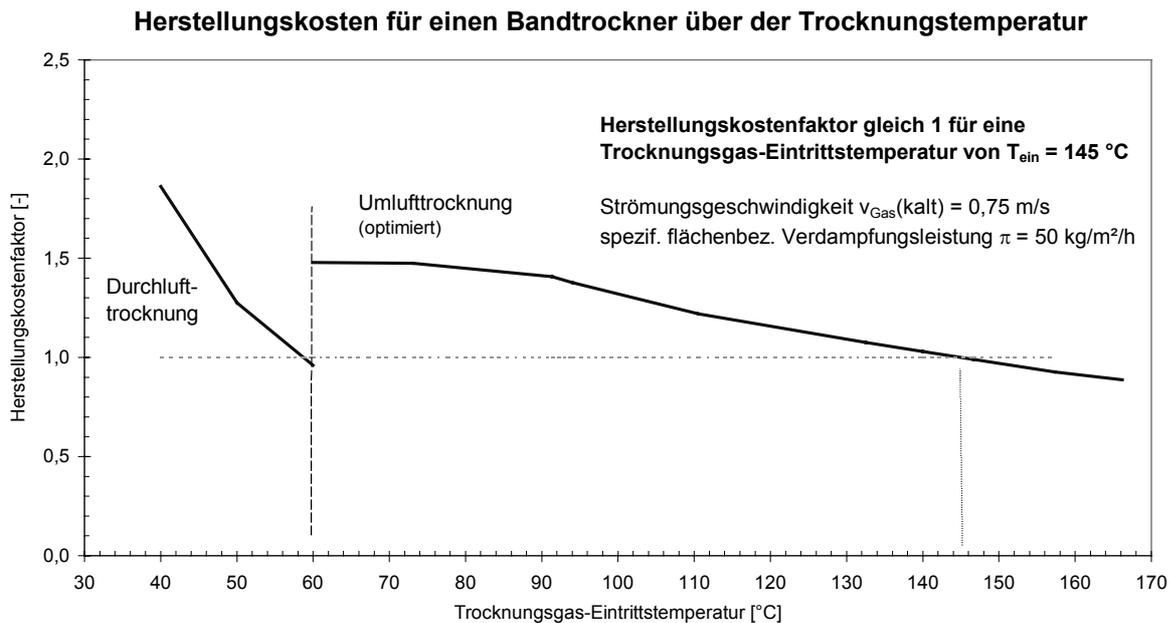


Bild 75 Änderung der Herstellungskosten, ermittelt aus der notwendigen Trocknerbandfläche über der Trocknungsgaseintrittstemperatur T_{ein}

Anhand der relativen Änderung aus Bild 75 wurde aus den bekannten Herstellungskosten von 2,45 Mio. € bei 145 °C Trocknungsgastemperatur die ebenfalls in Tabelle 27 angegebenen Kosten bei 10 K niedrigerer und höherer Temperatur berechnet.

Im Bild 75 sind die relativen Herstellungskosten auch für einen Temperaturbereich unter 60 °C aufgetragen, in dem nur noch eine Durchlufttrocknung energetisch sinnvoll ist. Der Sprung in den Herstellungskosten zwischen dem Durchlufttrockner und dem Umlufttrockner resultiert aus der Änderung der Bauweise. Durchlufttrockner kosten auf die Trocknerfläche bezogen wesentlich weniger als Umlufttrockner.

7.4 Betriebskosten

Als laufende Kosten fallen bei der Grünfuttertrocknung Wärme- und Strombedarf, Personalaufwand, Verschleißteile und sonstige Betriebsstoffe an. In Tabelle 6

sind für eine Heißlufttrocknung die Aufteilung der jährlichen Betriebskosten angegeben. Kapitalkosten werden bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

Der Energiebedarf macht sowohl bei der herkömmlichen Heißlufttrocknung als auch bei der Niedertemperaturtrocknung den überwiegenden Teil der Betriebskosten aus. Die Kostenpositionen Personalaufwand, Verschleißteile und sonstige Betriebsstoffe werden in den folgenden Betrachtungen nicht weiter untersucht, da diese bei Hoch- und Niedertemperatursystemen in ungefähr gleicher Höhe anfallen.

Der Wärme- und Strombedarf für einen Niedertemperaturtrockner wurde in Kapitel 6.2.3 genau berechnet. Für das energieoptimierte System mit 6,0 bar Kondensationsdruck ($T_S=159\text{ °C}$) können die Betriebskosten mit den Werten $q_{th} = 755\text{ Wh/kg}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{verd.}}}$ und $e_{el} = 22,6\text{ Wh/kg}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{verd.}}}$ zuzüglich 20 kW für die Bandantriebe angesetzt werden. Zudem sind in Tabelle 29 die Betriebskosten für eine um 20 K niedrigere und höhere Kondensationstemperatur, berechnet aus der Sensibilitätsbetrachtung von Kapitel 6.2.4, dargestellt.

Tabelle 29 Betriebsdaten eines energieoptimierten Bandtrockners

| energieoptimierter Bandtrockner mit 15 t/h Kondensationsdruck / -temperatur | Strombedarf Leistung im Nennbetrieb (inkl. 20 kW Bandantriebe) | Wärmebedarf Leistung im Nennbetrieb |
|---|--|--|
| $p_S = 3,6\text{ bar} / T_S = 139\text{ °C}$ | 403 kW | 11,7 MW |
| $p_S = 6,0\text{ bar} / T_S = 159\text{ °C}$ | 360 kW | 11,3 MW |
| $p_S = 9,8\text{ bar} / T_S = 179\text{ °C}$ | 319 kW | 11,1 MW |

Zur Bewertung des Energiebedarfs wurde ein Vergleich mit dem Verbrauch einer Heißlufttrocknung entsprechender Leistungsgröße angestellt. Dazu wurde der maximal bezahlbare Preis für 6,0 bar-Dampf ermittelt, bei dem es für die Futtertrocknung zu keiner Verteuerung in den Gesamt-Energiekosten käme.

Die Energiekosten der herkömmlichen Heißlufttrocknung sind für eine durchschnittliche Ausgangsfeuchte von 77,8 % für Grüngut und Mais berechnet und auf das bei der Grünguttrocknung übliche Maß der dt (Dezitonne = 100 kg) Trockengut bezogen. Dabei wurden Trocknungskosten aus den Jahren 1998 und 1999 für den Wärme- und den Strombedarf, ohne die Grüngutaufbereitung und Trockengrünweiterverarbeitung, in Höhe von 4,31 €/dt zugrundegelegt. Diese Energiekosten setzen sich aus einem durchschnittlichen Strompreis von 0,079 €/kWh und einem Gaspreis, bezogen auf den unteren Heizwert, von 13,16 €/MWh zusammen.

Tabelle 30 Trocknungskosten der Niedertemperaturtrocknung

| Vergleich laufende Kosten | Trocknungsenergiekosten | theor. Max. Dampfkosten | Trocknungsenergiekosten |
|----------------------------------|---|---|--|
| Kondensationsdruck / -temperatur | bei Wärmekosten in Höhe der Gaskosten 13,16 €/MWh _{Hu} | bei Trocknungsenergiekosten in Höhe von 4,31 €/dt | bei Dampfkosten in Höhe von 16 €/MWh _{th} |
| 3,6 bar / 139 °C | 4,34 €/dt | 13,07 €/MWh | 5,07 €/dt |
| 6,0 bar / 159 °C | 4,15 €/dt | 13,76 €/MWh | 4,86 €/dt |
| 9,8 bar / 179 °C | 4,00 €/dt | 14,34 €/MWh | 4,70 €/dt |

Für den Strom- und Wärmeverbrauch des energieoptimierten Bandrockners bei 6,0 bar errechnet sich ein äquivalenter Dampfpreis von 13,76 €/MWh.

Ausgehend von einem marktnahen Dampfpreis von 16 €/MWh würden sich Trocknungsenergiekosten von 4,86 €/dt ergeben.

7.5 Wirtschaftliche Gesamtbewertung

Für ein Niedertemperatur-Bandrocknungssystem wurden Marktpreise für alle Teile und Komponenten ermittelt und daraus Gesamtherstellungskosten berechnet. Das System ermöglicht eine Optimierung des Energieverbrauchs.

Die Herstellungskosten für ein mit 6,0 bar-Dampf beheiztes System belaufen sich auf 2,45 Mio. €. Beim Einsatz von Dampf mit 9,8 bar reduzieren sich die Baugröße um 12,4 % und damit die Herstellungskosten auf 2,2 Mio. €. Steht nur Dampf von 3,5 bar zur Verfügung, muss der Trockner größer gebaut werden und kostet dann 2,76 Mio. €.

Aus den Betrachtungen in Kapitel 6.2 lässt sich der Leistungsbedarf für Wärme und Strom abschätzen und der Energiebedarf angeben. Ausgehend von wirtschaftlich notwendigen gleich hohen Trocknungskosten eines Bandrockners und einer Heißlufttrocknung wurde ein maximal bezahlbarer Dampfpreis errechnet. Dieser liegt bei 13,76 €/MWh für 6,0 bar-Dampf.

Setzt man einen marktnahen Dampfpreis von 16 €/MWh an, so ergeben sich Trocknungsenergiekosten von 4,86 €/dt. Bei einer Jahresproduktionsmenge von ca. 120.000 dt/a, die von einem Trockner mit 15 t/h Wasserverdampfung erreicht wird, ergeben sich bei dem optimierten System über 583.000 € an Betriebskosten pro Jahr.

Tabelle 31 Herstellungs- und laufende Betriebskosten

| Trocknungssystem mit 15 t/h Verd.-leistung Bandtrockner Kond.-druck/-temperatur | Gesamt- Herstellungskosten | Mehrkosten (Bezug Band- trockner 6 bar) bezogen auf dt Trockengut | jährliche Heiz- energiekosten bezogen auf eine Jahresproduktion von 120.000 dt/a | jährl. Mehrkosten (Bezug Band- trockner 6 bar) für Dampfpreis 16 €/MWh |
|--|-------------------------------|---|--|--|
| 3,6 bar / 139 °C | 2.760.000 € | +310.000 € | 608.000 € | +25.000 €/a |
| 6,0 bar / 159 °C | 2.450.000 € | - | 583.000 € | - |
| 9,8 bar / 179 °C | 2.200.000 € | -250.000 € | 564.000 € | -19.000 €/a |
| Heißlufttrockner (800°C) | 1.230.000 € | -1.220.000 € | 517.000 € | -66.000 €/a |

Der Niedertemperaturtrockner für 6 bar-Dampf ist in den Herstellungskosten ungefähr doppelt so teuer wie eine herkömmliche Heißlufttrocknungsanlage. Für einen marktnahen Dampfpreis von 16 €/MWh sind die Trocknungskosten des Niedertemperatursystems um 66.000 €/a höher als bei der direkt-befeuerten Trocknung.

Verteilt man die Mehrkosten in der Herstellung des Niedertemperaturtrockners gegenüber der Heißlufttrocknung auf die laufenden Energiekosten, errechnet sich ein Preisabschlag gegenüber den 13,76 €/MWh. Hierfür werden die Herstellungsmehrkosten annuitätisch über 15 Jahre bei 5 % Zins auf den Dampfpreis umgelegt.

In Abhängigkeit von der Betriebstemperatur des Trockners ergeben sich Dampfpreise von 9,94 - 12,26 €/MWh. Dabei ist auch berücksichtigt, dass Niedertemperaturtrockner mit höherem Kondensationsdruck kleiner zu bauen und daher günstiger sind.

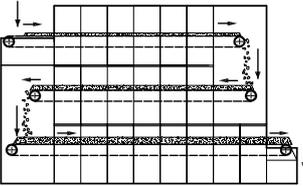
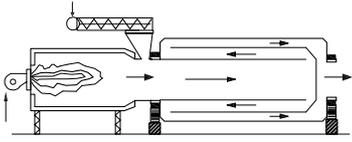
Tabelle 32 Wärmekosten unter Berücksichtigung der Herstellungsmehrkosten

| Trocknungs- system Bandtrockner Kondensations- druck | Gesamt- herstellungs- kosten Anlagen- kosten | Mehrkosten (in Bezug zur Heißluft- trocknung) | Äquivalente Dampfkosten bei Trocknungs- Energiekosten von 4,31 €/dt | Umlage der Herstellungs- mehrkosten auf Betriebskosten Jahresproduktion von 120.000 dt/a bzw. 2800 h | Äquivalente Dampfkosten mit Umlage der Herstellungs- mehrkosten |
|--|--|--|---|--|---|
| 3,6 bar | 2.760.000 € | + 1.530.000 € | 13,07 €/MWh | -3,13 €/MWh | 9,94 €/MWh |
| 6,0 bar | 2.450.000 € | + 1.220.000 € | 13,76 €/MWh | -2,57 €/MWh | 11,19 €/MWh |
| 9,8 bar | 2.200.000 € | + 970.000 € | 14,34 €/MWh | -2,08 €/MWh | 12,26 €/MWh |
| Heißlufttrockner | 1.230.000 € | - | H _u Erdgas : | 13,16 €/MWh | |

7.6 Gegenüberstellung wichtiger Kennzahlen

In Tabelle 33 sind die wichtigsten Kenndaten für einen Niedertemperaturbandtrockner und einen Heißlufttrommelrockner für Grüngut gegenübergestellt:

Tabelle 33 Wichtigste Kenndaten von Bandtrockner und Trommelrockner

| Kennzahlen | Bandtrockner | Trommelrockner |
|--|---|--|
| System |  |  |
| Anlagengröße [kg _{H2O} /h] | ca. 1.000 – 7.500 | ca. 3.000 – 30.000 |
| Trocknungstemperatur [°C] | 80 – 170 | 450 – 1000 |
| Ablufttemperatur [°C] | 40 – 95 | 90 – 130 |
| Art der Beheizung | Indirekt | direkt |
| Heizsystem / Brennstoff | Kraft-Wärme-Kopplung 2 – 10 bar Sattedampf | Primärenergie Erdgas, Erdöl |
| Trocknungszeit [min] | 15 – 30 | 3 – 7 |
| max. Verarbeitungslänge des Grüngutes [mm] | < 250 | < 70 |
| Wasserverdampfung | | |
| [$\frac{kg_{H2O}}{m^2 \cdot h}$ Bandfläche] | 40 – 60 | |
| [$\frac{kg_{H2O}}{m^3 \cdot h}$ Trommelvolumen] | | 20 – 35 |
| Spezifischer Wärmeverbrauch | | |
| [Wh _{th} / kg _{H2O}] | 750 – 900 | 810 – 860 |
| [kWh _{th} / dt _{TG}] | 3,0 – 3,6 | 3,2 – 3,5 |
| Spezifischer Stromverbrauch | | |
| [Wh _{el} / kg _{H2O}] | 15 – 30 | 9 – 22 |
| [Wh _{el} / dt _{TG}] | 60 – 120 | 36 – 88 |
| spezifische Gesamt- Investitionskosten | | |
| €/kg _{H2O} /h (Wasserverdampf.) | 143 – 184 | 72 – 92 |
| €/m ² (Bandfläche) | 7.160 – 9.200 | |
| €/m ³ (Trommelvolumen) | | ca. 1.940 – 2.560 |

8 Verbund von Heizkraftwerk und Niedertemperaturtrockner

Bei der Trocknung von Grüngut werden große Wärmemengen benötigt. Damit ist praktisch immer ein Verbrennungsprozess nahe der Trocknungsanlage notwendig. Andererseits ist es für die Qualität des Trockengutes zweckdienlicher, wenn die Trocknung mit moderater Temperatur erfolgt. Es liegt daher nahe, die bei der Verbrennung entstehenden heißen Gase zunächst zur Stromerzeugung zu nutzen und erst die Abwärme aus diesem Prozess für die Trocknung einzusetzen.

8.1 Technische Gestaltung des Verbundsystems

Ein Dampfkraftwerk mit einer Energieerzeugung wie in Kapitel 2.1.6 vorgestellt, erzeugt primär Strom, kann aber auch Wärme in großen Mengen über das Medium Dampf bereitstellen. Über ein Dampfnetz wird die Wärme an den oder die Verbraucher herangeführt.

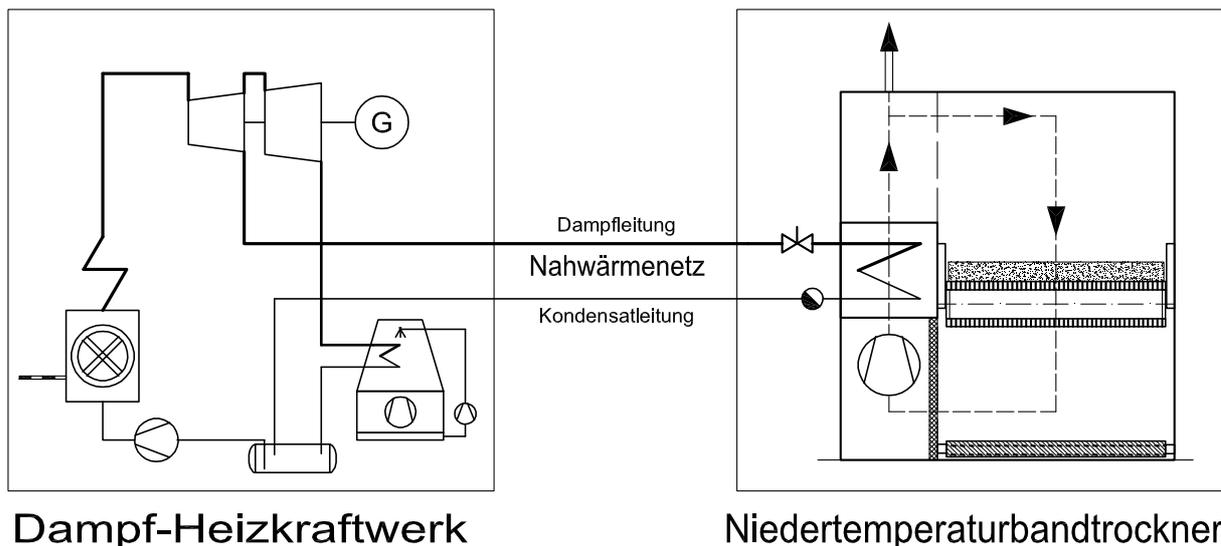


Bild 76 Kopplung eines Heizkraftwerkes mit einem Niedertemperaturtrockner

Im Wärmeübertrager des Abnehmers kondensiert der Dampf unter Abgabe der Kondensationswärme. Das dabei anfallende Kondensat wird in einer Kondensatleitung zum Dampfkraftwerk zurückgeführt. Eine Wärmeversorgung für dampfbeheizte Verbraucher ist dadurch bei gleichzeitiger, vorgelagerter Stromproduktion möglich. Ein technisches System das mit Satttdampf beheizt werden kann und große Mengen an Wärme benötigt, ist der indirekt-beheizte Bandtrockner. Eine solche Trocknungsanlage kann an ein Heizkraftwerk gemäß Bild 76 gekoppelt werden.

8.2 Energienutzung

Eine Bewertung der Energienutzung ohne Zugrundelegung eines konkreten Systems ist wenig aussagekräftig, da die Ergebnisse stark von den getroffenen Annahmen, wie Betriebszeiten und Gleichzeitigkeit des Bezuges sowie den angesetzten Leistungsgrößen abhängen. Für die Trocknungsanlagen wurde bereits in Kapitel 6 ausgeführt, dass eine Verdampfungsleistung von 15 t/h eine verbreitete Größe darstellt. Eine vollständige Wärmeversorgung wäre mit einem Heizkraftwerk mit ca. 37 MW Feuerungswärmeleistung möglich, wobei ohne Wärmeauskopplung bis zu 10 MW_{el} elektrische Leistung in das Verbundnetz eingespeist werden könnten.

Für die folgenden Betrachtungen wird von einem Heizkraftwerk mit den Leistungsdaten aus Tabelle 34 ausgegangen. Bei einer kleineren Leistungsgröße wäre eine ausreichende Wärmeversorgung der Trocknungsanlage mit der benötigten Wärmemenge nicht mehr möglich.

Tabelle 34 Wichtigste Auslegungsdaten für ein Heizkraftwerk mit 10 MW_{el} Leistung

| Auslegungsdaten der Anlage | Ansatz | Bezug |
|--|--------|-----------------------|
| max. Feuerungswärmeleistung (FWL) | 37,4 | MW |
| Abgastemperatur (Kamin) | 150 | °C |
| Brennstoff z.B. Holz, Späne, Rinde, ... | ca. 10 | t/h (je nach Feuchte) |
| unterer Heizwert für Holz, Späne, Rinde, ... | 4,6 | kWh/kg _{TS} |
| elektrische Leistung (Einspeisung) | 10 | MW _{el} |
| thermische Leistung (max.) | 20 | MW _{th} |
| Rückkühlung (Nasskühlturm) | ca. 75 | mbar |
| Kondensationstemperatur (Turbine kalt) | 40 | °C |
| Dampfauskopplung (Turbine-Wärmenetz) | ca. 6 | bar |
| Kondensationstemperatur (Satttdampf) | 159 | °C |
| Betriebsstunden pro Jahr | 7.500 | h/a |
| Personalbedarf | 3 | Personen pro Schicht |

Für eine größere Anlage, zum Beispiel mit doppelter Leistung, würden sich bis auf die Größenordnung der Komponenten kaum Änderungen in der technischen Ausführung ergeben. Mit steigender Anlagenleistung würden aber die spezifischen Investitionskosten sinken, wodurch auch die Produktionskosten für Strom und Wärme niedriger ausfallen würden.

Für Heizkraftwerke mit festen Brennstoffen in der betrachteten Leistungsgröße können die in Tabelle 35 gegebenen Nutzungsgrade angesetzt werden. Dabei ist ein Verbrennungs- und Dampferzeugersystem mit einer hohen Energienutzung und einem geringen Luftüberschuss, wie z.B. einer Wirbelschichtfeuerung, zugrundegelegt. Auch für die Kraftwerkskomponenten von Wasser-Dampf-

kreislauf, Turbine und Rückkühlwerk wurde eine hochwertige Ausführung angenommen.

Tabelle 35 Energiespezifische Daten für ein Heizkraftwerk mit $10 \text{ MW}_{\text{el}}$

| energiespezifische Daten der Anlage | Ansatz | Einheit |
|---|---------|-----------------------------------|
| elektrischer Wirkungsgrad (brutto) | ~ 32 | % |
| elektrische Leistung (max) | 11,2 | MW_{el} |
| Eigenbedarf elektrisch | 1,2 | MW_{el} |
| elektrischer Wirkungsgrad (netto) | ~ 30 | % |
| thermischer Nutzungsgrad | ~ 92,5 | % |
| isentroper Stufenwirkungsgrad (Turbine) | 82 – 86 | % |
| Entspannung ins Nassdampfgebiet x | 0,88 | - |
| Produktion bei Betriebsstunden pro Jahr | 7.500 | h/a |
| max. elektrische Arbeit (Einspeisung) | 75.000 | MWh_{el} pro Jahr |
| theoretische max. thermische Wärme | 259.000 | MWh_{th} pro Jahr |
| thermische Wärme bei min. el. Stromabgabe | 150.000 | MWh_{th} pro Jahr |
| elektrische Arbeit bei max. th. Wärmeabgabe | 42.000 | MWh_{el} pro Jahr |

Für die Versorgung der Trocknungsanlage wird Dampf auf einem Druckniveau von 6 bar benötigt. Eine zunehmende Wärmeauskopplung aus dem Heizkraftwerk führt zu einem Rückgang in der Stromerzeugung, der in Bild 77 dargestellt ist.

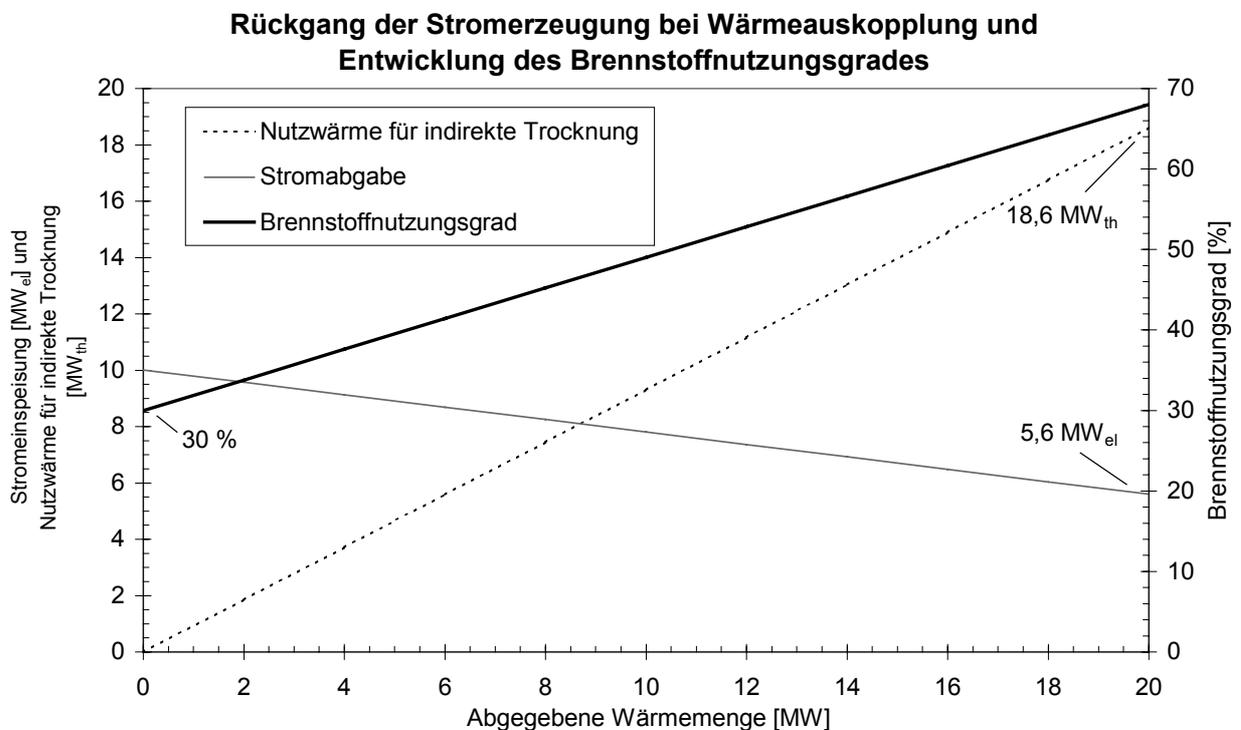


Bild 77 Stromabgabe, Entwicklung des Brennstoffnutzungsgrades und Nutzwärme einer Trocknungsanlage über der Abgabe von Dampf aus einem HKW

Dabei wurde als Trocknungsanlage von einem energieoptimierten Bandtrockner für Niedertemperatur ($T_s = 159^\circ\text{C}$) mit einem Gesamtnutzungsgrad von 93,1 % ausgegangen (siehe Bild 52). Zudem ist in Bild 77 die Steigerung des Brennstoffnutzungsgrades η_{Br} eingetragen, der nach Gleichung (88) berechnet wurde.

$$\eta_{Br} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\dot{Q}(\text{nutz, Trocknung}) + P_{el,netto}}{\dot{Q}(\text{zu})} \quad (88)$$

Während bei einer reinen Stromproduktion der Brennstoffnutzungsgrad dem Netto-Wirkungsgrad des Kraftwerks von 30 % entspricht, steigt mit zunehmender Wärmeauskopplung für die Trocknungsanlage der Brennstoffnutzungsgrad bis auf 68 % an.

8.3 Spezifische Kohlendioxidemissionen

In Tabelle 36 sind für die Brennstoffe Kohle, Erdgas und Holz/Rinde die spezifischen CO_2 -Emissionen bezogen auf den unteren Heizwert angegeben, wobei auch die als CO_2 -neutral bewertete Biomasse eine Vorbelastung von $2 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{th}}$ wegen der erhöhten Aufwendungen für die Ernte und Aufbereitung zum Brennstoff angelastet wurde. Dies entspricht in etwa der Energie, die bei der Bereitstellung des Brennstoffs eingesetzt werden muss und die daher eine Belastung mit CO_2 -Emission verursacht.

Tabelle 36 Spezifische CO_2 -Emissionen für verschiedene Brennstoffe /46/

| spezifische CO_2 -Emissionen | $\text{g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{th}}$ |
|---------------------------------------|---|
| Braunkohle, divers (Deutschland) | 367 – 399 |
| Erdgas, divers | 198 – 204 |
| Biomasse Holz/Rinde | ca. 392 |
| Biomasse Holz/Rinde - regenerativ | ca. 2 |

Für Kraftwerke mit den Brennstoffen Kohle, Erdgas und Holz lassen sich die spezifischen CO_2 -Emissionen berechnen. In Tabelle 37 ist dabei sowohl ein Bezug auf die erzeugte Menge Strom als auch auf die auskoppelbare Menge Wärme angegeben. Der spezifische CO_2 -Emissionswert des Biomasse-Heizkraftwerks resultiert aus dem angesetzten Eigenbedarf für die Strom- und Wärmeerzeugung, der, da dieser zusätzlich anfällt und dadurch kein herkömmlich erzeugter Strom verdrängt wird, als nicht CO_2 -neutral bewertet wurde. Bei einer Bewertung des CO_2 Ausstoßes aus den Biomasse-HKW ($\varepsilon = 30\%$) entstünden $1.307 \text{ g}_{\text{CO}_2}$ pro kWh_{el} Strom bzw. $424 \text{ g}_{\text{CO}_2}$ pro kWh_{th} Wärme.

Tabelle 37 Spezifische CO₂-Emissionen für verschiedene Kraftwerkstypen /47/

| spezifische CO ₂ -Emissionen | g _{CO2} /kWh _{el} | g _{CO2} /kWh _{th} |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Kohle – Heizkraftwerk ($\epsilon = 28 \%$) | 1.368 | 426 |
| Gas und Dampf Kraftwerk ($\epsilon = 58 \%$) | 351 | 220 |
| Biomasse-HKW regenerativ ($\epsilon = 30 \%$) | 140 | 45 |

In Tabelle 38 wurden wieder für die Brennstoffe Kohle, Erdgas und Holz sowie für verschiedene Trocknertypen die spezifischen CO₂-Emissionen berechnet. Dabei wurden die zwei Trocknungssysteme der herkömmlichen Heißlufttrocknung und der Niedertemperaturtrocknung betrachtet. Als Bezug wurde ein kg verdampftes Wasser gewählt.

Tabelle 38 Spezifische CO₂-Emissionen für verschiedene Trocknertypen

| spezifische CO ₂ -Emissionen | Bezugsbrennstoff | g _{CO2} /kg _{H2O} |
|---|-------------------|-------------------------------------|
| direkt-befuerter Heißgastrockner T _{ein} = 520 °C | Erdgas | 190 |
| direkt-befuerter Heißgastrockner T _{ein} = 520 °C | Holz, regenerativ | 34 |
| Niedertemperaturbandtrockner T _{ein} = 140 °C | Dampf aus Kohle | 482 |
| Niedertemperaturbandtrockner T _{ein} = 140 °C ⁽¹⁾ | Dampf aus | 53 |
| optimierter Niedertemp.-Trockner T _{ein} = 140 °C ⁽²⁾ | Holz, regenerativ | 40 |

(1) nach Abschätzung von Herstellerangaben

(2) nach Optimierung, gemäß Kapitel 6.2.3

Die niedrigsten Emissionen ergeben sich für den mit Biomasse direkt beheizten Heißlufttrockner mit 34 g_{CO2}/kg_{H2O}. Fast gleich niedrig ist mit 40 g_{CO2}/kg_{H2O} die CO₂-Abgabe des energieoptimierten Niedertemperaturtrockners. Der Unterschied resultiert aus dem Ansatz der Wärme mit 45 g_{CO2}/kWh_{th} (Tabelle 37), der durch den hohen Eigenbedarf des Biomasse-Kraftwerks belastet ist, während der Brennstoff Holz oder Rinde nur mit 2 g_{CO2}/kWh_{th} (Tabelle 36) angesetzt wurde.

Würde man die CO₂-Emissionen aus der Biomasse gemäß der chemischen Zusammensetzung des Abgases zugrundelegen, entfielen 368 g_{CO2}/kg_{H2O} auf einen direkt-befeuerten Heißgastrockner. Im Vergleich wäre dann der herkömmliche mit Erdgas beheizte Heißgastrockner mit 190 g_{CO2}/kg_{H2O} das System mit den niedrigsten CO₂-Emissionen.

8.4 Wärmegestehungskosten für Dampf

Beispielhaft wird ein Heizkraftwerk mit den Auslegungsdaten aus Tabelle 34 mit einer elektrischen Leistung von 10 MW_{el} ohne Wärmeauskopplung und einer reduzierten Leistung von 5,6 MW_{el} bei einer maximalen Wärmeauskopplung von knapp 20 MW_{th} betrachtet. Über eine Dampfleitung ist eine Versorgung einer

Trocknungsanlage mit einer Wasserverdampfung von 15 t/h möglich. Im Jahr können bei 7.500 Betriebsstunden ohne Wärmeabgabe 75.000 MWh_{el} an elektrischer Energie erzeugt werden. Bei voller Wärmeauskopplung wäre die Erzeugung von Strom in Höhe von 42.000 MWh_{el} und eine Wärmeabgabe in Höhe von ca. 150.000 MWh_{th} möglich.

Für die Abschreibung und die Kapitalkosten des Heizkraftwerks werden die Werte aus Tabelle 39 angesetzt. Die kaufmännische Abschreibungsdauer von 25 Jahren ist dabei an die mindestens erreichbare technische Betriebszeit angelehnt. Die Verzinsung des zu 70 % eingesetzten Fremdkapitals wird mit 5 % über die gesamte Laufzeit angenommen. Eine Verzinsung des Eigenkapitals wurde hier nicht angesetzt, da in dieser Betrachtung nur die zu deckenden Fremdkosten betrachtet werden sollen.

Tabelle 39 Werte für Abschreibung und Kapitalkosten des Heizkraftwerks

| Abschreibung und Kapitalkosten | Ansatz | Bezug |
|---------------------------------------|---------------|--------------|
| Abschreibung (kaufmännisch) | 25 | a (linear) |
| Betriebszeit / Laufzeit (technisch) | mind. 25 | a |
| Eigenkapital | 30 | % |
| Fremdkapital | 70 | % |
| Zinssatz Fremdkapital | 5 | % p.a. (fix) |

In Tabelle 40 sind die Investitionskosten und Betriebskosten des Heizkraftwerks zusammengestellt. Für diese Abschätzung wurden die gesamten Investitionskosten mit 2.740 € pro kW installierte Leistung angesetzt. Auf eine Differenzierung in Grundstück, Gebäude sowie kurz- und langlebige Investitionsgüter wurde für diese Betrachtung verzichtet.

Tabelle 40 Investitionskosten und Betriebskosten des Heizkraftwerks

| Investitionskosten und Betriebskosten | Betrag | Bezug |
|--|---------------|-------------------------|
| spezif. Investitionskosten (bez. Strom) | 2.740 | €/kW _{el} |
| spezif. Investitionskosten (bez. Wärme) | 890 | €/kW _{th} |
| Investitionskosten, gesamt | 31 | Mio. € |
| Brutto-Personalkosten | 39.900 | € p.a. pro Arbeitnehmer |
| Versicherung | 1 | % p.a. der Investition |
| laufende Betriebskosten | 2 | % p.a. der Investition |
| Brennstoffkosten (Schwachholz, Restholz ...) | 26 | €/t _{TS} |
| Brennstoffkosten (4,6 MWh/t _{TS}) | 5,52 | €/MWh _{th} |
| Aschegehalt | 2 | % |
| Ascheentsorgung | 100 | €/t |

Aus den spezifischen Investitionskosten errechnet sich für die als Kondensationskraftwerk mit Wärmeauskopplung ausgeführte Anlage ein Betrag von 31 Mio. €. Für die variablen Kosten, wie Personal, Versicherung und laufende Betriebskosten wurden Durchschnittswerte herangezogen. Die Kosten für den Brennstoff Holz werden mit 26 €/t_{TS} und für die Entsorgung der aus dem Brennstoff zu ca. 2 % anfallenden Asche mit 100 €/t abgeschätzt.

Mit den Werten aus den Tabellen 34, 35 und 40 lässt sich für die Wärmeproduktion aus einem Heizkraftwerk ein minimaler Preis berechnen, der für die Megawattstunde Dampf an Produktionskosten angesetzt werden muss. Dabei sind in Tabelle 41 die Kosten aufgeschlüsselt. Neben den Brennstoffkosten von 4,57 €/MWh_{th} ist die Abschreibung auf die Investition mit 3,60 €/MWh_{th} der größte Kostenblock. Bei dem hier gemachten einfachen Ansatz wurde keine Kostenaufteilung zwischen Kosten für die Dampfproduktion und Kosten für die Stromerzeugung vorgenommen. Dieser Ansatz ist in so fern gerechtfertigt, als die meisten Anlagenteile zur Produktion beider Produkte benötigt werden. Zudem hat die ausgewählte Anlage Heizkraftwerk mit Entnahme-Kondensationsturbine den Freiheitsgrad bezüglich der Strom- und Wärmeproduktion wählen zu können. Dabei geht aber mit steigender Wärmeabgabe die Menge an produzierbarem Strom gemäß Bild 77 fast proportional zurück, so dass eine gleichmäßige Kostenbelastung, wie hier vereinfacht angesetzt, gemacht werden kann.

Für die zugrundegelegte Wärmeauskopplung bei 6 bar gemäß Tabelle 34 lassen sich die Wärmekosten berechnen. Der Wirkungsgrad des Kraftwerks ändert sich über der ausgekoppelten Wärmemenge nur geringfügig. Die sich daraus ergebende Kostenänderung der Wärme kann vernachlässigt werden.

Tabelle 41 Aufteilung der Wärmekosten für Dampf aus dem Heizkraftwerk

| einzelne Kostenpositionen | Betrag | Bezug | Anteil | Anteil |
|---------------------------|--------------|----------------------------|--------|--------|
| Rendite / Gewinn | - | €/ MWh _{th} | | |
| Zins | 3,15 | €/ MWh _{th} | 19,5 % | |
| laufende Kosten Personal | 1,75 | €/ MWh _{th} | | |
| laufende Kosten, Ersatz | 1,80 | €/ MWh _{th} | 27,6 % | 69 % |
| Versicherung | 0,90 | €/ MWh _{th} | | |
| Abschreibung | 3,60 | €/ MWh _{th} | 22,3 % | |
| Brennstoff | 4,57 | €/ MWh _{th} | 30,6 % | 31 % |
| Entsorgung Asche | 0,36 | €/ MWh _{th} | | |
| Dampfkosten | 16,13 | €/ MWh_{th} | 100 % | 100 % |

Nach Tabelle 41 kostet Wärme in Form von Dampf aus dem betrachteten Kraftwerk in der Erzeugung über 16 €/MWh_{th}.

8.5 Wärmekosten in Abhängigkeit vom Dampfentnahmedruck

Bei vielen Dampfkraftwerken steht Dampf zwischen 3,5 – 10 bar ($\hat{=}$ 138 – 180 °C) für Wärmeanwendungen zur Verfügung. Bei der Kondensation des Dampfes können kompakte Wärmetauscher zum Einsatz kommen. Aufgrund der gasseitigen notwendigen Temperaturdifferenz zur Wärmeübertragung ergibt sich eine Temperatur auf der Gasseite von 130 – 170 °C.

Um eine kompakte Trocknungsanlage mit hoher Leistungsdichte bauen und den Trocknungsvorgang schnell und energieeffizient durchführen zu können, ist eine möglichst hohe Trocknungstemperatur wünschenswert. Einschränkungen für das Temperaturniveau kommen hier meist von der Produktseite. In den Versuchen mit Grüngut hat sich der Temperaturbereich von 130–170 °C als geeignet erwiesen.

Das Temperaturniveau der für die Trocknung zur Verfügung stehenden Wärme hängt vom Kraftwerkskonzept ab, das der Trocknung vorgeschaltet wird. Ist dies ein Dampfkraftprozess, so kann Dampf mit der gewünschten Temperatur der Turbine entnommen werden. Eine Temperatur über 200 °C bedeutet jedoch, dass nur ein geringes Enthalpiegefälle für die Erzeugung von Strom genutzt werden kann; damit ist die erzeugte elektrische Leistung gering und die spezifischen Kosten liegen entsprechend hoch. Für die Festlegung eines kostenoptimierten Systems ist letztendlich ein Kompromiss zwischen Investitionskosten und einer möglichst effizienten Nutzung der Hoch- und Niedertemperaturwärme zu finden.

In Bild 78 sind für das in Kapitel 8.4 betrachtete Heizkraftwerk mit spezifischen Investitionskosten von 2.740 €/kW_{el} die kostendeckenden Wärmegegestehungskosten über der Kondensationstemperatur des Heißdampfes dargestellt. Dabei wurde die Dampfentnahme vom Auslegungspunkt bei 6 bar nach oben und unten variiert. Der Anstieg der Dampfkosten von 16,13 €/MWh bei höherem Entnahmedruck aufgrund der reduzierten Stromproduktion und der Kostenabfall bei tieferem Druck ist zu erkennen. In dem für Trocknungsanwendungen interessanten Temperaturbereich von 138 – 180 °C liegen die Wärmekosten zwischen 14 – 18 € je MWh.

Zudem sind in Bild 78 die Dampfkosten dargestellt, berechnet aus dem Äquivalentspreis bei Stromerlösen von 0,087 €/kWh nach dem „Erneuerbare Energien Gesetz“ .

Kosten von Wärme aus Dampf über der Kondensationstemperatur

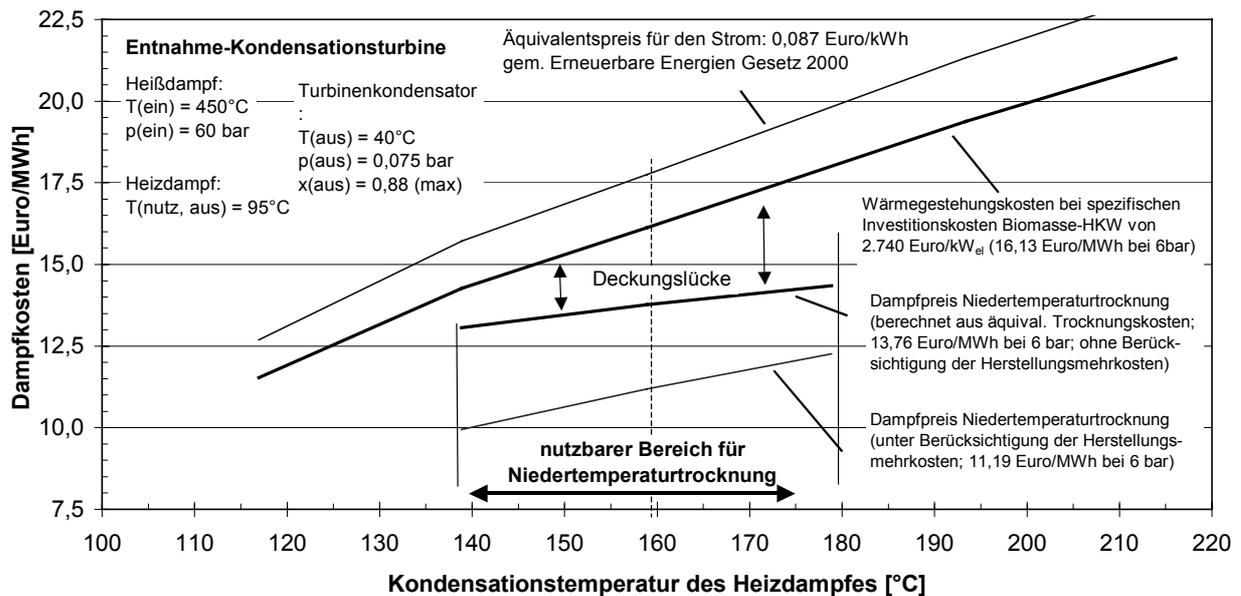


Bild 78 Wärmekosten bei Dampfauskopplung aus einer Entnahme-Kondensations-turbine für regenerative Stromerzeugung aus Biomasse

In Kapitel 7.4 wurde ausgeführt, dass ein Trocknungswerk nur bereit sein wird zu gleichen Kosten wie bei der herkömmlichen Heißgastrocknung zu produzieren. Die hierfür bezahlbaren Dampfpreise aus Tabelle 30 (z.B. 13,76 €/MWh bei 6 bar) sind in Bild 78 eingetragen. Zudem wurden unter Einbeziehung der Herstellungsmehrkosten reduzierte Dampfpreise in Tabelle 32 (z.B. 11,19 €/MWh bei 6 bar) berechnet und dargestellt. In diesen Preisen sind die unterschiedlichen Größen und entsprechend die Herstellungskosten der Trocknungsanlage je nach Kondensationstemperatur berücksichtigt.

Zum wirtschaftlichen Betrieb beider Produktionseinheiten besteht eine Deckungslücke, die sich durch geringere Herstellungskosten auf Seiten des Kraftwerks und der Niedertemperaturtrocknungsanlage schließen lässt. Während sich beim Kraftwerk niedrigere Herstellungskosten am ehesten durch größere Leistungseinheiten erreichen lassen, sind bei der Trocknungsanlage in der fertigungstechnischen Ausführung und durch höhere Stückzahlen Kostensenkungspotentiale vorhanden.

8.6 Verbundsystem Heizkraftwerk - Niedertemperaturtrockner

Im Kapitel 7 wurden für einen Niedertemperaturtrockner die Herstellungskosten und die laufenden Betriebskosten berechnet. Man kann davon ausgehen, dass ein Trocknungswerk nur dann auf Niedertemperaturwärme umstellen wird, wenn das neue Trocknungssystem nicht zu einer Verteuerung der Produktionskosten führt bzw. andere substantielle Nachteile aufweist. Daher wurde mit den aus den Optimierungsüberlegungen berechneten Energiewerten ein Vergleich mit der herkömmlichen Grüngutttrocknung gemacht. Die Berechnungen zeigen, dass der Strombedarf eines optimierten dampfbeheizten Umlufttrockners geringfügig höher ist, der Wärmebedarf dafür aber unter dem Bedarf der herkömmlichen Heißlufttrocknung liegt. Als Ergebnis wurde ein äquivalenter Dampfpreis von 13,76 €/MWh berechnet, bei dem es zu keiner Verteuerung der Energiekosten käme (Tabelle 30). Dabei wurde der Brennstoff Erdgas mit einem Preis von 13,16 € pro MWh (unterer Heizwert) für den Untersuchungszeitraum 1998-1999 angesetzt.

Für das betrachtete Heizkraftwerk mit 37 MW Feuerungswärmeleistung errechnet sich bei spezifischen Investitionskosten von 2.740 €/kW_{el} ein kostendeckender Dampfpreis von 16,13 €/MWh, obwohl die reinen Wärmekosten aus dem Brennstoff und der Ascheentsorgung nur bei 4,93 €/MWh liegen (Tabelle 41). Um Dampf aus einem HKW zu einem Preis von 13,76 €/MWh abgeben zu können, dürften die spezifischen Herstellungskosten nur 2.055 €/kW_{el} betragen.

Niedertemperaturtrocknungssysteme sind in der Herstellung teurer als direktbeheizte Trommeltrockner. Bezieht man in die Dampfkosten die Mehrkosten für einen Bandtrockner über eine annuitätische Rechnung mit ein, ergibt sich ein reduzierter Dampfpreis von 11,19 €/MWh (Tabelle 32). Dieser Preis kann als ein Minimalpreis betrachtet werden, da Kostenreduktionen bei der Herstellung des Niedertemperaturbandtrockners möglich sein sollten. Es würde spezifische Investitionskosten unter 1.455 €/kW_{el} erfordern, um Dampf zu diesem Minimalpreis mit einem HKW erzeugen zu können. Dabei wurden andere Kostensenkungspotentiale wie Betriebsstunden, Personaleinsatz, etc. unberücksichtigt gelassen.

Die Kostenaufschlüsselung in Tabelle 41 zeigt, dass für das Heizkraftwerk mit Biomasse die Erzeugungskosten des Heizdampfes zu 69 % von den Anlagenkosten in Form der Abschreibung (22,3 %) und den Folgekosten an Zins (19,5 %) und laufenden Kosten (27,6 %) bestimmt werden. Dampf ist daher, auch noch als Niederdruckdampf, ein teures Heizmedium, das nur dann Verwendung finden wird, wenn dies vom Trocknungsgut her erforderlich ist. Für Trocknungsanwendungen ist hierbei an den gesamten Bereich der Lebensmittelkonservierung wie Kartoffel-, Gemüse- oder auch Tee- und Kräutertrocknung zu denken.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, das System eines Heizkraftwerks als Strom- und Wärmeerzeuger gekoppelt mit einer Trocknungsanlage als Wärmeverbraucher zu untersuchen. Zur Energieerzeugung wurde ein Dampfkraftprozess betrachtet, bei dem über den Einsatz einer Entnahme-Kondensationsdampfturbine eine variable Stromkennzahl ($\sigma \approx 0,2-0,4$) realisierbar ist. Dabei stellt die Wärmebereitstellung aus einem Heizkraftwerk in Form von Dampf eine bekannte und übliche Technik dar.

Im Hinblick auf eine optimale, wirtschaftliche und umweltschonende Energienutzung, liegt es nahe, den großen Bedarf an Prozesswärme für eine landwirtschaftliche Trocknungsanlage aus einem Heizkraftwerk auszukoppeln und das bisher vorherrschende Heißlufttrocknungsverfahren durch eine Niedertemperaturtrocknung zu ersetzen. Da für Grüngut und andere feuchte Biomassen Trocknungssysteme mit Niedertemperatur bisher nicht erprobt sind, wurde in dieser Arbeit untersucht, unter welchen Voraussetzungen ein solches System eingesetzt werden kann.

Eine Energiebedarfsanalyse von bestehenden Trocknungsanlagen mit direkt-befeuerten Trommeltrocknern zeigt, dass die Lieferung von Trocknungswärme aus einem Heizkraftwerk interessant und gut möglich ist, da die Trocknung von Grüngut in den Sommermonaten in einen Zeitraum fällt, bei dem tendenziell in einem Kraftwerk eine geringe Auslastung in der Stromproduktion besteht.

Zur Optimierung des Energieverbrauchs und Berechnung der Wirtschaftlichkeit einer Niedertemperaturanlage wurde ein Rechenprogramm erstellt. Die dafür notwendigen Werte, wie die Trocknungszeit, die mögliche Wasserbeladung und der Strömungsenergieaufwand lagen in der Literatur nicht vor. Um diese Daten zu gewinnen, wurden eigene experimentelle Untersuchungen an einem Satzrockner im Temperaturbereich von 60 bis 140 °C durchgeführt.

Aufgrund der Anforderungen an eine kontinuierlich arbeitende Anlage für das Trocknungsprodukt Grüngut mit dem Einsatz von Dampf als Heizenergie stellte sich bei einem Vergleich der bekannten möglichen Trocknungssysteme der über einen Wärmeübertrager indirekt-beheizte Bandrockner als am besten geeignete heraus. Allerdings wäre auch bei diesem Trocknungssystem eine möglichst hohe Heiztemperatur wünschenswert, um eine kompakte Anlage verwirklichen zu können. Eine hohe Trocknungstemperatur kann jedoch bei einem Bandrockner durch eine vergrößerte Trocknungsfläche, längere Verweilzeit und höhere Trocknungsluftmenge ausgeglichen werden.

Die Modellrechnungen ergaben, dass bei Eintrittstemperaturen des Trocknungsgases unter 60 °C der Bandrockner als einfacher Durchluftrockner ausgeführt werden könnte; allerdings wären dann der Dampfbedarf für die Aufwärmung der Trocknungsluft und durch die hohen Trocknungsgasmengen

auch der elektrische Energiebedarf für die Gebläse hoch. Im Umluftverfahren mit höheren Eintrittstemperaturen wurden Energieeinsparungen errechnet, wobei sich bei 6 bar-Heizdampf ($T_S = 159 \text{ °C}$) für eine Umluftzahl von 14 ein energetisches Optimum ergibt. Für einen solchen energieoptimierten Trockner liegt der berechnete spezifische Wärmebedarf bei $755 \text{ Wh}_{\text{th}}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$, zuzüglich der sonstigen Verluste eines realen Systems und ist damit etwas niedriger als bei der herkömmlichen Heißlufttrocknung (Bild 52). Der ermittelte Strombedarf von $22,6 \text{ Wh}_{\text{el}}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ eines optimierten Umlufttrockners ist hingegen geringfügig höher.

Unter der Annahme, dass die Betreiber eines bestehenden Trocknungswerks nur dann auf Niedertemperaturwärme umstellen, wenn es zu keiner Verteuerung der Energiekosten kommt, lässt sich ein äquivalenter Dampfpreis berechnen. Dieser Wärmepreis würde unter Zugrundelegung des optimierten Systems für den Betrachtungszeitraum von 1998-1999 bei $13,76 \text{ €/MWh}_{\text{th}}$ liegen (Tabelle 30).

Mit den Erkenntnissen zum Verfahrensablauf der Grünguttrocknung, den eigenen Versuchen und den dazu angestellten Berechnungen wurden Herstellungskosten für eine Bandtrocknungsanlage mit 15 t/h Wasserverdampfung ermittelt. Für einen Trockner mit Heizdampf von 6 bar liegen die spezifischen Herstellungskosten bei $163.000 \text{ € pro t/h Wasserverdampfungsleistung}$. Damit sind die Investitionskosten doppelt so hoch wie bei einer herkömmlichen direkt-befeuerten Trommeltrocknungsanlage.

Um den Systemverbund untersuchen zu können, wurde ein Wärmeanschluss an ein Dampfkraftwerk mit 37 MW Feuerungswärmeleistung zugrundegelegt. Folgende Überlegungen sprechen für den Systemverbund von einer Grünguttrocknungsanlage mit einem Heizkraftwerk:

- In Trocknungsanlagen für wasserreiche Produkte werden große Mengen an Trocknungswärme benötigt. Der Leistungsbedarf einer Trocknungsanlage mit einer Wasserverdampfung von ungefähr 15 t/h liegt je nach Trocknungssystem in der Größenordnung von $11,3 - 13,5 \text{ MW}_{\text{th}}$. Damit ist ein Wärmeanschluss an ein Kraftwerk mit 37 MW Feuerungswärmeleistung gut möglich.
- Durch die Wärmeauskopplung würde der Brennstoffnutzungsgrad des Heizkraftwerkes von 30 % bei reiner Stromproduktion auf über 68 % bei voller Wärmeauskopplung steigen (Bild 77).
- Wärme benötigt ein Trocknungswerk für Grüngut ausschließlich in den Sommermonaten, in denen der Pflanzenaufwuchs stattfindet. Andererseits ist der Strombedarf im Verbundnetz im Winter höher als im Sommer, so dass eine Energieeinspeisung im Winter hochwertiger als im Sommer ist. Diese jahreszeitlich antizyklische Bedarfsituation ermöglicht hohe Volllastbetriebsstunden des Heizkraftwerks.
- In Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass die Trocknung von Grüngut mit Niedertemperatur zu einer hervorragenden Produktqualität führt, wobei

allerdings die Gleichmäßigkeit der Durchtrocknung eine erhöhte Anforderung an die Anlage und deren Regelung erfordert.

- Systembedingt sind die Emissionen bei einer Niedertemperaturtrocknung, die Verbrennungsschadstoffe und den emittierten Staub betreffend, niedriger als bei einer Heißlufttrocknung. Nimmt man an, dass der Dampf aus einem als weitgehend CO₂-neutral gewerteten Brennstoff Holz aus einem Biomasse-HKW entnommen wird, sind die CO₂-Emissionen der Trocknungsanlage mit nur 40 g_{CO2}/kg_{H2O} um den Faktor 4 niedriger als bei den besten herkömmlichen Trocknungssystemen (Tabelle 38). Nachzuweisen bleibt, ob auch die trockenungsspezifischen Emissionen, wie die Aldehydemissionen, geringer ausfallen. Auch bei den durchgeführten Versuchen mit dem Bandtrockner wurden die typischen Geruchsemissionen nach frischem Heu festgestellt.

Eine Abschätzung des kostendeckenden Erzeugungspreises pro MWh Dampf aus dem betrachteten Heizkraftwerk zeigt, dass dieser zu 31 % dem Brennstoff zuzurechnen ist, während 69 % der Kosten aus der Abschreibung, den Kapitalkosten und den laufenden Betriebskosten herrühren (Tabelle 41). Für den zugrundegelegten Fall eines Heizkraftwerks mit 37 MW Feuerungswärmeleistung ergeben sich Dampfgestehungskosten von mindestens 16 €/MWh.

Dies zeigt, dass Dampf - auch als Niederdruckdampf - noch ein teures Heizmedium ist. Der Einsatz von Dampf zur Beheizung ist daher nur bei solchen Wärmeverbrauchern wirtschaftlich sinnvoll, die vom System her eine indirekte Beheizung benötigen und damit eine Bereitschaft seitens des Nutzers besteht, den höheren Erzeugungspreis für den Dampf zu bezahlen. Im Bereich der Trocknung sind hier viele Anwendungen aus dem Lebens- und Nahrungsmittelbereich denkbar, wobei die benötigten Wärmemengen bei solchen Anwendungen meist niedriger als bei der Grünfuttertrocknung sind.

So bleibt festzustellen, dass bei der Trocknung von Grüngut ein mit Dampf beheizter energieoptimierter Niedertemperaturtrockner zwar deutliche ökologische Vorteile in Bezug auf Schadstoffe, CO₂-Emissionen und Brennstoffnutzungsgrad aufweist, aber mit der einfachen direkt-befeuerten Heißlufttrocknung auf rein wirtschaftlicher Basis nicht konkurrieren kann.

10 Literaturverzeichnis

- /1/ Baehr H. D., Stephan K.: Wärme- und Stoffübertragung, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- /2/ Bäurle, J.: Persönliche Mitteilung Hr. Bäurle Geschäftsführer FT Altenstadt, Schongau-Altenstadt, 1994.
- /3/ Brunauer, S., Emmett, B. H., Teller, E.: Adsorption of Gases in Multimolecular Layers, Journal American Chemical Society 60, S. 309-319, 1938.
- /4/ Dietl, Ch.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Trocknungsverhalten kapillarporöser, hygroskopischer Stoffe, Diss. TUM, München, 1994.
- /5/ Deutsche Norm: DIN 1871, Gasförmige Brennstoffe und sonstige Gase, Dichte und andere volumetrische Größen, Mai 1999.
- /6/ Deutsche Norm: DIN 51857, Berechnung von Brennwert, Heizwert, Dichte, relativer Dichte und Wobbeindex von Gasen und Gasgemischen, März 1997.
- /7/ Deutsche Norm: ISO 2533, Normatmosphäre, Dezember 1979.
- /8/ Evripidis, I.: Trocknen im Trommeltrockner, Kombinierte Kontakt- und Konvektionstrocknung in einem Trommeltrockner, 241, Düsseldorf, 1991.
- /9/ Finger, G.: Möglichkeit des Einsatzes von Gasmotoren und Gasturbinen bei der Futtermitteltrocknung, Diplomarbeit, Fachhochschule Aachen, Februar 1997.
- /10/ Grassmann, P.: Einführung in die thermische Verfahrenstechnik, Verlag Walter de Gruyter & Co., Berlin, 1967.
- /11/ Hass, J., Lucius, H.: Optimierung von Trocknungsprozessen, Firmenprospekt rotronic ag, November 1997.
- /12/ Hausbrand, E.: Das Trocknen mit Luft und Dampf, Erklärungen, Formeln und Tabellen für den praktischen Gebrauch, Verlag von Justus Springer, Berlin, 1898.
- /13/ Hausbrand, E.: Das Trocknen mit Luft und Dampf, Erklärungen, Formeln und Tabellen für den praktischen Gebrauch, Verlag von Justus Springer, 4. Auflage, Berlin, 1911.
- /14/ Heiss, R., Eichner K.: Haltbarmachen von Lebensmitteln, Berlin, 1990.
- /15/ Henderson, S. M.: A Basis Concept of Equilibrium Moisture, Agricultural Engineering 33, S. 29, 1952.
- /16/ Kneule, F.: Das Trocknen, Grundlagen der Chemischen Technik, Band 6, Verlag H. R. Sauerländer & Co., Aarau und Frankfurt am Main, 1959.
- /17/ Kunze, R.: Lexikon der Landtechnik, Würzburg, 1986.
- /18/ Krischer, O., Kast, W.: Trocknungstechnik, Erster Band, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Springer Verlag, Berlin, 1992.
- /19/ Krischer, O., Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Springer Verlag, Berlin, 1978.
- /20/ Krischer, O., Kröll, K.: Trocknungstechnik, Band 1, Berlin, 1963.
- /21/ Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik, Harri Deutsch Verlag, Thun und Frankfurt/Main, 1989.
- /22/ Küntzel, U.: Heißlufttrocknung von Grünfütter, Braunschweig, 1976.
- /23/ Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft: Heißlufttrocknung von Grünfütter, KTBL 176, Münster-Hiltrup, 1974.

- /24/ Landeskuratorium für pflanzliche Erzeugung in Bayern e.V.: Aus der Arbeit des LKP und der Erzeugerringe, München, Jahrgänge 1988 bis 2000.
- /25/ Langmuir, I.: The Adsorption of Gases on plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum, Journal American Chemical Society 46, S. 1346, 1918.
- /26/ Lykow, A.W.; Experimentelle und theoretische Grundlagen der Trocknungstechnik, VRB Verlag Technik, Berlin, 1955.
- /27/ Maltry, W., Pötke, E., Schneider, B.: Landwirtschaftliche Trocknungstechnik, Berlin, 1975.
- /28/ Maltry, W.: Einige Untersuchungen zur Aufklärung des Verhaltens von Getreide im Dächer-Schachttrockner, Arch. f. Landtechnik 5, H. 3, S. 223-264, 1966.
- /29/ Mayer, J.: Heißlufttrocknung von Grünfutter (Schulungsunterlagen), Grub, 1990.
- /30/ Mersmann, A.: Thermische Verfahrenstechnik, Springer Verlag, Berlin, 1980.
- /31/ Mintzlaff, J.: Trocknungsmechanismen bei Dispersionslacken, Fortschrittsberichte VDI Reihe 3, Nr. 614.
- /32/ Netz, H.: Wärme und Dampf, Industriekessel Handbuch, Deutsche Babcock, Verlag Dr. Ingo Resch, 4. Auflage, München.
- /33/ Nordenskjöld (von), R.: Konvektive Trocknung des Einzelteils einiger botanischer Produkte, Diss. TUM, München, 1975.
- /34/ Opdenwinkel, H.: Über die Ermittlung der Bindungsenthalpie aus den Desorptionsisothermen einer rheinischen Braunkohle im Bereich höherer Temperaturen, Dissertation, Aachen, 1983.
- /35/ Pabis, St.: Der Trocknungsprozeß in Trommeltrocknern (Original in Polnisch), Zeszyt 63, in /27/ S. 312, Warschau, 1966.
- /36/ Rammler, E., Glöckner, E.: Mathematische Auswertung von Dampfdruckisothermen für Braunkohle, Freiburger Forschungshefte A 40, S. 43-52, Akademie-Verlag, Berlin, 1955.
- /37/ Rosin, P., Rammler, E. und Kayser, H.-G.: Über Dampfdruckisothermen und Porositätskennlinien von Kohlen; Braunkohle 33, S. 289-294, S. 305-314, 1934.
- /38/ Rotronic: Feuchte- und Temperaturmessung, Firmenkatalog rotronic ag, 1997/98.
- /39/ Scheidhauf, R.: Systemanalyse der energetischen Nutzung von Biomasse, Dissertation, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 6 Energietechnik, Nr. 404., München.
- /40/ Schlünder, E. U.: Einführung in die Wärme- und Stoffübertragung, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1972.
- /41/ Schneider, A.: Untersuchung über das charakteristische Trocknungsverhalten von Luzerne und Zuckerrübenblatt in Einzelschichten und durchströmten Schüttungen, Dissertation, Fakultät Maschinenwesen und Elektrotechnik der TU-München.
- /42/ Schwarz, F.: persönliche Mitteilung Prof. Dr. agr. Schwarz, Weihenstephan, 1995.
- /43/ Strehler, A.: Grünfuttertrocknung, Endbericht der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik und dem Institut für Landtechnik der TU München-Freising im Auftrag des Bay. Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München, August 1979.
- /44/ VDI-Richtlinien, Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3922, Energieberatung für Industrie und Gewerbe, Juni 1998.
- /45/ VDI-Richtlinien, Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3986, Ermittlung des Wirkungsgrades von konventionellen Kraftwerken, Oktober 2000.

- /46/ VDI-Richtlinien, Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4660 Blatt 1, Umrechnung spezifischer Emissionen bei der Energieumwandlung, April 2000.
- /47/ VDI-Richtlinien, Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4660 Blatt 2 Entwurf, Ermittlung zielenergiebezogener Emissionen bei der Energieumwandlung, September 2000.
- /48/ VDI-Richtlinien, Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4670 Entwurf Blatt 1, Thermodynamische Stoffwerte von feuchter Luft und Verbrennungsgasen, Oktober 2000.
- /49/ Winkler, B.: Feuchtigkeitsgleichgewicht von Luzerne und Wiesengras, Landt. Forsch. 4 Heft 2, S. 59-61, in /27/, 1954.
- /50/ Zimmer, E.: Futterwerbung und Futterkonservierung,
in: Voitländer G., Jacob H.: Grünlandwirtschaft und Futterbau, Stuttgart, 1987.

11 Anhang

11.1 Stoffwerte einiger Brennstoffe und Luft

nach /5/, /6/, /7/, /32/, /47/ und /48/

Tabelle 42 Stoffwerte einiger ausgewählter fester und flüssiger Brennstoffe

| feste und flüssige Brennstoffe waf (wasser- und aschefrei) | unterer Heizwert | Kohlen- stoffgehalt | Brennstoff- energiebezog. Emissionen | spezif. Wärme- kapazität | Dichte (NORM) |
|---|---------------------|------------------------|--|--------------------------------|-----------------------|
| | H_u | γ_C | ϵ_{be,CO_2} | c_p | ρ |
| | | | | (0°C) | (0°C, 1013 hPa) |
| Einheit | [MJ/kg] | [kg/kg] | [t/MWh] | [kJ/kg/K] | [kg/Nm ³] |
| Gaskohle / Fettkohle | 34,1 | 0,855 | 0,33 | ~ 1,15 | 1,2 ... 1,4 |
| Flammkohle | 33,2 | 0,859 | 0,333 | ~ 1,15 | 1,2 ... 1,4 |
| Braunkohle, Rheinland | 22,7 | 0,687 | 0,399 | ~1,5 ... 2 | 1,2 ... 1,4 |
| Braunkohle, Lausitz | 22,3 | 0,672 | 0,398 | ~1,5 ... 2 | 1,2 ... 1,4 |
| Braunkohlebrikett | 25,3-26,5 | 0,69-0,73 | 0,36 | ~2 ...2,5 | 1,2 ... 1,4 |
| Heizöl S | 40,2 | 0,84 | 0,276 | | |
| Heizöl EL, Benzin | 42,6 | 0,86 | 0,267 | | |
| Holz, trocken | 16,7 | | | ~1,5 ...2,5 | 0,4 ... 0,8 |
| Holzkohle | 31,0 | | | 0,8 ... 1 | |
| n-Butan (Flüssiggas), flüssig | 45,7 | | | 2,28 | 601 |

Tabelle 43 Stoffwerte einiger ausgewählter gasförmiger Brennstoffe

| gasförmige Brennstoffe | unterer Heizwert | Kohlen- stoffgehalt | Brennstoff- energiebezog. Emissionen | spezif. Wärme- kapazität | Dichte (NORM) | Dichte |
|--|----------------------|------------------------|--|--------------------------------|-----------------------|----------------------|
| | H_u | γ_C | ϵ_{be,CO_2} | c_p | ρ | ρ |
| | | | | (0°C) | (0°C, 1013 hPa) | (20°C, 1013 hPa) |
| Einheit | [MJ/m ³] | [kg/kg] | [t/MWh] | [kJ/kg/K] | [kg/Nm ³] | [kg/m ³] |
| H-Erdgas (GUS) | 35,9 | 0,538 | 0,198 | 2,2 | 0,73 | 0,70 |
| L-Erdgas (Verbund) | 33,4 | 0,515 | 0,203 | 2,2 | 0,83 | 0,77 |
| n-Butan (Flüssiggas) (Verd.-wärme =-386kJ/kg) gasf. | 117,35 | | | 1,6 | 2,59 | 2,42 |
| Wasserstoff, gasförmig | 10,8 | 0 | 0 | 14,32 | | |
| Kohlenmonoxid, gasförmig | 12,6 | | | 1,042 | 1,25 | |
| Propangas | 93,4 | | | 1,595 | | |

Tabelle 44 spezifische Gaskonstante und molare Massen wichtiger Gaskomponenten und Zusammensetzung der trockenen Umgebungsluft

| Substanz | | spezifische Gaskonstante R | Molmasse M | Volumenanteil | Gewichtsanteil |
|------------------|------------------|------------------------------|--------------|---------------|----------------|
| | | [J/kg/K] | in [kg/kmol] | [V-%] | [G-%] |
| Stickstoff +Rest | N ₂ | 296,80 | 28,013 | 78,09 | 75,53 |
| Argon | Ar | 208,13 | 39,948 | 0,93 | 1,29 |
| Neon | Ne | 412,02 | 20,180 | 0,002 | 0,002 |
| Kohlendioxid | CO ₂ | 188,92 | 44,010 | 0,03 | 0,05 |
| Sauerstoff | O ₂ | 259,84 | 31,999 | 20,95 | 23,14 |
| trockene Luft | tr.L | 287 | 28,97 | 100,00 | 100,00 |
| | | | | | |
| Wasser | H ₂ O | 461,52 | 18,015 | - | - |
| Kohlenmonoxid | CO | 296,84 | 28,010 | - | - |
| Schwefeldioxid | SO ₂ | 129,78 | 64,065 | - | - |
| Stickoxid | NO | | 30,006 | - | - |
| Stickstoffdioxid | NO ₂ | | 46,006 | | |

11.2 Berechnungsbeispiele zu Trocknungsanlagen

Berechnungsbeispiel einfacher Durchlufttrockner,

spezifischer Wärmebedarf q_{Verd}

$$T_{aus} = 50 \text{ °C}, T_{FG} = 20 \text{ °C}, \Delta x_{Verd} = 0,036 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \text{ und } \tilde{c}_{p, \text{Gas}} (\text{tr. Luft bei } 100 \text{ °C}) \approx 1,006 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\text{mit (51)} \quad \Delta q_{Verd} = 2502 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 50 \text{ °C} - 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 20 \text{ °C} = 2511 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{H}_2\text{O})$$

$$\text{mit (63)} \quad q_{verl}^{Gas} = 1,006 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * (50 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) / 0,036 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} = 837 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{H}_2\text{O})$$

$$\text{und mit (65)} \quad q_{Verd} = 2511 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{H}_2\text{O}) + 837 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{H}_2\text{O}) = 3348 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{H}_2\text{O})$$

Tabelle 45 spezifischer Wärmebedarf^(*) q_{Verd} für verschiedene Trocknungsprozesse

| Nr. | Art des Trocknungsprozesses | Art der Heizung | T_{ein} [°C] | T_{aus} [°C] | T_{Gut} [°C] | T_{zu} [°C] | Δq_{Verd} [kJ/kg] H ₂ O | Δx_{Verd} [g/kg] ges. | q_{verl} [kJ/kg] H ₂ O | q_{Verd} [kJ/kg] H ₂ O | q_{Verd} [Wh _{th} /kg] H ₂ O |
|-----|---------------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|--|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 1 | einfache Heißlufttrocknung | direkt | 920 | 119 | 16 | 20 | 2639 | 328 | 316 | 2955 | 821 |
| 2 | einfache Heißlufttrocknung | direkt | 520 | 105 | 16 | 20 | 2614 | 167 | 539 | 3153 | 876 |
| 3 | Heißgastrocknung mit Brüden | direkt | 520 | 128 | 16 | 20 | 2655 | 566 | 198 | 2853 | 793 |
| 4 | Heißgastrocknung mit Brüden | direkt | 520 | 119 | 16 | 20 | 2639 | 338 | 305 | 2944 | 818 |
| 5 | Heißgastrocknung mit Brüden | direkt | 520 | 114 | 16 | 20 | 2630 | 261 | 377 | 3007 | 835 |
| 6 | einfacher Durchlufttrockner | indirekt | 145 | 51 | 16 | 20 | 2513 | 38 | 928 | 3441 | 956 |
| 7 | Umlufttrockner-Niedertemperatur | indirekt | 145 | 69 | 16 | 20 | 2547 | 105 | 509 | 3056 | 849 |
| 8 | Umlufttrockner-Niedertemperatur | indirekt | 145 | 84 | 16 | 20 | 2574 | 231 | 295 | 2869 | 797 |
| 9 | Umlufttrockner-Niedertemperatur | indirekt | 145 | 96 | 16 | 20 | 2596 | 471 | 170 | 2766 | 768 |
| 10 | Umluft-Heißgastrocknung | indirekt | 500 | 128 | 16 | 20 | 2657 | 2057 | 55 | 2712 | 753 |

(*) der tatsächliche Verbrauch liegt wegen der sonstigen Verluste ca. um 2 – 3 % höher

Berechnungsbeispiel einfacher Durchlufttrockner,

Wasseraustrag Δx_{Verd} und Wasserbeladung x_{aus}

$$T_{ein} = 140 \text{ °C}, T_{aus} = 50 \text{ °C}, T_{Gut} = 20 \text{ °C}, T_{zu} = 20 \text{ °C} \text{ und } \tilde{c}_{p, \text{Gas}} (\text{tr. Luft bei } 100 \text{ °C}) \approx 1,006 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\text{mit (45)} \quad \Delta q_{Gas}(Tk) = 1,006 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * (150 \text{ °C} - 50 \text{ °C}) = 91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{Gas})$$

$$\text{mit (51)} \quad \Delta q_{Verd} = 2502 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 50 \text{ °C} - 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 20 \text{ °C} = 2511 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{H}_2\text{O})$$

$$\text{und mit (57)} \quad \Delta x_{Verd} = 91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{Gas}) / 2511 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{H}_2\text{O}) = 36 \frac{\text{g}}{\text{kg}} (\text{H}_2\text{O}/\text{Gas})$$

Tabelle 46 Wasseraustrag Δx_{Verd} und Abgaswasserbeladung x_{aus} für Trocknungsprozesse

| Nr. | Art des Trocknungsprozesses | Art der Heizung | $c_{p, \text{Gas}}$ [kJ/K/kg] | Brüden Bezug Ges.strom | p_{aus} [bar] Abgas | φ [%-rel.F] Abgas | $q(Tk)$ [kJ/kg] tr.Gas | Δq_{Verd} [kJ/kg] H ₂ O | Δx_{ein} [g/kg] tr.Gas | Δx_{Verd} [g/kg] tr.Gas | Δx_{aus} [g/kg] tr.Gas |
|-----|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|--|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1 | einfache Heißlufttrocknung | direkt | 1,08 | 0% | 0,38 | 20% | 865 | 2639 | 58 | 328 | 386 |
| 2 | einfache Heißlufttrocknung | direkt | 1,05 | 0% | 0,24 | 20% | 435 | 2614 | 34 | 167 | 201 |
| 3 | Heißgastrocknung mit Brüden | direkt | 1,18 | 50% | 0,50 | 20% | 463 | 2655 | 57 | 174 | 624 |
| 4 | Heißgastrocknung mit Brüden | direkt | 1,15 | 29% | 0,38 | 20% | 461 | 2639 | 44 | 175 | 382 |
| 5 | Heißgastrocknung mit Brüden | direkt | 1,08 | 17% | 0,33 | 20% | 439 | 2630 | 39 | 167 | 300 |
| 6 | einfacher Durchlufttrockner | indirekt | 1,01 | 0% | 0,06 | 50% | 95 | 2513 | 5 | 38 | 43 |
| 7 | Umlufttrockner-Niedertemperatur | indirekt | 1,06 | 67% | 0,15 | 50% | 80 | 2547 | 5 | 32 | 110 |
| 8 | Umlufttrockner-Niedertemperatur | indirekt | 1,12 | 86% | 0,27 | 50% | 69 | 2574 | 5 | 27 | 236 |
| 9 | Umlufttrockner-Niedertemperatur | indirekt | 1,20 | 93% | 0,43 | 50% | 59 | 2596 | 5 | 23 | 476 |
| 10 | Umluft-Heißgastrocknung | indirekt | 1,20 | 75% | 0,77 | 30% | 446 | 2657 | 5 | 168 | 2062 |

11.3 Zuordnungsübersicht Produkt / Trockner

Eine grobe Übersicht zu den gebräuchlichsten Trocknungssystemen in den einzelnen Industriezweigen zeigt Tabelle 47. Eine detaillierte Zuordnungstabelle von Trocknungsprodukten zu Trocknersystemen findet sich in Tabelle 48.

Tabelle 47 Übersicht zu den gebräuchlichsten Trocknungssystemen in den einzelnen Industriezweigen

| Trocknungs- gut | Wirbel- schicht- trockner | Strom- trockner | Trommel- trockner | Band- trockner | Vibra- tions- trockner | Walzen- trockner | Wurf- schaufel- trockner | Sprüh- trockner |
|----------------------------|---------------------------------|--------------------|----------------------|-------------------|------------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------|
| Agrar | X | X | X | | X | | | X |
| Baustoffe | | | X | | X | | | |
| Chemie | X | X | X | X | X | | X | X |
| Keramik | X | | X | X | | | | X |
| Lebensmittel | X | X | X | X | | X | | X |
| Pharmazie | X | | | X | | | | X |
| Recycling | X | | X | X | | | X | |
| Textil | | | | X | | | | |

Quelle u.a. ,/11/

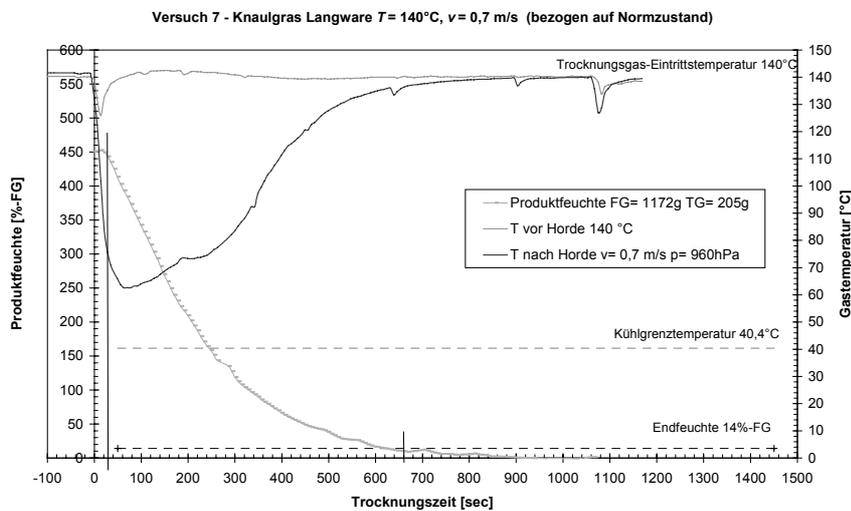
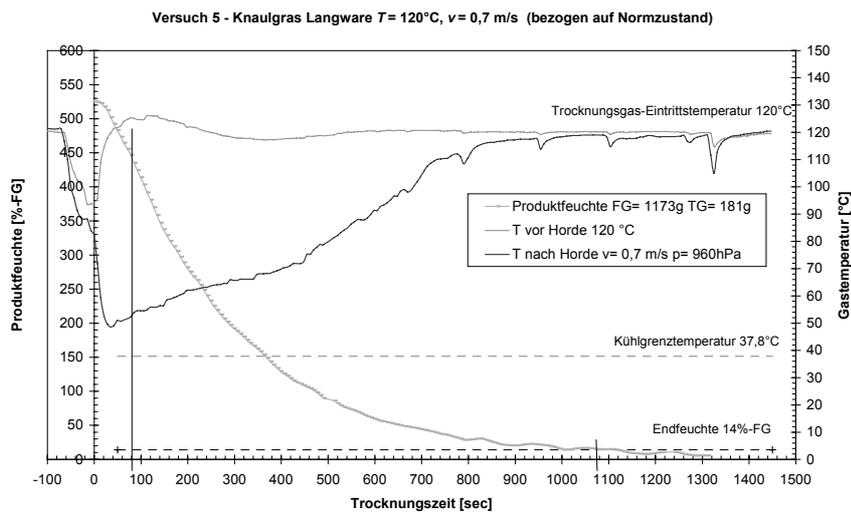
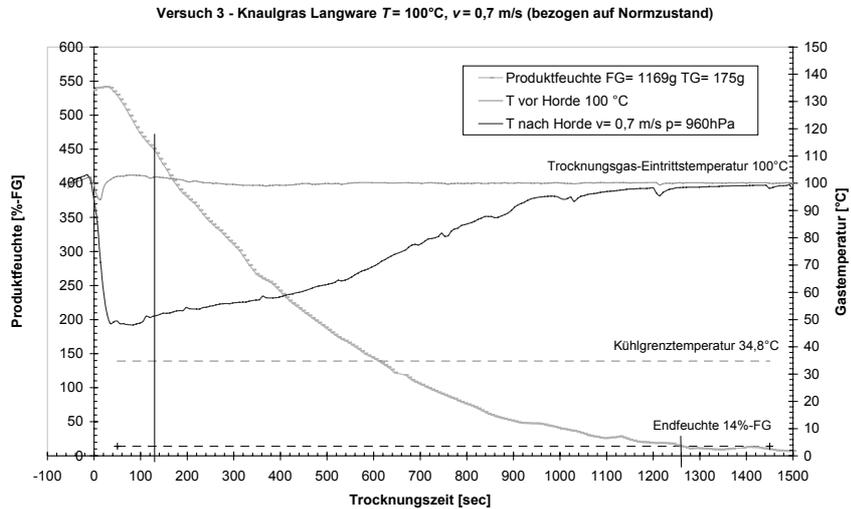
Tabelle 48 Zuordnung von Trocknungsprodukten zu Trocknersystemen

| Trocknungsgut | Wirbel- schicht- trockner | Strom- trockner | Trom- mel- trockner | Band- trockner | Vibra- tions- trockner | Walzen- trockner | Wurf- schaufel- trockner | Sprüh- trockner |
|------------------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------|-------------------|------------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------|
| Babynahrung | | | | | | X | | |
| Backpulver | | | | | | | | X |
| Chemikalien | | | X | X | | | | |
| Düngemittel | X | X | | | | | | X |
| Eigelb, Eiweiß | | | | | | | | X |
| Farbpigmente | | | | | | | | X |
| Filterkuchen | | X | | | | | | |
| Ceralien | | | | X | | | | |
| Futtermittel | | | | X | X | | | |
| Gelatine | | | | X | | | | X |
| Getreideflocken | | | | | | X | | |
| Gips | | X | | | | | | |
| Granulate | | | | | | | X | X |
| Grünfutter | | | X | X | | | | |
| Halbtrockene Pulver | | | | | | | X | |
| Hefe | X | | | | | | | X |
| Instant Produkte | X | | | | | | | X |
| Kartoffelgranulat | | X | | | | | | |
| Katalysatoren | X | | | | | | | |
| Keramische Baustoffe | | | X | | | | | |
| Keramische Massen | | | | X | | | | |
| Kies | | | | | X | | | |
| Körnige Güter | | | | | | | X | |
| Kristalline Produkte | | | | | X | | X | |
| Kunststoffe | | X | | X | | | | |
| Lebensmittel | | | | X | | | | |
| Milchpulver, Molke | X | | | | | | | X |
| Non-Woven-Artikel | | | | X | | | | |
| Pestizide, Pflanzenschutzmittel | | | | X | | | | X |
| Pigmente | | | | X | | | | |
| Polymergranulate | | | X | | | | | |
| Pulver | | | | | | | | X |
| Rübenschnitzel | | | X | | | | | |
| Saatgut | X | | | | | | | |
| Salze | X | | X | | | | | |
| Sand | X | | X | | X | | | |
| Schlämme | X | X | X | X | | | | |
| Stärke | | X | | | | X | | |
| Synthetische Fasern | | | | X | | | | |
| Tabak | | | | X | | | | |
| Zucker | | | X | | X | | | |

Quellen: u. a. /11/

11.4 Versuchsergebnisse Hordentrockner

Versuchsreihe B - Knaulgras als Langware (200-300 mm)



Versuchsreihe B - Knaulgras als Kurzware (20-30 mm)

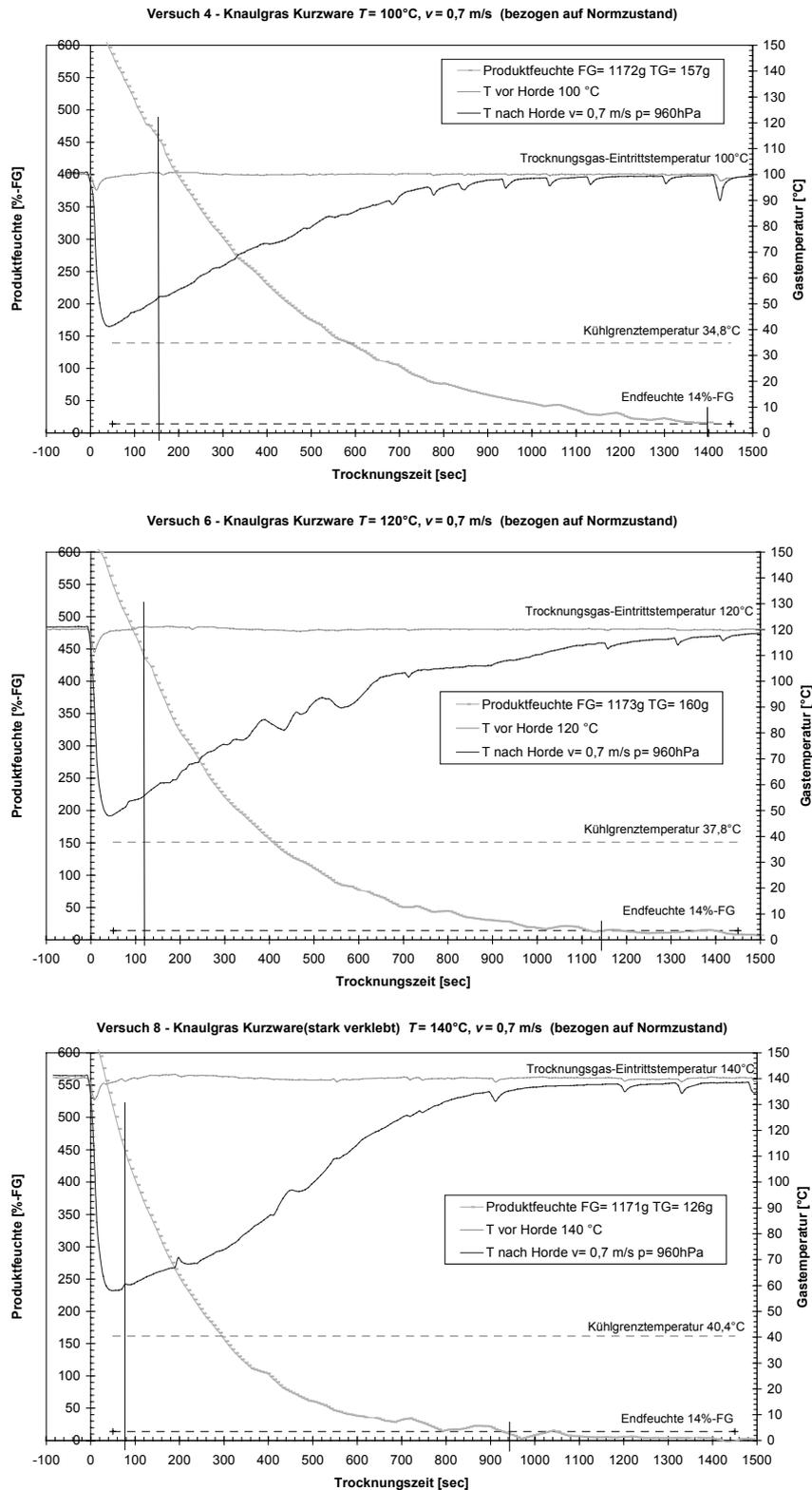
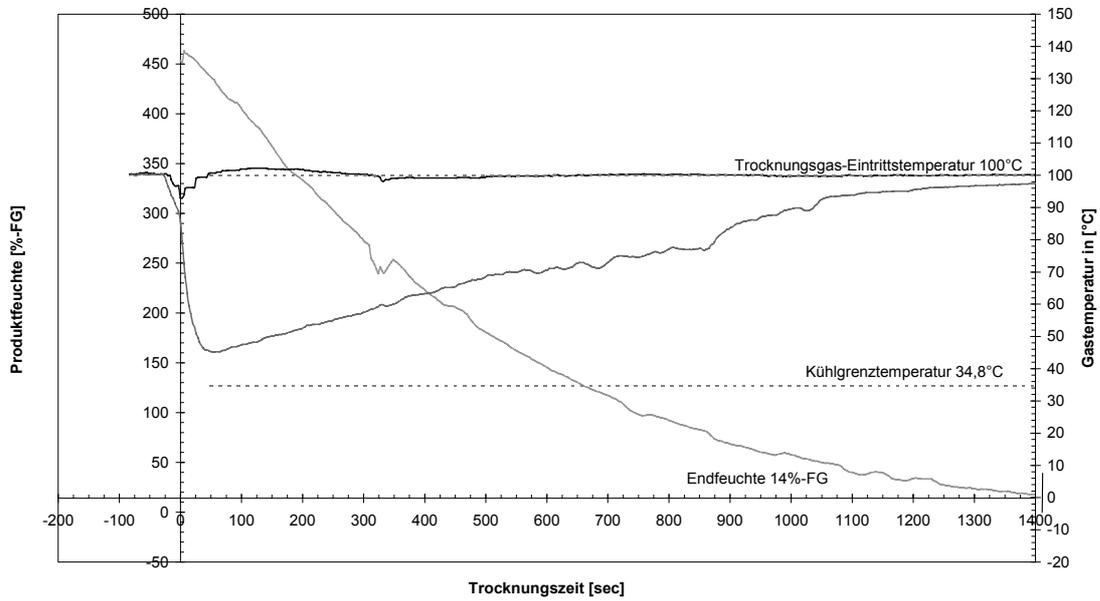


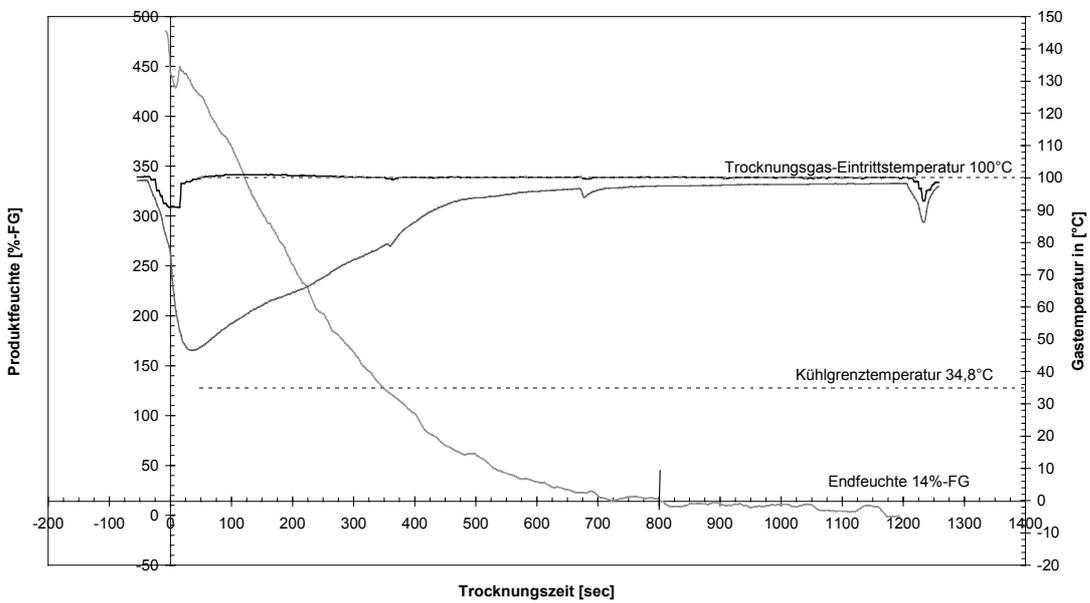
Bild 79 Verlauf der Produktfeuchte und der Temperatur vor/nach der Horde bei der Trocknung von Knaulgras bei 100, 120 und 140°C Eintrittstemperatur und einer Gasgeschwindigkeit von $0,7 \text{ m/s}$ (bezogen auf Normzustand)

Versuchsreihe A - bei 100 °C Eintrittstemperatur des Trocknungsgases

Versuch 3 - Weidelgras Langware $T=100^{\circ}\text{C}$, $v=0,4$ m/s (bez. auf Normzustand)

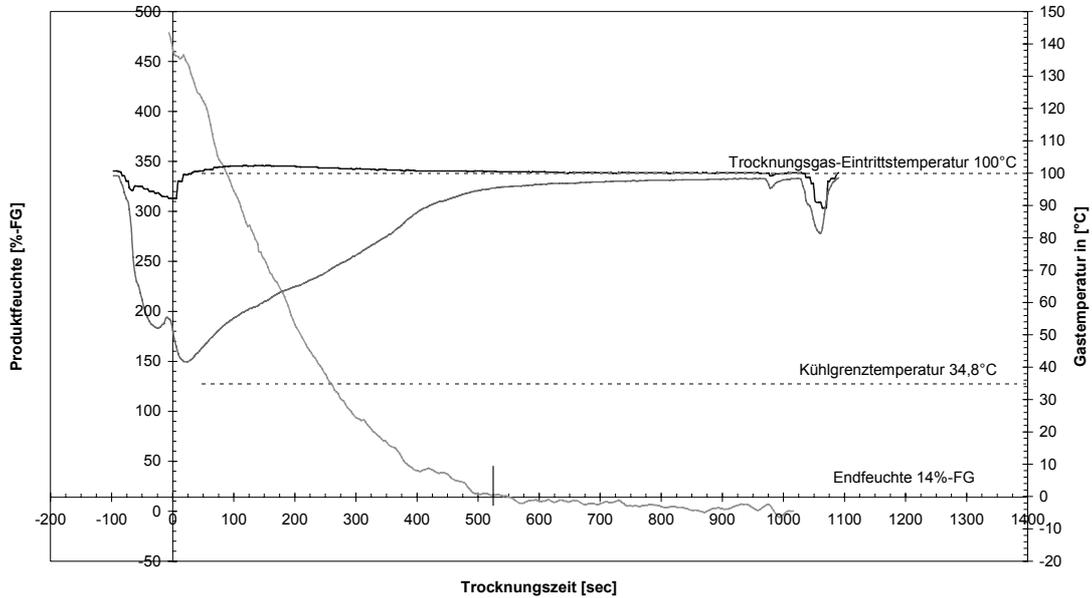


Versuch 2 - Weidelgras Langware $T=100^{\circ}\text{C}$, $v=0,8$ m/s (bez. auf Normzustand)



Versuchsreihe A - bei 100 °C Eintrittstemperatur des Trocknungsgases

Versuch 6 - Weidelgras Langware $T=100^{\circ}\text{C}$, $v=1,0\text{ m/s}$ (bez. auf Normzustand)



Versuch 5 - Weidelgras Langware $T=100^{\circ}\text{C}$, $v=1,2\text{ m/s}$ (bez. auf Normzustand)

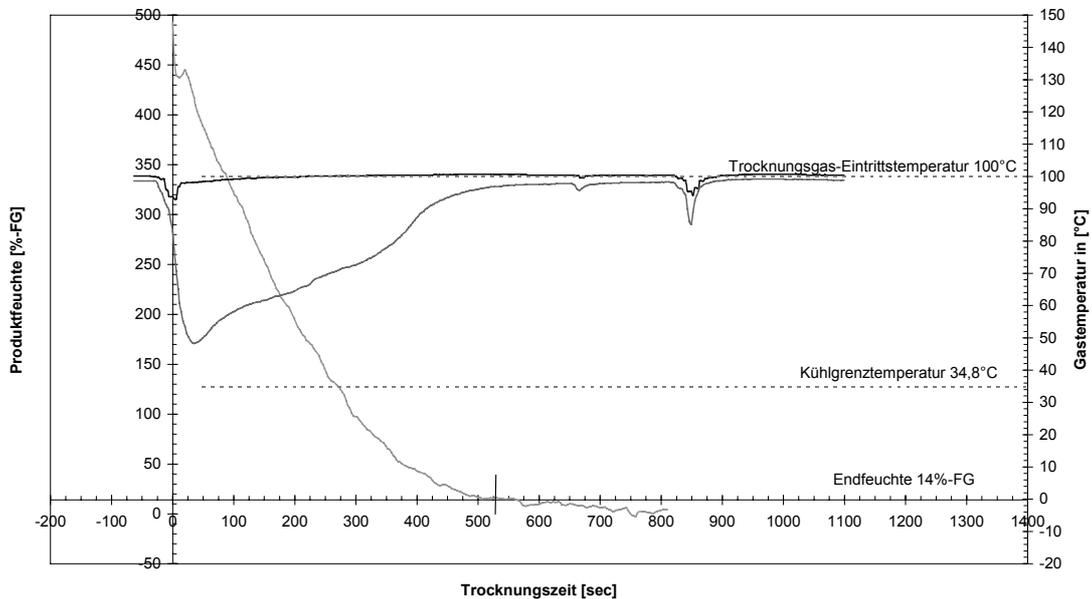
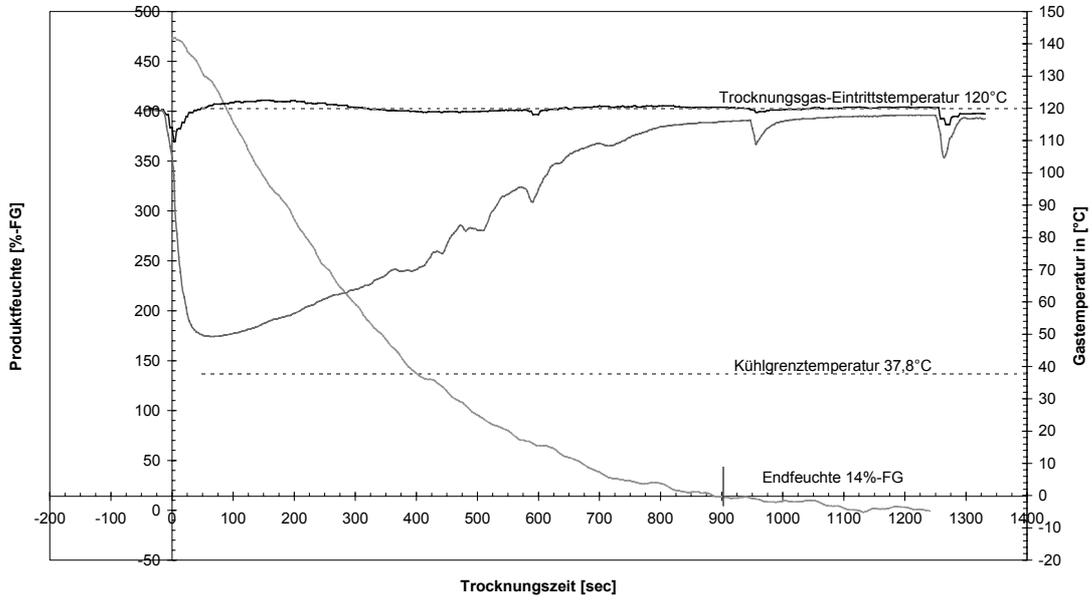


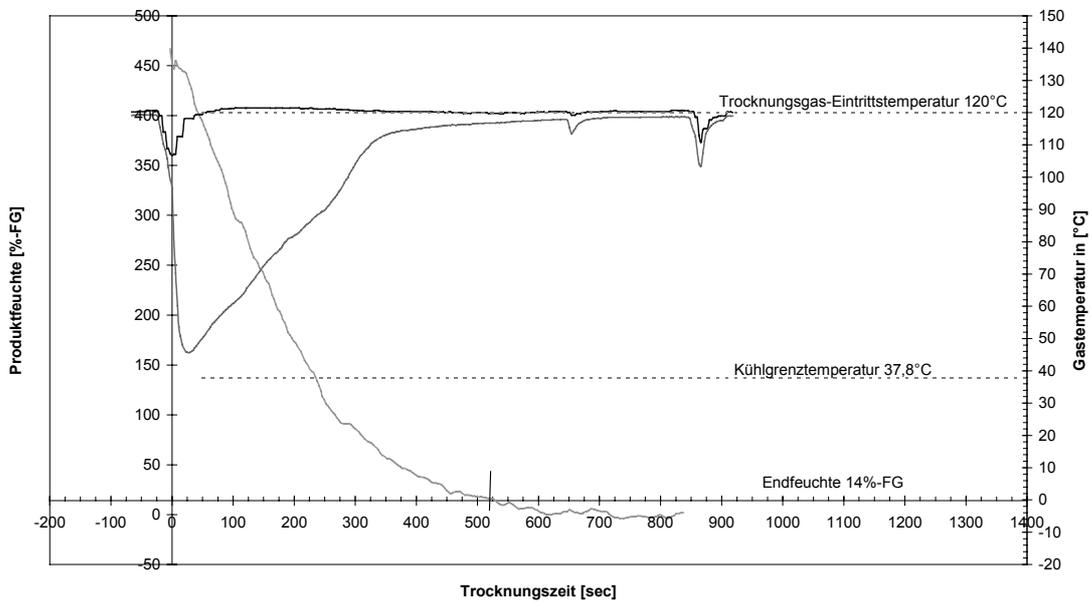
Bild 80 Verlauf der Produktfeuchte und der Temperatur nach der Horde bei der Trocknung von Wiesengras Langware (200-300 mm) bei 100°C Eintrittstemperatur und Gasgeschwindigkeiten von 0,4 / 0,8 / 1,0 / 1,2 m/s (bezogen auf Normzustand)

Versuchsreihe A - bei 120 °C Eintrittstemperatur des Trocknungsgases

Versuch 8 - Weidelgras Langware $T=120^{\circ}\text{C}$, $v=0,4$ m/s (bez. auf Normzustand)

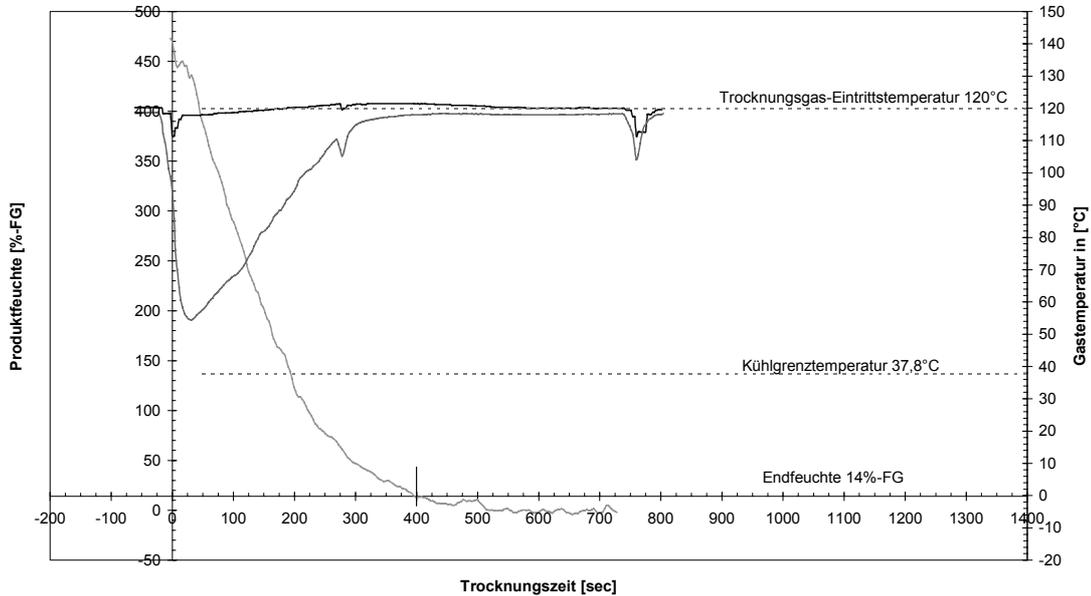


Versuch 7 - Weidelgras Langware $T=120^{\circ}\text{C}$, $v=0,8$ m/s (bez. auf Normzustand)



Versuchsreihe A - bei 120 °C Eintrittstemperatur des Trocknungsgases

Versuch 9 - Weidelgras Langware $T=120^{\circ}\text{C}$, $v=1,0\text{ m/s}$ (bez. auf Normzustand)



Versuch 10 - Weidelgras Langware $T=120^{\circ}\text{C}$, $v=1,2\text{ m/s}$ (bez. auf Normzustand)

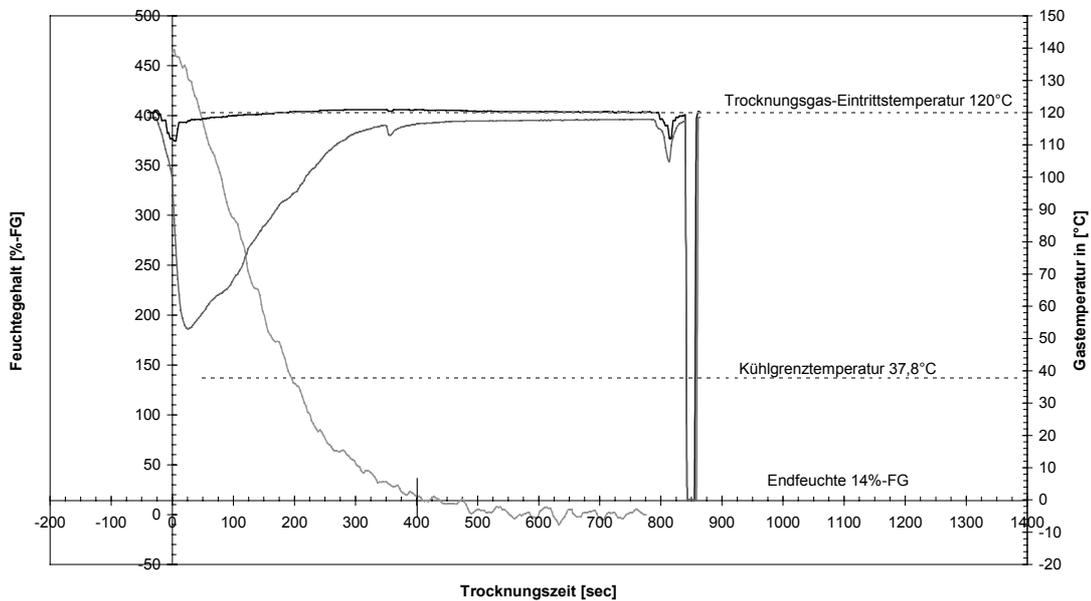
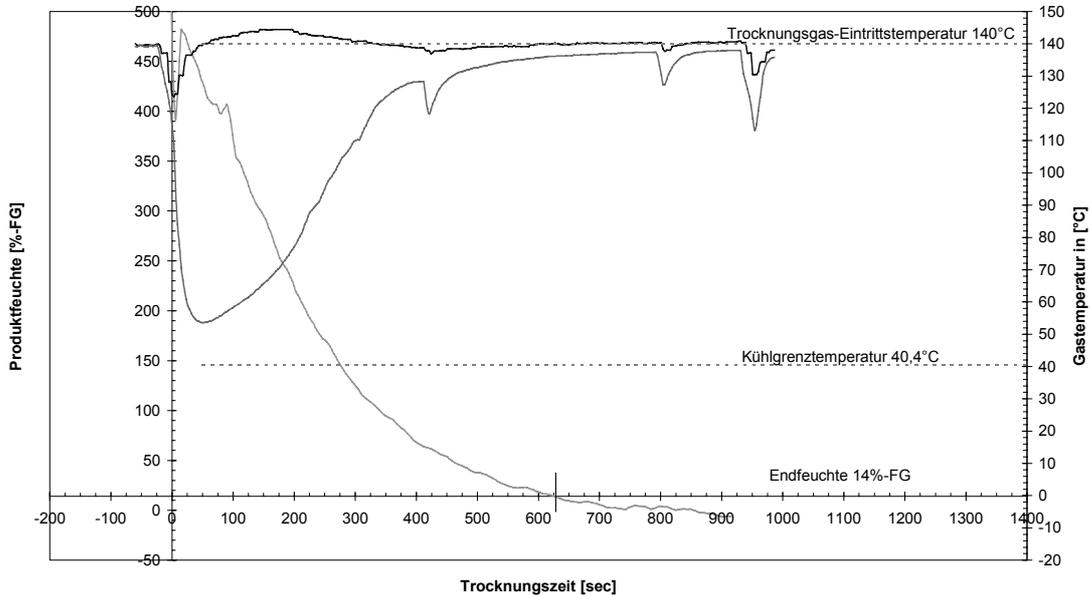


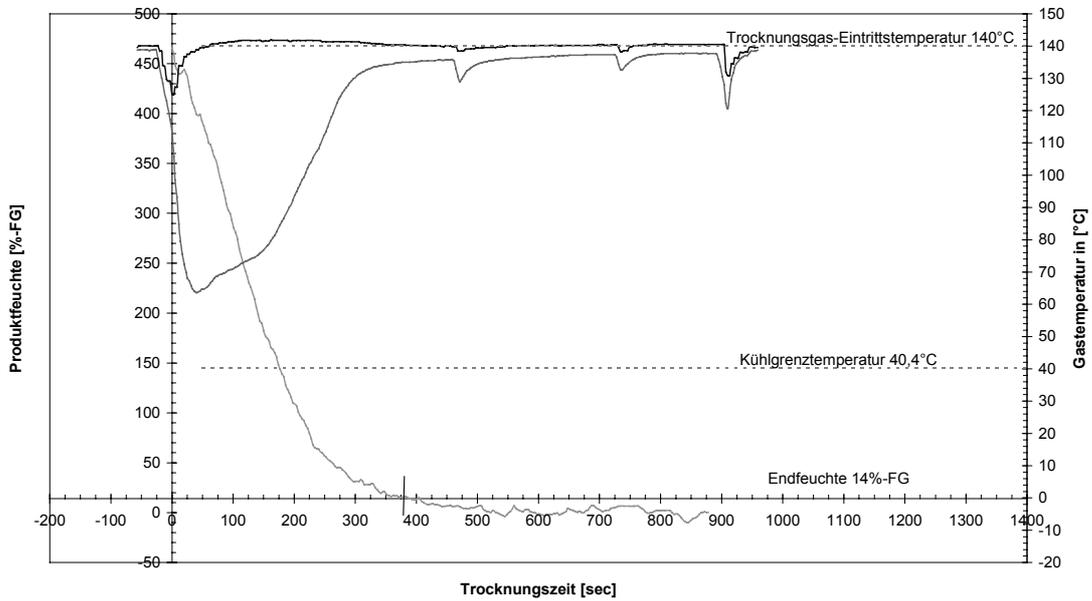
Bild 81 Verlauf der Produktfeuchte und der Temperatur nach der Horde bei der Trocknung von Wiesengras Langware (200-300 mm) bei 120°C Eintrittstemperatur und Gasgeschwindigkeiten von 0,4 / 0,8 / 1,0 / 1,1 m/s (bezogen auf Normzustand)

Versuchsreihe A - bei 140 °C Eintrittstemperatur des Trocknungsgases

Versuch 12 - Weidelgras Langware $T=140^{\circ}\text{C}$, $v=0,4\text{ m/s}$ (bez. auf Normzustand)

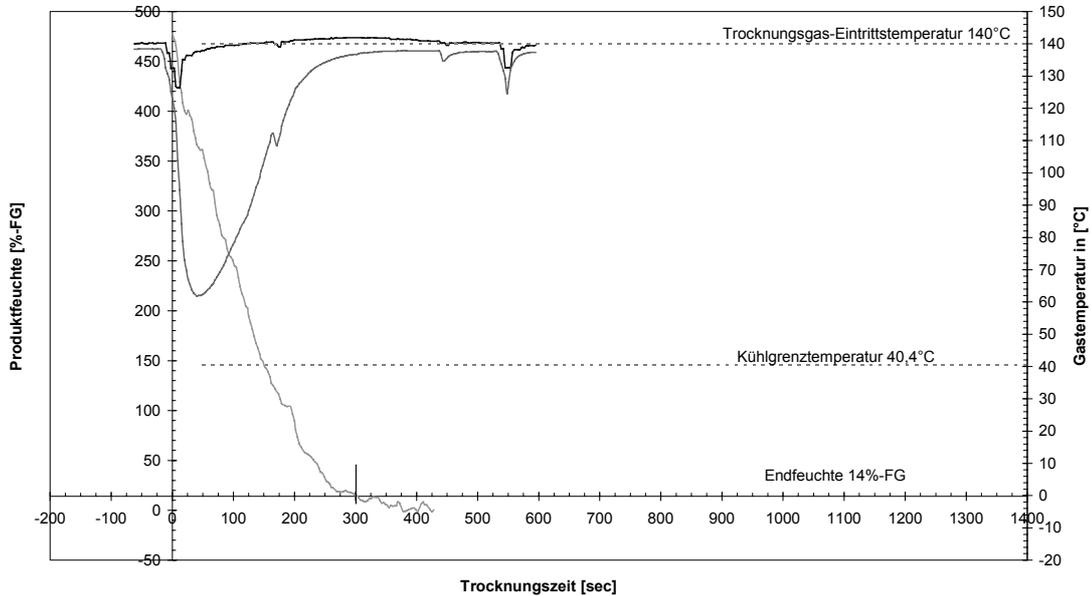


Versuch 11 - Weidelgras Langware $T=140^{\circ}\text{C}$, $v=0,8\text{ m/s}$ (bez. auf Normzustand)



Versuchsreihe A - bei 140 °C Eintrittstemperatur des Trocknungsgases

Versuch 13 - Weidelgras Langware $T=140^{\circ}\text{C}$, $v=1,0\text{ m/s}$ (bez. auf Normzustand)



Versuch 14 - Weidelgras Langware $T=140^{\circ}\text{C}$, $v=1,2\text{ m/s}$ (bez. auf Normzustand)

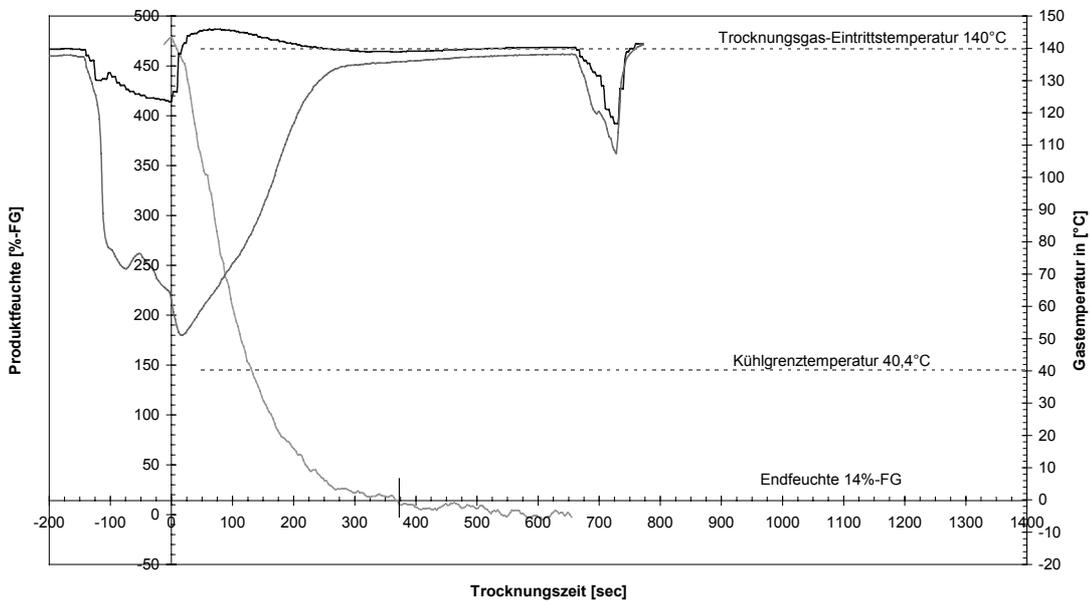
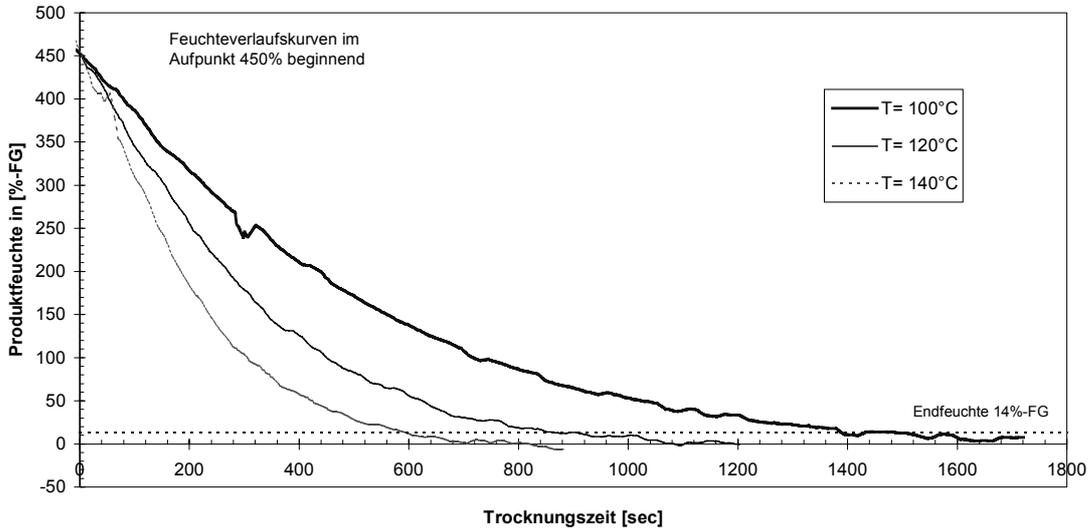


Bild 82 Verlauf der Produktfeuchte und der Temperatur nach der Horde bei der Trocknung von Wiesengras Langware (200-300 mm) bei 140°C Eintrittstemperatur und Gasgeschwindigkeiten von 0,4 / 0,8 / 1,0 / 1,2 m/s (bezogen auf Normzustand)

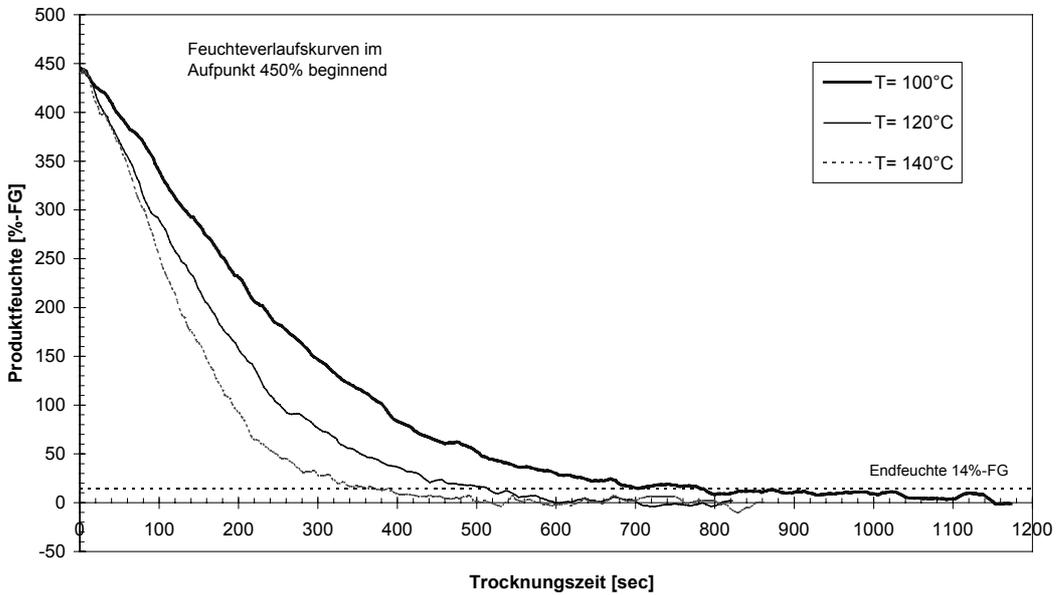
Versuchsreihe A

Vergleich der Trocknungsverlaufkurven bei verschiedenen Gastemperaturen

Versuche 3, 8, 12 - Weidelgras Langware bei Eintrittstemperaturen 100, 120 und 140°C und bei einer Gasgeschwindigkeit von 0,4 m/s (bez. auf Normzustand)



Versuche 2, 7, 11 - Weidelgras Langware bei Eintrittstemperaturen 100, 120 und 140°C und bei einer Gasgeschwindigkeit von 0,8 m/s (bez. auf Normzustand)



Versuchsreihe A

Vergleich der Trocknungsverlaufkurven bei verschiedenen Gastemperaturen

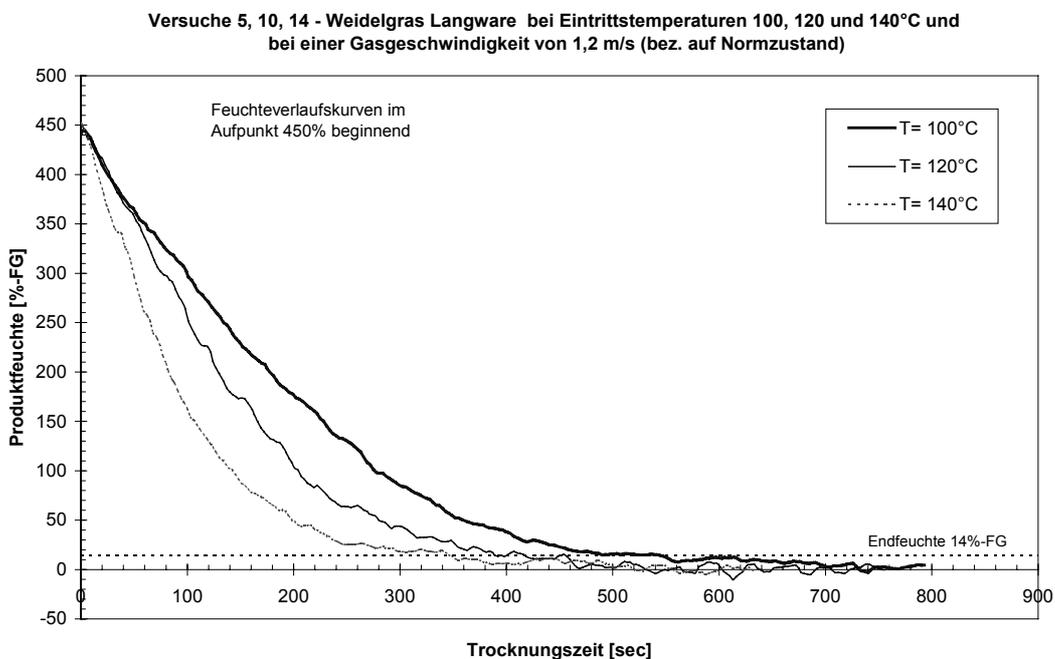
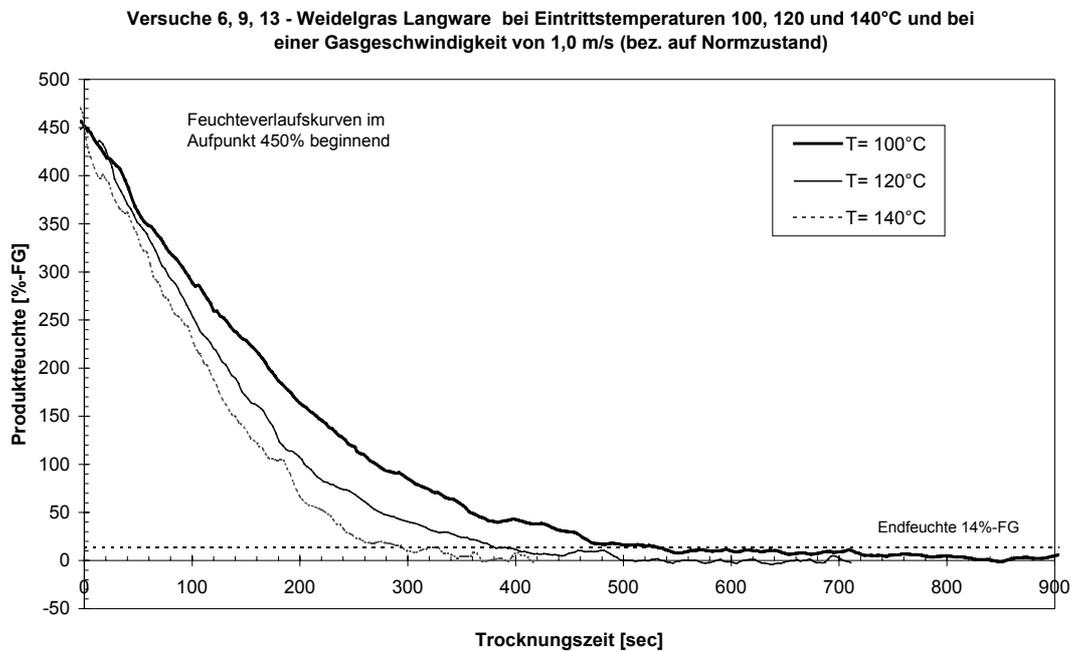


Bild 83 Gegenüberstellung der Produktfeuchteverläufe (450%-FG – 14%-FG) bei der Trocknung von Weidelgras/Langware bei Gasgeschwindigkeiten von 0,4 / 0,8 / 1,0 und 1,2 m/s (Norm) und 100, 120 und 140°C Eintrittstemperatur

Versuchsreihe A

Vergleich der Trocknungsverlaufkurven bei verschiedenen Gasgeschwindigkeiten

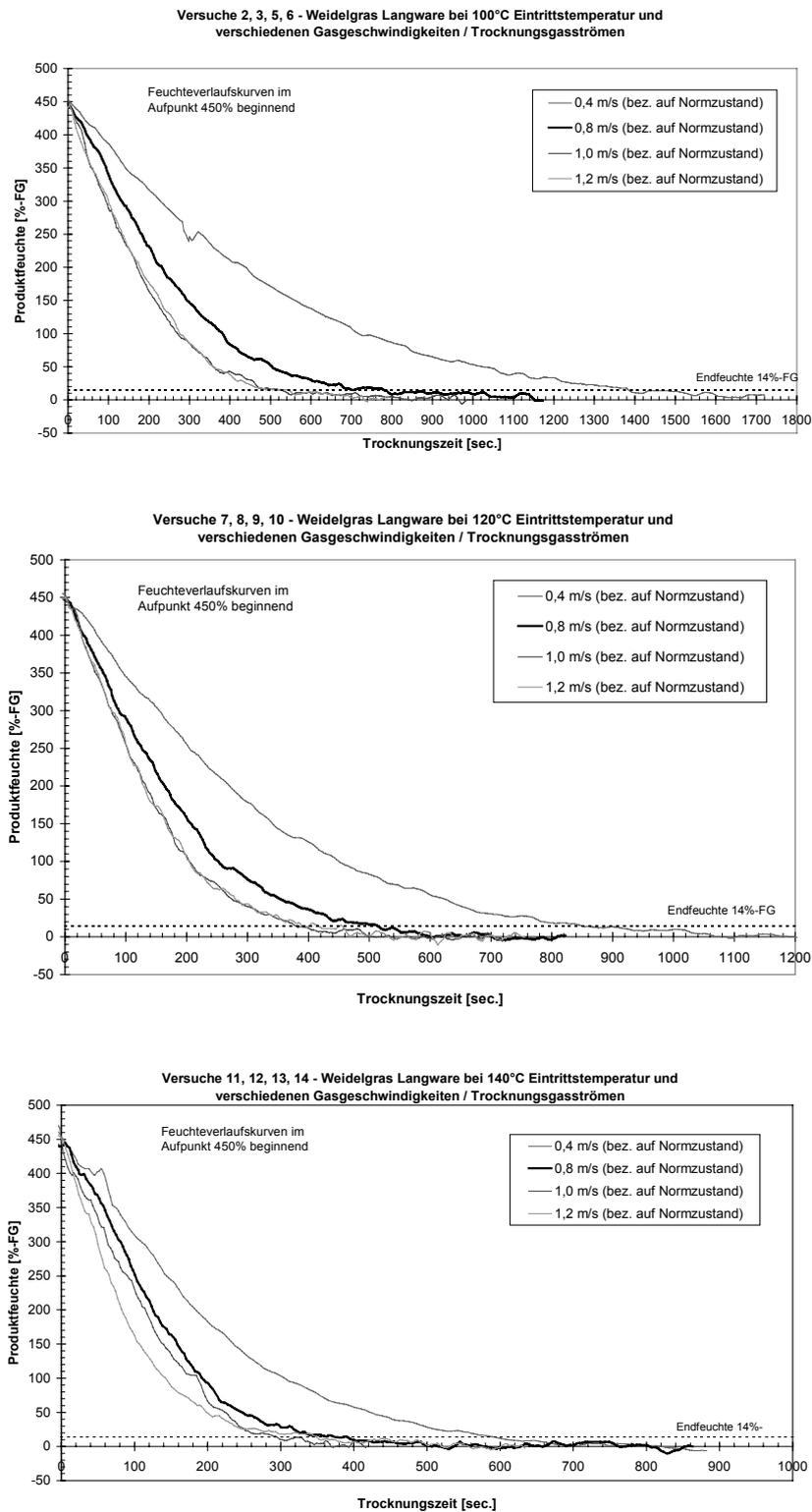


Bild 84 Feuchteverläufe (450 – 14 %-FG) bei Trocknung von Weidelgras/Langware bei 100, 120 und 140°C Eintrittstemperatur und 0,4 / 0,8 / 1,0 und 1,2 m/s (Norm) Trocknungsmediumsgeschwindigkeit

11.5 Versuchsbandrockner

11.5.1 Heißgaserzeuger

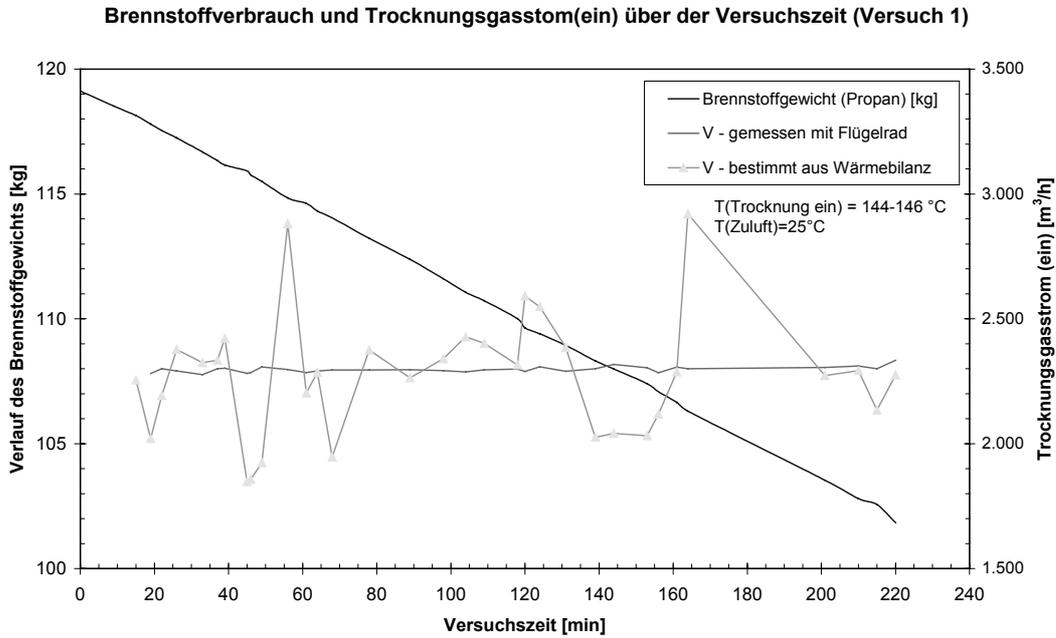


Bild 85 Abnahme des Brennstoffgewichts und daraus berechneter und gemessener Trocknungsgasvolumenstrom (Luft + Brennstoff) (Beispiel Versuch 1)

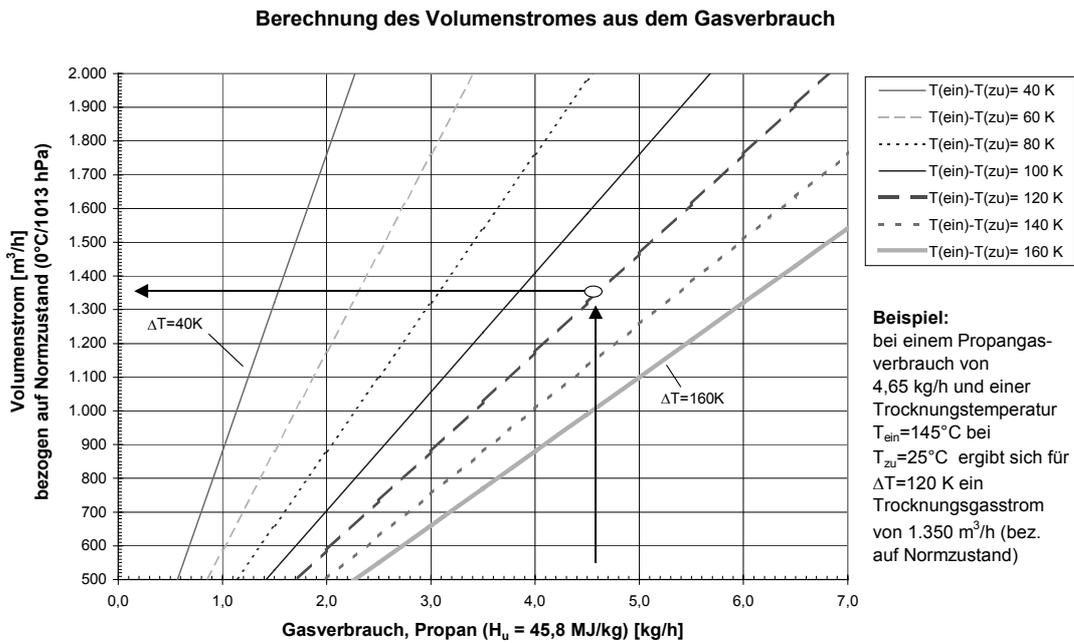


Bild 86 Berechnung des Trocknungsgasstroms aus der verbrauchten Brennstoffmenge

11.5.2 Emissionsmessung

Die Niedertemperaturtrocknung von Grüngut ist mit einer Geruchsentwicklung verbunden, die als intensiver Heugeruch beschrieben werden kann. Ein brandiger Geruch, wie er bei der Heißlufttrommel-trocknung vorkommt, wurde selbst bei Trocknungstemperaturen bis 170 °C nicht festgestellt.

Im letzten Trocknungsabschnitt bei 150 °C Trocknerzuluft wurde hin und wieder eine bläuliche Abluftfahne beobachtet. Durch eine Absenkung der Zulufttemperatur um 10-30 K konnte die Blaufärbung vermieden werden.

Um die Ursache für die Blaufärbung festzustellen, wurden Emissionsmessungen durchgeführt. Durch ein- und austrittsseitige Messungen konnte nachgewiesen werden, dass im Trockner selbst kein Kohlenmonoxid entsteht. Die gemessene CO-Emission stammt aus einer unvollständigen Verbrennung im Heißgaserzeuger. Die Emissionsmessungen für den Durchlaufversuch 7 sind in Bild 87 und für den Satz-trocknungsversuch 9 in Bild 88 dargestellt. Auch die Messung für den Gesamtkohlenstoff hat nur hin und wieder erhöhte Werte angezeigt. Es ist daher zu vermuten, dass die C-Gesamtemissionen auch überwiegend aus dem Verbrennungsvorgang stammen.

Die beobachtete Blaufärbung ist auch bei der Heißlufttrommel-trocknung mit Grüngut bekannt und wird dort mit dem allgemeinen Begriff „blue haze“ beschrieben. Da die hier festgestellte Abgastrübung sicherlich nicht von Verschmelzungsprozessen im Trockner verursacht wird (keine CO-Emission), wird vielmehr vermutet, dass es sich dabei um organische Pflanzeninhaltsstoffe handelt, die bei hohen Trocknungsgas- und Trocknungsprodukttemperaturen verdampfen.

Versuchs-Bandtrockner Altstadt, 7. Versuch - 1., 2. und 3. Durchlauf (up / Durchluft)

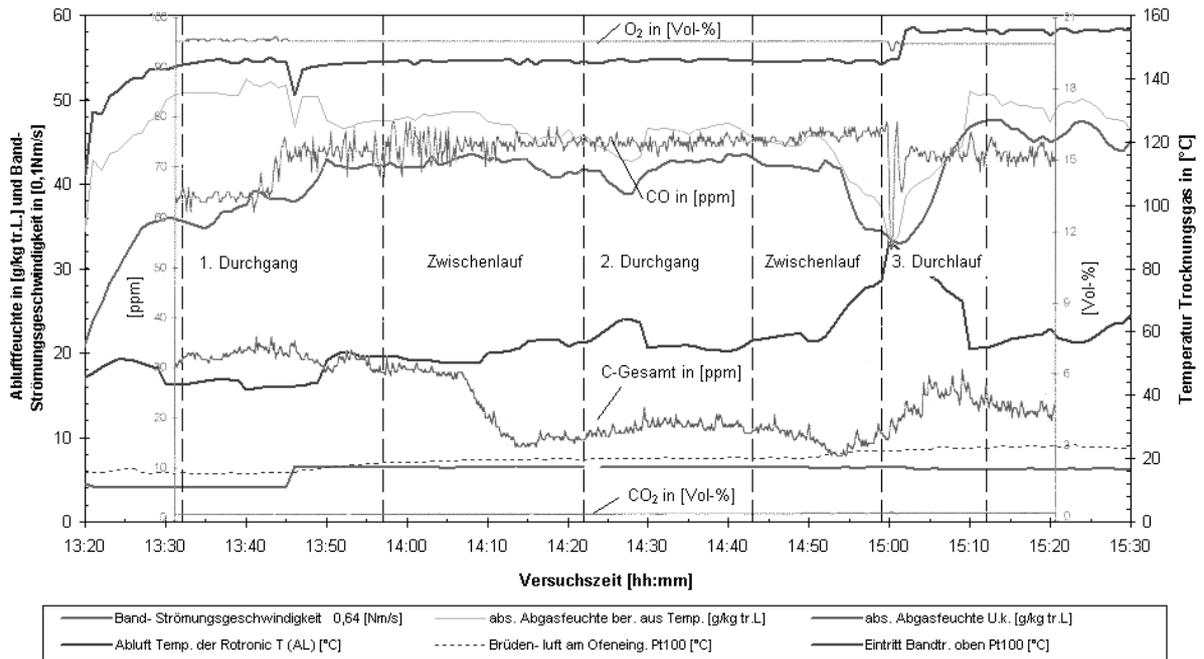


Bild 87 Emissionsmessung (O₂, CO₂, CO und C-Gesamt) zum Versuch 7 (Durchlauf)

Versuchs-Bandtrockner Altstadt, 9. Versuch - Satz Trocknung (up / Durchluft)

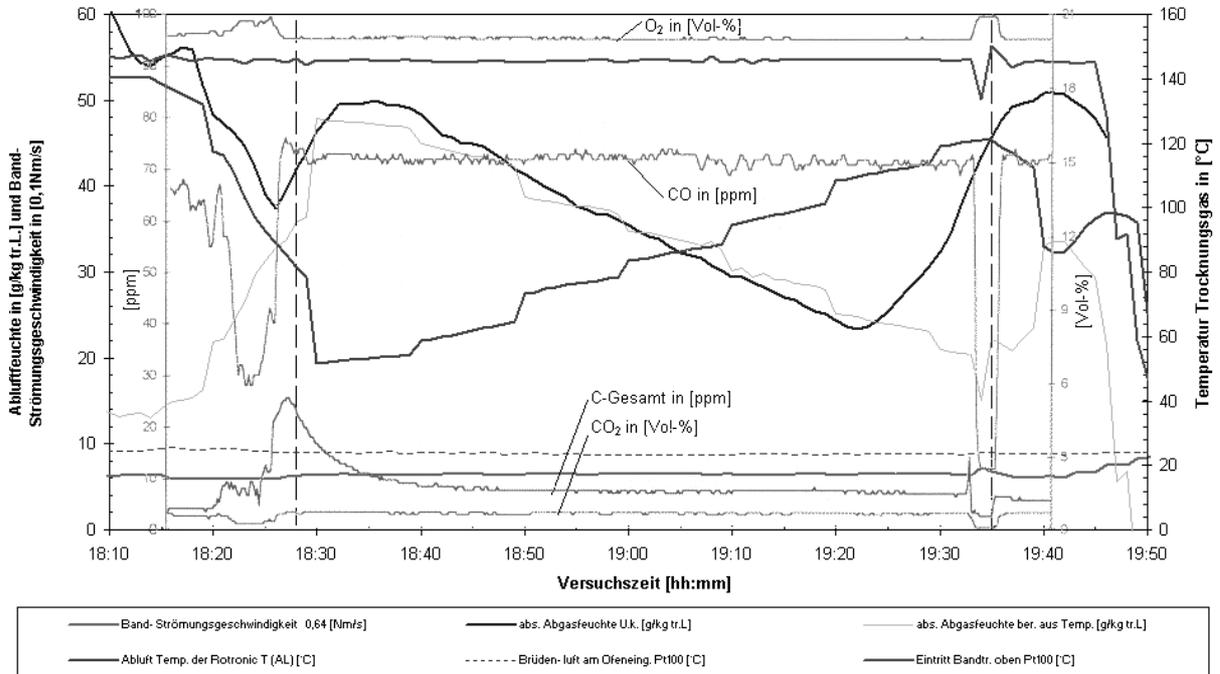


Bild 88 Emissionsmessung (O₂, CO₂, CO und C-Gesamt) zum Versuch 9 (Satz Trocknung)