

Hauptfach- und APMB-Versuch

**Energieeffizienz-
vergleich**



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	2
2.1	Allgemeines zu Trocknungsverfahren.....	2
2.2	Feuchtigkeitsanbindung an das Gut	3
2.2.1	Physikalisch-mechanische Feuchtigkeitsbindung	3
2.2.2	Physikalisch-chemische Feuchtigkeitsbindung.....	5
2.2.3	Chemische Feuchtigkeitsbindung.....	5
2.3	Eigenschaften des Trocknungsguts und des Trocknungsmittels	5
2.3.1	Eigenschaften des Trocknungsguts	6
2.3.2	Eigenschaften des Trocknungsmittels	6
2.4	Trocknungsverfahren.....	7
2.4.1	Verfahren zur mechanischen Trocknung.....	7
2.4.2	Verfahren zur thermischen Trocknung.....	8
2.5	Verlauf des Trocknungsprozesses bei thermischer Trocknung.....	9
2.6	Energieverbrauch und Nutzungsgrad bei Trocknungsvorgängen	11
2.7	Das h_{1+x} , x -Diagramm für feuchte Luft	12
3	Versuchsdurchführung	14
3.1	Schleuder	14
3.2	Wringer.....	15
3.3	Kondensationstrockner	16
3.4	Wärmepumpentrockner	17
3.5	Strahlungstrockner.....	18
3.6	Gastrockner	18
3.7	Auswertung	20
4	Vorarbeiten	21
4.1	h_{1+x} - x -Diagramm für das Trocknungsmittel Luft im Kondensationstrockner	21
4.2	Energiebilanz des Konvektionstrockners und des Strahlungstrockners	21

1 Einleitung

In vielen heutigen industriellen Verfahren kommen Trockner verschiedener Art und Leistungsfähigkeit zum Einsatz, welche die Feuchte aus Lebensmitteln, Textilien, Chemikalien und vielen anderen Produkten entfernen. Es gibt kaum ein Erzeugnis, das bei der Herstellung oder Gewinnung nicht mindestens einen Trockenvorgang durchlaufen hat.

Der Zweck des Trocknens kann dabei sehr unterschiedlich sein. Durch den Entzug von Feuchte werden viele Güter haltbar, verwendbar und brauchbar, bekommen ein besseres Aussehen und höheren Wert, werden leichter und dichter und sind dadurch vorteilhafter zu transportieren. In der Regel soll das Gut beim Trocknen seine Form, Festigkeit, Farbe und seine wertvollen Bestandteile beibehalten. Mancher Stoff kann bestimmte Eigenschaften nur annehmen, wenn er hohen Temperaturen ausgesetzt wird; andererseits schadet in vielen Fällen hohe Temperatur und zu rasche Trocknung.

Meistens muß der Trocknungsvorgang in das gesamte Herstellungsverfahren einordnet werden, er kann in der Regel nur mit einer beschränkten Auswahl an Heizmitteln durchgeführt werden und muß evtl. in vorgegebenen Räumen stattfinden. Solche und andere Umstände erfordern für nahezu jede Trocknungsaufgabe eine individuelle Lösung. Oft bieten sich mehrere potentielle Verfahren an, so daß ein Vergleich der verschiedenen Prozesse notwendig wird.

Das Skript beschreibt die Grundlagen und die technische Umsetzung verschiedener Trocknungsverfahren, die für das Verständnis der im praktischen Teil des Versuches durchgeführten Messungen notwendig sind. Ziel ist es, eine Datengrundlage für einen Vergleich der verschiedenen Verfahren zu schaffen, und ein Gefühl für die einzelnen Aspekte beim direkten Vergleich unterschiedlicher Prozesse zu vermitteln.

2 Theoretische Grundlagen

Notwendige Grundlage für das Verständnis der im Rahmen des Versuches durchgeführten Betrachtungen sind die theoretischen Grundlagen von Trocknungsprozessen sowie die Kenntnis der verschiedenen Trocknungsverfahren. Dazu sollen in diesem Kapitel die allgemeinen und technischen Grundlagen dargestellt werden.

2.1 Allgemeines zu Trocknungsverfahren

Unter dem Begriff *Trocknen* wird der Entzug einer Flüssigkeit aus einem Gut verstanden, wobei das Ziel des Trocknens die Herstellung eines trockenen Gutes ist. Es werden dabei zwei grundsätzliche Arten der Trocknung unterschieden:

- die *mechanische Trocknung*, d.h. die Austreibung der Flüssigkeit durch rein mechanische Kräfte, z.B. durch Schleudern oder Pressen, sowie
- die *thermische Trocknung*, d.h. Austreiben der Flüssigkeit durch Konvektion oder Strahlung. Hierbei werden zwei Teilvorgänge unterschieden:
 - a) die Überführung der Flüssigkeit in den dampfförmigen Zustand, und
 - b) die Abführung des Dampfes.

Die bei der thermischen Trocknung unter a) genannte Aggregatzustandsänderung der Flüssigkeit wird als Verdunstung bzw. Verdampfung bezeichnet. Von *Verdunstung* spricht man, wenn in dem an die Oberfläche grenzenden Raum der entstehende Dampf nicht allein vorhanden ist, sondern außer diesem noch ein anderes Gas vorherrscht, d.h. wenn der mit dem Manometer meßbare Gesamtdruck größer ist, als der Teildruck des entstehenden Dampfes. Bei der *Verdampfung* findet sich im angrenzenden Raum nur der entstehende Dampf, d.h. der Gesamtdruck entspricht dem Teildruck des Dampfes.

Entsprechend unterscheidet man bei der unter b) genannten Abführung des Dampfes die Begriffe Dampfdiffusion und Dampfströmung. Bei der *Dampfdiffusion* (= Zerstreuung) „zerstreut“ sich der entstehende Dampf in ein anderes Gas, das sog. Trägergas. Treibende Kräfte für die Bewegung des Dampfes in diesem Gas sind Teildruckunterschiede des Dampfes. Trocknungsvorgänge dieser Art werden als *Verdunstungstrocknung* bezeichnet.

Bei der *Dampfströmung* wird lediglich der entstehende Dampf abgeführt, ohne daß ein anderer Stoff am Transportvorgang beteiligt ist. Treibende Kräfte für diese Art der Dampfbewegung sind Gesamtdruckunterschiede, die zur Überwindung der Reibung verbraucht werden. Diesen Trocknungsvorgang nennt man *Verdampfungstrocknung*.

2.2 Feuchtigkeitsanbindung an das Gut

Für das Verständnis von Trocknungsvorgängen ist die Kenntnis der Bindungsarten von Feuchtigkeit an ein zu trocknendes Gut unerlässlich. Dabei werden drei Feuchtigkeitsbindungen an ein Gut unterschieden:

- die physikalisch - mechanische Bindung,
- die physikalisch - chemische Bindung und
- die chemische Bindung.

2.2.1 Physikalisch-mechanische Feuchtigkeitsbindung

Die physikalisch-mechanische Bindung von Flüssigkeit an ein Gut lässt sich unterteilen in:

- eine Bindung durch Benetzen und in
- eine Bindung in Kapillaren.

Bei der *Bindung durch Benetzen* befindet sich die Flüssigkeit als zusammenhängender Film auf der äußeren Oberfläche und wandert über große Zwischenräume oder Poren in die innere Oberfläche des Gutes (Oberflächendiffusion). Die Absorption ist selektiv, d. h. sie hängt von der Porosität und Qualität des Gutes ab; z. B. hat SiO_2 in Form von Sand oder Silikatgel jeweils eine erheblich unterschiedliche Wasseraufnahmefähigkeit.

Durch möglicherweise im Gut vorhandene Kapillarstrukturen kann ebenfalls Feuchtigkeit gebunden werden. Bei dieser Art der Bindung ist Flüssigkeitsaufnahme entweder durch unmittelbare Berührung oder durch Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Luft möglich. Die Bindung von Flüssigkeit in Kapillaren ist komplex; im Rahmen dieses Umdrucks werden nur die nötigsten Grundlagen dargelegt werden.

Taucht eine Kapillare (z.B. ein enges Glasrohr) in eine Flüssigkeit ein, bildet sich nach dem mechanischen Kräftegleichgewicht für die jeweilige Stoffkombination (Glas-Flüssigkeit) durch Wirkung der Oberflächenspannung ein Benetzungswinkel α aus (vgl. Abb. 1). Unter der Wirkung des sog. Kapillarsogs wird die potentielle Energie der Flüssigkeit geändert (kapillare Steighöhe), z.B. die Bindungsenergie der Flüssigkeit an Glas. Die sich in der kapillaren Steighöhe äußernde Bindungsenergie ist in erster Linie abhängig vom Durchmesser d der Kapillare, weshalb Kapillaren in Mikrokapillaren ($d < 1 \mu\text{m}$) und Makrokapillaren ($d > 1 \mu\text{m}$) unterteilt werden. Ein Aufheben der Bindungsenergie ist nur durch Zufuhr von Energie möglich.

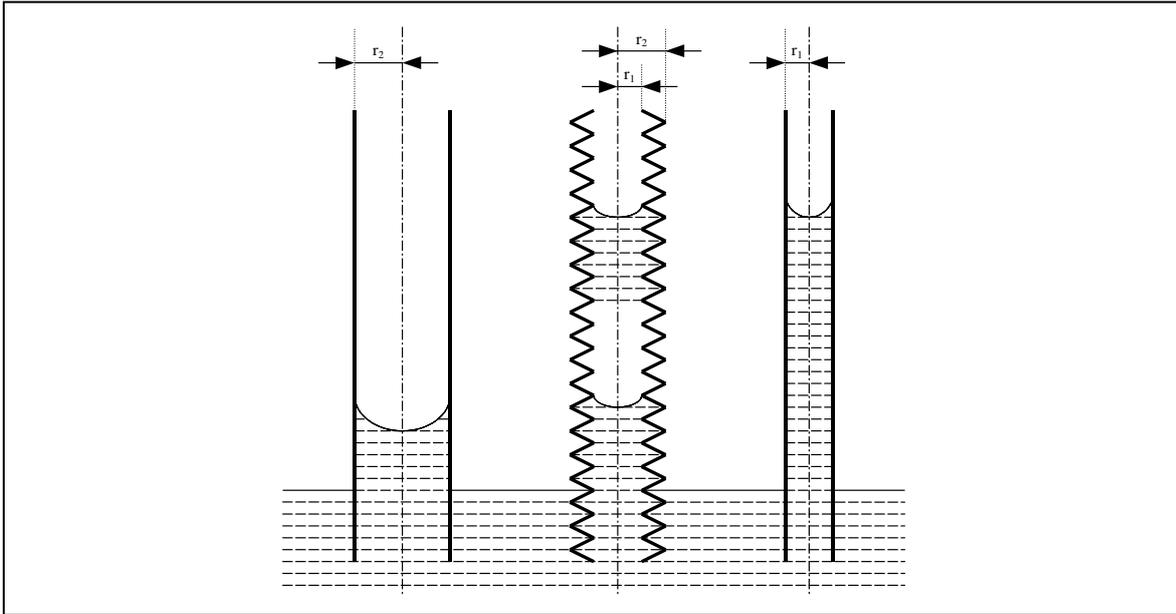


Abb. 1: Wirkung unterschiedlicher Kapillarradien

Aufgrund der Tatsache, daß über der Grenzfläche Wasser-Luft der Kapillare eine Dampfdrucksenkung (bei positiver Steighöhe) auftritt, kann Feuchtigkeit auch aus ungesättigter Luft ausscheiden. Diesen hier nicht näher erläuterten Effekt nennt man *Sorption*; Güter, die eine derartige Bindungsmöglichkeit aufweisen, bezeichnet man als *hygroskopisch*. Sie nehmen entsprechend den sog. Sorptionsthermen bereits aus der Umgebung Feuchte auf, eine Trocknung dieser Stoffe auf sehr niedrige Endfeuchtegehalte gestaltet sich äußerst schwierig.

Die im Versuch verwendete Baumwolle nimmt als hygroskopischer Stoff entsprechend den Sorptionsthermen (vgl. Abb. 2) aus der Umgebung Feuchtigkeit auf. Die Sorptionskurven zeigen die sich natürlich einstellende Feuchtigkeit von Stoffen in Abhängigkeit der Raumlufffeuchte und -temperatur, wobei zwischen der Feuchteaufnahme (Absorption) und der Feuchteabgabe (Desorption) unterschieden werden muß. Die Kurven dieser beiden Vorgänge unterscheiden sich durch eine Hysterese (in Abb. 2 nicht dargestellt).

Die Sorptionsthermen können bis zu einer relative Luftfeuchte von 100 % angegeben werden, da das Gut eine größere Feuchtigkeit nur durch Tauchen (Befeuchtung der Makrokapillaren und Bindung durch Benetzen) aufnehmen kann.

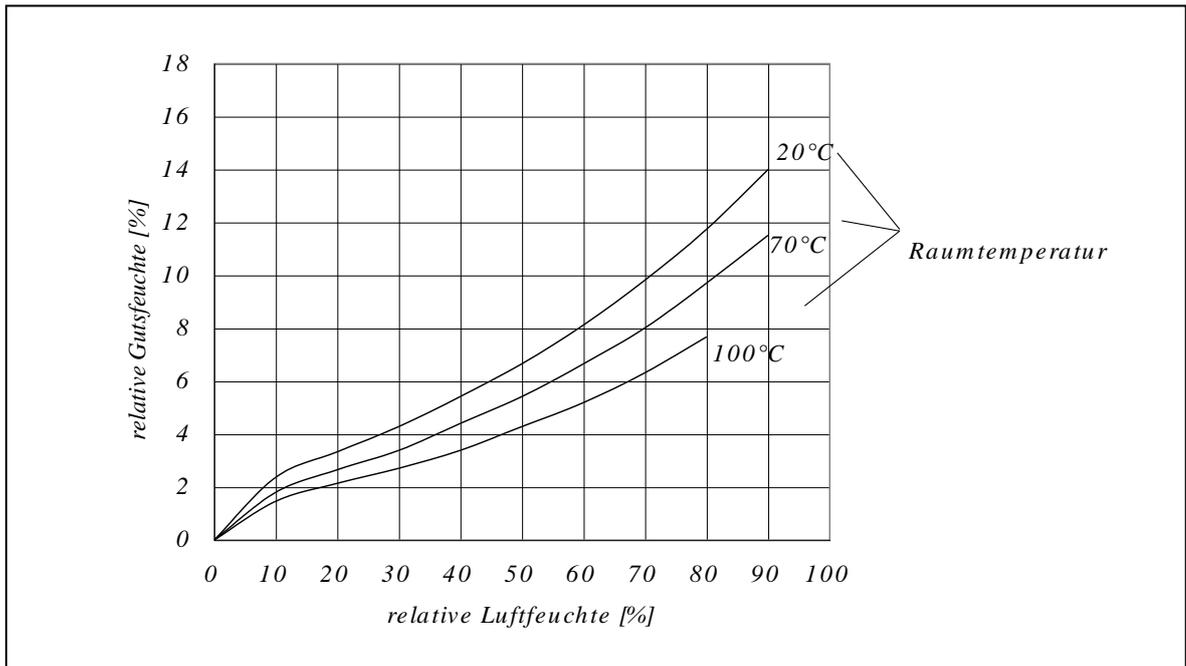


Abb. 2: Sorptionsthermen von Baumwolle in Abhängigkeit der Raumtemperatur

2.2.2 Physikalisch-chemische Feuchtigkeitsbindung

Eine von vielen physikalisch-chemischen Bindungsformen ist die osmotische Feuchtigkeitsbindung. Sie tritt bei Pflanzenzellen auf, die in ihrem Inneren aus einer konzentrierten Lösung bestehen, in die Wasser aus einer dünneren Lösung (Umgebung) eindringt. Dies führt aufgrund elastischer Zellwände zum Aufquellen (osmotischer Druck).

Da das untersuchte Baumwollgewebe aus pflanzlichen Zellen besteht, weist es den Effekt der osmotischen Bindung auf. Jedoch hat diese Bindungsform nur einen kleinen Anteil an der insgesamt gebundenen Flüssigkeit. Im Rahmen der angewandten Trocknungsverfahren kommt es zu keiner osmotischen Entfeuchtung.

2.2.3 Chemische Feuchtigkeitsbindung

Chemisch gebundenes Wasser wird bei technischen Trocknungsprozessen i.d.R. nicht entfernt. Blaue Kupfersulfat-Kristalle z.B. verlieren chemisch gebundenes Wasser erst bei ca. 600 °C, wobei das wasserfreie, weiße, pulverförmige Kupfersulfat entsteht.

2.3 Eigenschaften des Trocknungsguts und des Trocknungsmittels

Im folgenden wird auf verschiedene Kennwerte eingegangen, mit denen die Eigenschaften des zu trocknenden Guts und der Trocknungsmittel beschrieben werden können.

2.3.1 Eigenschaften des Trocknungsguts

Das Feuchtgut wird durch seine absolute und seine relative Feuchte gekennzeichnet. Die *absolute Feuchte* eines Gutes entspricht der im Feuchtgut enthaltenen Flüssigkeitsmasse m_w .

$$u = m_w \quad (2-1)$$

Die *relative Feuchte* wird gemäß Gleichung 2-2 definiert. Dabei ist das Naßgewicht durch einfache Wägung eindeutig bestimmbar. Die Bestimmung des Gewichts der wasserfreien Substanz erfolgt über die Sorptionsthermen (vgl. Abb. 2).

$$x = \frac{m_n - m_{tr}}{m_{tr}} \quad (2-2)$$

mit: x relative Feuchte
 m_n Naßgewicht
 m_{tr} Trockengewicht

2.3.2 Eigenschaften des Trocknungsmittels

Als Trocknungsmittel werden überwiegend Luft und Abgase bzw. deren Gemische verwendet. In diesem Abschnitt wird beispielhaft das Trocknungsmittel Luft behandelt.

Der Feuchtegehalt und die Enthalpie (= Wärmeinhalt) der Luft sind direkt miteinander gekoppelt, da feuchte Luft ein Gemisch von trockener Luft und Wasserdampf darstellt. Der *barometrische Druck* der Luft ergibt sich dabei aus der Summe der Partialdrücke von trockener Luft und Wasserdampf.

$$p_b = p_{RL} + p_D \quad (2-3)$$

mit: p_b barometrischer Druck der Luft
 p_{RL} Partialdruck Reinluft
 p_D Partialdruck Wasserdampf

Im Laufe des Trocknungsprozesses ändern sich Temperatur, relative Feuchte und das Volumen der feuchten Luft; die Masse der trockenen Luft in diesem Gasgemisch bleibt jedoch in der Regel konstant. Die *absolute Feuchte* der Luft (nicht mit der relativen Gutsfeuchte [ebenfalls x] verwechseln!) ist das Verhältnis der Masse des Wasserdampfs im Gemisch zur Masse der trockenen Luft (Reinluft).

$$x = \frac{m_D}{m_{RL}} \quad (2-4)$$

mit: x absolute Feuchte der Luft
 m_D Masse Wasserdampf
 m_{RL} Masse der trockenen Luft

Die *relative Feuchte* gibt Auskunft darüber, ob Luft bei gegebener Temperatur zusätzlichen Wasserdampf aufnehmen kann. Sie wird definiert als der Quotient der Dampfmasse in einem Volumenelement Luft bezogen auf die Dampfmasse, die bei gleicher Temperatur maximal mit der Luft vermischt werden könnte (Sättigungszustand).

$$\varphi = \frac{m_D}{m_{D_s}} \quad (2-5)$$

mit: φ relative Feuchte der Luft
 m_D Masse Wasserdampf
 m_{D_s} Dampfmasse bei Sättigungszustand

Die relative Feuchte kann gemäß Gleichung 2-6 auch als der Quotient des Partialdrucks des Wasserdampfs in der feuchten Luft bezogen auf den Sättigungsdampfdruck bei gegebener Temperatur ausgedrückt werden.

$$\varphi = \frac{p_D}{p_s} \quad (2-6)$$

mit: p_D Partialdruck Wasserdampf
 p_s Sättigungsdampfdruck

Gleichung 2-7 beschreibt den Zusammenhang zwischen absoluter und relativen Luftfeuchte. Hierbei ist auf die Temperaturabhängigkeit des Sättigungsdampfdrucks zu achten.

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_s(t)}{\frac{p}{\varphi} - p_s(t)} \quad (2-7)$$

mit: p Gesamtdruck
 $p_s(t)$ Sättigungsdampfdruck von Wasserdampf

2.4 Trocknungsverfahren

Bei den verschiedenen Trocknungsverfahren und -maschinen läßt sich hinsichtlich des Feuchteentzugs grundsätzlich unterscheiden zwischen *mechanischer* und *thermischer Trocknung*.

2.4.1 Verfahren zur mechanischen Trocknung

Eine mechanische Trocknung liegt vor, wenn dem Feuchtgut Flüssigkeit ohne Zustandsänderung durch Abpressen (= Filtern) oder Zentrifugieren, d.h. durch die Einwirkung mechanischer Energie entzogen wird.

Die Einwirkungsmöglichkeiten mechanischer Bewegungsenergie ist begrenzt auf die Entwässerung der Makropillaren. In der Praxis dient dieses Prinzip meist nur der

Vorentfeuchtung. Voraussetzung ist, daß das zu trocknende Gut ausreichend deformierbar und für das ausgepreßte Wasser durchlässig ist.

2.4.2 Verfahren zur thermischen Trocknung

Im Unterschied zur mechanischen Entwässerung tritt bei der thermischen Trocknung mit fortgesetzter Wärmezufuhr eine Phasenänderung mindestens einer Komponente des Feuchtguts auf; die dabei entstehende gasförmige Komponente kann dann entfernt werden. Auf diese Weise können zumindest Teile der adhäsiv gebundenen Feuchte und der Feuchtegehalt aus den Mikrokapillaren entfernt werden.

Grundsätzlich können alle Verfahren zur thermischen Trocknung unter Normal- oder Unterdruck ablaufen; durch entsprechende Evakuierung der Umgebung des zu trocknenden Guts können beliebige (temperaturabhängige) Trocknungsgeschwindigkeiten erreicht werden.

Konvektionstrocknung

In Konvektionstrocknern wird die zur Trocknung notwendige Energie von einem strömenden Mittel - einem Fluid – an das zu trocknende Gut übertragen. Das Fluid kann ein Gas, eine Flüssigkeit oder ein dispergierter Feststoff sein; es berührt das Gut unmittelbar und mischt sich mit der verdampften Feuchte. Der im Versuch eingesetzte Kondensationstrockner gehört zur Gruppe der Konvektionstrockner, bei denen als Fluid Luft eingesetzt wird.

Kontaktrockner

In Kontaktrocknern berührt das Gut die Oberflächen heißer Körper und empfängt dabei die zur Trocknung notwendige Energie durch Wärmeleitung. Die Feuchte geht als Dampf in das angrenzende Gas über und strömt mit ihm fort. Um reine Kontaktrockner handelt es sich, wenn weder die Luft, noch die umgebenden Wände, sondern nur die Heizflächen Energie an das Gut übertragen. In ausgeführten Trocknern ist dieser Fall allerdings selten; meistens empfängt oder verliert das Gut Energie auch durch Strahlung und Konvektion.

Viele Kontaktrockner erhalten die Heizenergie mit Hilfe eines fluiden Heizmittels und geben sie als Wärme indirekt durch metallische Wände hindurch an das Gut ab. Soll das Gut schnell trocknen, muß dabei für guten Wärmeübergang vom Heizmittel an die Heizwände, von diesen Wänden an das Gut und für einen guten Dampfübergang vom Gut an die Luft gesorgt werden.

Temperatur-Strahlungstrockner

Alle Körper geben kontinuierlich Energie in Form elektromagnetischer Strahlung ab und nehmen ständig Strahlung auf. Treffen elektromagnetische Wellen auf einen Gegenstand,

werden sie teilweise reflektiert, d. h. in den umgebenden Raum zurückgeworfen, teilweise ungehindert durchgelassen oder sie geben ihre Energie an die Atome des Gegenstands ab (Absorption) und versetzen die Atome dadurch in schnellere, ungeordnete Schwingungen, woraus die Erwärmung des Materials resultiert.

Aus dem Spektrum elektromagnetischer Strahlung wird in der Trocknungstechnik hauptsächlich die sog. *Infrarotstrahlung* ausgenutzt. Infrarotstrahlung ist elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 0,75 und 1.000 μm , was einer Frequenz von etwa $3 \cdot 10^{11}$ bis $4 \cdot 10^{14}$ Hz entspricht.

Sonderarten elektrischer Trockner

Als „Sonderarten“ werden elektrische Trockner bezeichnet, welche die Energie unmittelbar in das Gutsinnere führen, ausgenommen die elektrischen Temperatur-Strahlungstrockner.

Beim *Widerstandstrockner* wird das Gut als Wirkwiderstand in einem Stromkreis benutzt. Es entsteht im Gut eine Aufheizung der elektrisch leitenden Bestandteile, was zur Verdunstung bzw. Verdampfung der Gutsfeuchte führt. Dieses Trocknungsverfahren wird z.B. bei lackierten Metalldrähten oder bei Kabeln mit Papierumhüllung angewendet.

Beim *Induktionstrockner* wird ein elektrisch leitendes Gut einem magnetischem Wechselfeld ausgesetzt. Dadurch werden im Gut Wirbelströme induziert, die zur Erwärmung und letztendlich zum Feuchteentzug führen. Die Frequenzen liegen dabei üblicherweise im Bereich einiger 100 Hz. Zum Einsatz kommen Induktionstrockner bei Radkappen, Scheinwerfern und anderen Metallgegenständen der Massenfabrikation.

Bei der *dielektrischen Trocknung* wird ein Gut mit dielektrischen Eigenschaften (Nichtleiter) einem hochfrequenten elektrischen Feld ausgesetzt und nimmt aus diesem Feld Energie auf. Man spricht von Hochfrequenztrocknern, da die Feldfrequenz üblicherweise im Bereich von MHz bis GHz liegt. Ein Beispiel für das Prinzip der dielektrischen Trocknung ist die im Haushalt und in der Industrie eingesetzte Erwärmung durch Mikrowellen.

2.5 Verlauf des Trocknungsprozesses bei thermischer Trocknung

Während des Trocknungsprozesses ändert sich der Feuchtegehalt des Trocknungsguts ständig. Es entsteht dadurch zwischen der Oberfläche des Gutes, von der die Feuchte kontinuierlich entfernt wird, und den inneren Schichten des Gutes ein Konzentrationsgefälle, die Folge ist ein Feuchtetransport von Orten größerer, zu Orten niedrigerer Feuchtekonzentration (Feuchtediffusion), auch als *Feuchteleitfähigkeit* bezeichnet. Dabei wird die Feuchte zur Oberfläche des Gutes oder zum Ort der Verdampfungsgrenze transportiert, dort in Dampf überführt, der sich mit der erwärmten Luft oder mit Verbrennungsprodukten vermischt, und in die Umgebung abgeführt. Dabei bewegt sich die Verdampfungs-

grenze von der Oberfläche des Gutes im Verlauf des Trocknungsprozesses in das Innere des Gutes.

Da für die Verdampfung Wärme zugeführt wird, erfolgt außer der Entfernung der Feuchte auch eine Erwärmung des zu trocknenden Materials. Durch Wärmezufuhr über die Oberfläche des Gutes entsteht eine Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Kern. Aufgrund von Effekten, die mit der Bindung von Flüssigkeit in Kapillaren zusammenhängen, hat Feuchtigkeit die Tendenz, von Orten höherer zu Orten niedrigerer Temperatur zu wandern. Diese Erscheinung wird *Thermofeuchte-Leitfähigkeit* genannt und ist besonders ausgeprägt bei massiven (dicken) Trocknungsgütern. Ist die Oberflächentemperatur größer als die Kerntemperatur, haben die Vektoren der Feuchteleitfähigkeit und der Thermofeuchte-Leitfähigkeit unterschiedliche Vorzeichen, d.h. der Trocknungsprozeß wird verlangsamt. Mit zunehmender Durchwärmung des Trocknungsguts (Verringerung des Temperaturgradienten) vermindert sich der Einfluß der Thermofeuchte-Leitfähigkeit.

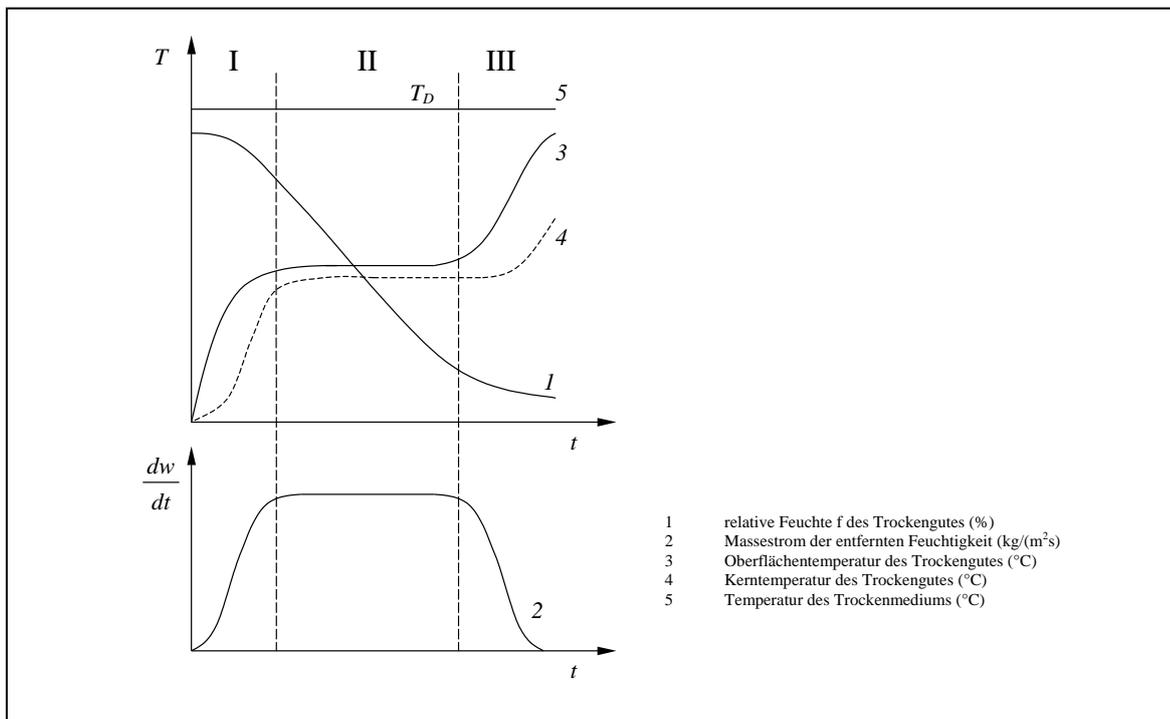


Abb. 3: Änderung der Trocknungsparameter über der Zeit

Der Trocknungsprozeß kann in drei Abschnitte eingeteilt werden (vgl. Abb. 3). In *Abschnitt I* erfolgt die Erwärmung des Gutes und die Verdampfung der Feuchte an der Materialoberfläche. Die Trocknungsintensität in diesem Abschnitt ist nicht groß: einerseits wird die übertragene Wärme nicht nur zur Verdampfung der Feuchte, sondern auch zur Erwärmung des gesamten Gutes benötigt, andererseits bremst die durch die Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Kern zunehmende Thermofeuchte-Leitfähigkeit die Entfernung der Feuchte.

Mit zunehmender Erwärmung des Gutes verringert sich die Temperaturdifferenz über den Querschnitt des Gutes, die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt zu. In *Abschnitt II* bleibt die Trocknungsgeschwindigkeit praktisch konstant, die Temperaturen von Oberfläche und Kern unterscheiden sich nur wenig und unterliegen geringen Veränderungen. Es stellt sich ein stationärer Zustand ein, der Einfluß der Thermofeuchte-Leitfähigkeit entfällt und der Trocknungsvorgang wird ausschließlich durch die Feuchteleitfähigkeit bestimmt.

In *Abschnitt III* nimmt die Trocknungsintensität wieder ab. Die Verdampfungsgrenze bewegt sich mit zunehmender Erwärmung von der Oberfläche in das Innere des Gutes. Die übertragene Wärme wird nicht mehr nur zur Verdampfung der Feuchte, sondern in zunehmendem Maße zur Erwärmung verwendet. In *Abschnitt III* ist die Partialdruckdifferenz zwischen den inneren und äußeren Schichten des Gutes für den Feuchtetransport zur Guts Oberfläche entscheidend.

Am Ende von *Abschnitt III* ist die Entfernung der Feuchte aus dem Gut beendet, die Guttemperatur nähert sich der Temperatur des Trocknungsmittels. Insgesamt hängt die Trocknungsgeschwindigkeit von den Bedingungen der Wärmeübertragung an der Guts Oberfläche und der Entfernung des Wasserdampfes von der Verdampfungsgrenze ab.

2.6 Energieverbrauch und Nutzungsgrad bei Trocknungsvorgängen

Der *spezifische Energieverbrauch* der Trocknung wird definiert als der Quotient aus dem Energieverbrauch zur Trocknung, der bei thermischen Trocknern den Heizenergiebedarf und den Energiebedarf der Hilfseinrichtungen (Regelung, Antrieb, usw.) umfaßt, und der entzogenen Wassermenge:

$$w = \frac{W_{zu}}{\Delta m_{H_2O}} \quad (2-8)$$

mit:

- w spezifischer Energieverbrauch der Trocknung
- W_{zu} Energieverbrauch zur Trocknung
- m_{H_2O} entzogene Wassermenge

Die bei der thermischen Trocknung theoretisch *minimal aufzubringende Energiemenge* berechnet sich zu:

$$W_a = (m_{H_2O} \cdot c_{H_2O} + m_{BW, tr} \cdot c_{BW}) \cdot \Delta T + r_v \cdot \Delta m_{H_2O} \quad (2-9)$$

mit:

- W_a Aktivenergie
- m_{H_2O} gesamte, in den Trockner mit der Wäsche eingebrachte Wassermenge
- $m_{BW, tr}$ Masse des trockenen Baumwollgewebes
- c_{H_2O} spezifische Wärmekapazität des Wassers, $c_{H_2O} = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg K})$
- c_{BW} spezifische Wärmekapazität der Baumwolle $c_{BW} = 1,34 \text{ kJ}/(\text{kg K})$
- ΔT Temperaturdifferenz zwischen Verdampfungstemperatur und Raumtemperatur
- r_v spezifische Verdampfungsenthalpie von Wasser bei ca. $60 \text{ }^\circ\text{C}$; $r_{v60^\circ\text{C}} = 2.358 \text{ kJ}/\text{kg}$
- Δm_{H_2O} entzogene Wassermenge während der Trocknung

Da der Vorgang der Trocknung weitgehend instationär verläuft, spricht man von einem Nutzungsgrad der Trocknung, nicht von einem Wirkungsgrad. Grundsätzlich ist ein Nutzungsgrad μ definiert als der Quotient von Nutzen zu Aufwand, der Nutzen der thermischen Trocknung ist die Energiemenge, die theoretisch minimal zur Trocknung aufzubringen ist (Aktivenergie). Damit ergibt sich der Nutzungsgrad gemäß Gleichung 2-10.

$$\mu = \frac{W_A}{W_{zu}} \cdot 100\% \quad (2-10)$$

mit:

- μ Nutzungsgrad der thermischen Trocknung
- W_A Aktivenergie
- W_{zu} zugeführte Energie

2.7 Das h_{1+x} , x -Diagramm für feuchte Luft

Kreisprozesse, bei denen die Änderung der Luftfeuchte eine wichtige Rolle spielt, lassen sich anhand eines von Mollier vorgeschlagenen Diagrammes besonders anschaulich darstellen. Dabei wird die spezifische Enthalpie der feuchten Luft h_{1+x} über dem Wassergehalt x aufgetragen, der Index „1+x“ deutet darauf hin, daß in dem Diagramm die Summe der Enthalpien von trockener Luft (1) und Dampf (x) aufgetragen wird.

Das Diagramm nutzt der besseren Ablesbarkeit wegen schiefwinklige Koordinaten. In Abb. 4 ist ein Ausschnitt eines Mollier-Diagramms für feuchte Luft dargestellt; da die Enthalpie der feuchten Luft nicht vom Druck abhängt, gelten die eingezeichneten Isothermen für alle Gesamtdrücke.

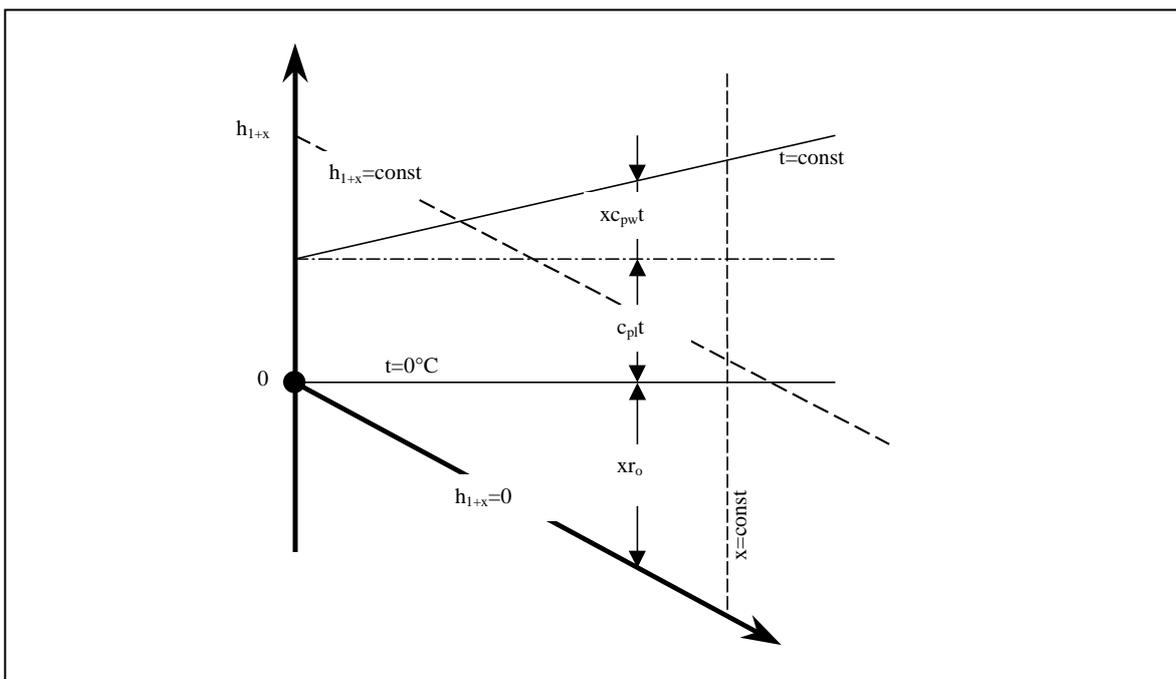


Abb. 4: Ausschnitt aus dem Mollier-Diagramm

Das h-x-Diagramm (der Index „1+x“ wird oft weggelassen) ist eine wichtige Grundlage zur Darstellung und zur Berechnung des Trocknerbetriebs. Im h-x-Diagramm können alle Teilvorgänge des Trocknungsprozesses dargestellt werden, so z.B. die Vorbereitung des Trocknungsmittels durch die Erwärmung von Luft auf die technisch vorgegebene Temperatur bzw. die Mischung von Verbrennungsprodukten mit Luft oder die Entfernung der Gutsfeuchte.

3 Versuchsdurchführung

Im Versuch werden Baumwolltücher durch Benetzen mit Wasser auf eine bestimmte Feuchte gebracht. Anschließend soll den Tüchern diese Feuchtigkeit wieder entzogen werden, wobei fünf verschiedene Trockner Verwendung finden:

- ein Kondensationstrockner,
- ein Trockner mit Wärmepumpe,
- eine Schleuder,
- ein Wringer,
- ein Strahlungstrockner und
- ein Gastrockner.

Mittels eines w,x -Diagramms wird für jedes Trocknersystem der spezifische Energieverbrauch über der relativen Feuchte des Trocknungsguts aufgetragen, um die einzelnen Trocknungsverfahren hinsichtlich Trocknungsgrad und Energieverbrauch vergleichen zu können.

3.1 Schleuder

Verwendet wird eine herkömmliche Haushalts-Wäscheschleuder.

Tabelle 1: Technische Daten Wäscheschleuder

Hersteller		Firma Zanker
Füllgewicht (max.)	[kg]	2,0
Drehzahl	[min ⁻¹]	2.800

Um den Einfluß der wichtigsten Parameter zu untersuchen, sind die Versuche wie folgt durchzuführen:

- Bestimmung des Trockengewichts;
- Befeuchten der Tücher auf das geforderte Naßgewicht (relative Feuchte: 160 %);
- Durchführen der Meßreihen gemäß dem Versuchsprotokoll.

Die Ergebnisse sind in das beiliegende Versuchsprotokoll und w,x -Diagramm (Anlage 1) einzutragen.

3.2 Wringer

Das wohl älteste und einfachste Gerät zur Entwässerung von Wäsche ist der Wringer. Die nasse Wäsche wird durch 2 Walzen gedreht, wodurch das Wasser herausgequetscht wird. Der Wringer wird üblicherweise im Haushalt nicht mehr verwendet, bei der industriellen Trocknung wird dieses Prinzip jedoch eingesetzt.

Tabelle 2: Technische Daten Wringer

Hersteller	Firma Miele
Antrieb	Wechselstrommotor
Antriebsleistung [W]	390

Der Motor besitzt als Anlaufhilfe eine über einen Widerstand betriebene Hilfswicklung, die aber nur im ersten Bereich der Hauptschalterdrehung aktiviert wird. Dreht man den Hauptschalter weiter und bringt ihn in seine Endlage, betreibt nur eine einzelne Hauptwicklung den Läufer. Ein Getriebe ermöglicht es, die Drehrichtung der Walzen umzukehren.

Die Anpresskraft der Walzen ist mittels eines auf eine Blattfeder wirkenden Handrades stufenlos einstellbar. Es wird dabei davon ausgegangen, daß sich die Anpreßkraft der Walzen in etwa proportional zu den Handradumdrehungen verhält, so daß im Versuch wie folgt verfahren werden kann:

- Drehen des Handrades entgegen des Uhrzeigersinns, bis dieses keinen Druck mehr auf die Blattfeder ausübt.
- Von diesem Punkt ausgehend werden die Versuche mit 1, 2 bzw. 3 Handradumdrehungen im Uhrzeigersinn durchgeführt.

Der Energieverbrauch des Wringers wird neben dem Anpreßdruck maßgeblich durch Anzahl der Durchläufe des zu trocknenden Gutes bestimmt. Um den Einfluß dieser Parameter nachzuprüfen, sind 9 Versuchsdurchläufe vorgesehen. Die Vorgehensweise bei der Messung gestaltet sich wie folgt:

- Bestimmung des Trockengewichts;
- Befeuchten der Tücher auf das geforderte Naßgewicht (relative Feuchte: 160 %);
- Da das trockene Holz der Walzen ebenfalls Feuchtigkeit aufnimmt, ist dieses vor Versuchsbeginn mit Wasser zu benetzen;
- Durchführen der Meßreihen gemäß dem Versuchsprotokoll;

Die Ergebnisse sind in das beiliegende Versuchsprotokoll und w,x -Diagramm (Anlage 2) einzutragen. Sollte die Auflösung der vorhandenen Arbeitsmeßgeräte unbefriedigend sein, ist zu überlegen, wie mit den vorhandenen Geräten Verbesserungen zu erzielen sind.

3.3 Kondensationstrockner

Bei dem Gerät handelt es sich um einen Kondensationstrockner, der nach dem Umluft-Prinzip arbeitet, d.h. Umgebungsluft wird zur Kühlung durch den Kondensator geblasen, wo das in der Trocknungsluft enthaltene Wasser auskondensiert.

Um die Vorgänge im Trockner deutlich zu machen, wurde dieser mit verschiedenen Temperatur- und Feuchtefühlern ausgestattet (vgl. Abb.5).

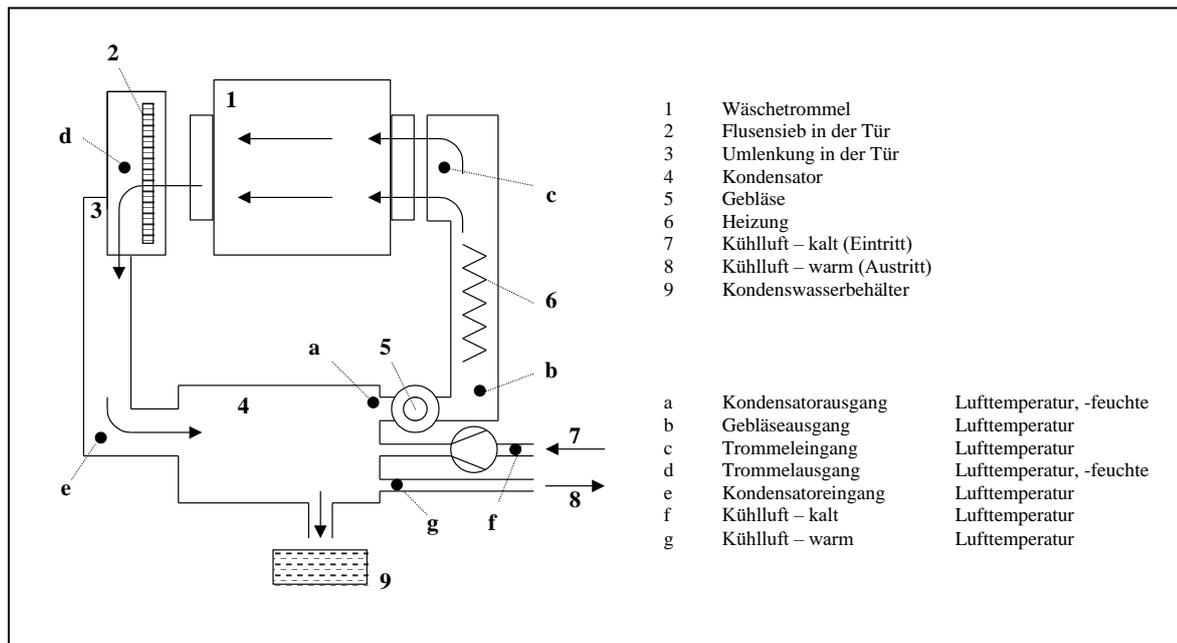


Abb. 5: Platzierung der Meßfühler im Kondensationstrockner

Tabelle 3: Technische Daten Kondensationstrockner

Hersteller	Firma Bauknecht	
Füllgewicht (max.)	[kg]	5,0
Heizleistung	[W]	1.800

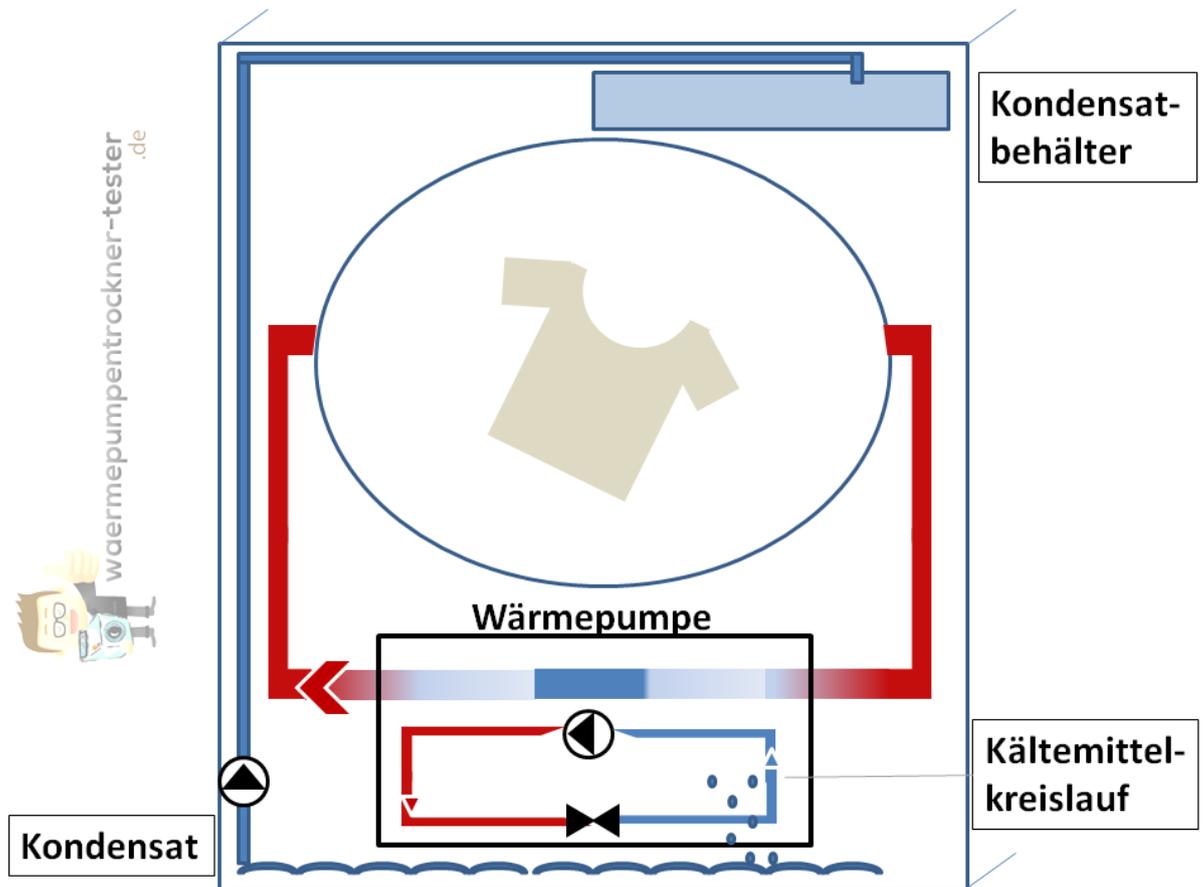
Vorgehen bei der Durchführung der Messungen am Kondensationstrockner:

- Bestimmung des Trockengewichtes;
- Befeuchten der Tücher auf das geforderte Naßgewicht (relative Feuchte: 160 %);
- Programm „schranktrocken“ (Programmmziffer 2) starten;
- Im Abstand der im Versuchsprotokoll angegebenen Zeiten die Tücher entnehmen und den Grad der Entfeuchtung durch Gewichtsmessung feststellen.

Die Ergebnisse sind in das beiliegende Versuchsprotokoll und w,x-Diagramm (Anlage 3) einzutragen.

3.4 Wärmepumpentrockner

Der Wärmepumpentrockner ist ähnlich wie ein handelsüblicher Kondensationstrockner aufgebaut. Allerdings befindet sich im Bereich des Kondensators eine Wärmepumpe.



Der Prozess im Detail:

- Heiße Prozessluft durchströmt den Trommelraum und die darin befindliche Wäsche.
- Die Feuchtigkeit wird in der Trommel von der Luft aufgenommen; warme und feuchte Luft gelangt in die Wärmepumpe
- Warme und feuchte Luft wird mittels eines Kältemittels abgekühlt.
- Die Wärmepumpe nutzt die der feuchten Luft entzogene Energie zur Wiederaufheizung der Luft, welche zur Wäsche geleitet wird.

Tabelle 4: Technische Daten Wärmepumpentrockner

Hersteller	Firma AEG
Füllgewicht (max.) [kg]	8,0
Heizleistung [W]	900

Vorgehen bei der Durchführung der Messungen am Kondensationstrockner:

- Bestimmung des Trockengewichtes;
- Befeuchten der Tücher auf das geforderte Naßgewicht (relative Feuchte: 160 %);
- Programm „Baumwolle schranktrocken“ (Programmziffer 2) starten;
- Im Abstand der im Versuchsprotokoll angegebenen Zeiten die Tücher entnehmen und den Grad der Entfeuchtung durch Gewichtsmessung feststellen.

Die Ergebnisse sind in das beiliegende Versuchsprotokoll und w,x-Diagramm einzutragen.

3.5 Strahlungstrockner

Der in diesem Versuch verwendeten Trockner bietet die Möglichkeit, einem Tuch mittels Strahlung Feuchtigkeit zu entziehen. Zu beachten ist jedoch, daß der Strahlungstrockner keine Idealbedingungen aufweist, was vor allem auf seine offene Bauform zurückzuführen ist.

Tabelle 5: Technische Daten Strahlungstrockner

Hersteller	IER, Uni Stuttgart
Aufnahme	1 Tuch, ca. 46 x 56 cm
Leistung	12 Strahler à 250 W

Um eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Strahlungsleistung und damit der Temperatur auf dem Trocknungsgut zu erzielen, wurde folgende empirische Vorschrift beachtet: Bezeichnet man den Abstand zwischen Strahler und Trocknungsgut mit a und den Abstand zwischen 2 Strahlerachsen mit b , so muß, um eine gleichmäßige Bestrahlung der Guts Oberfläche zu gewährleisten, bei quadratischer Anordnung der Strahler zueinander $b \leq 0,8 a$ gewählt werden. Um an den Randzonen einen starken Abfall der Bestrahlungsstärke zu vermeiden, wurde die äußere Strahlerreihe über der Außenkante des Trocknungsgutes angeordnet. Zudem ist die Möglichkeit einer kontinuierlichen Gewichtsmessung gegeben, da der Spannrahmen des Tuches auf einer Digitalwaage aufliegt.

Die Durchführung der Messung gestaltet sich wie folgt:

- Bestimmung des Trockengewichtes;
- Befeuchten des Tuches auf das geforderte Naßgewicht (relative Feuchte: 160 %);
- Durchführen der Meßreihen gemäß dem Versuchsprotokoll.

Die Ergebnisse sind in das beiliegende Versuchsprotokoll und w,x-Diagramm (Anlage 4) einzutragen.

3.6 Gastrockner

Für den Versuch wird ein gasbeheizter Abluft-Trockner verwendet.

Tabelle 6: Technische Daten Gastrockner

Hersteller		White Knight
Füllgewicht (max.)	[kg]	4,5
Brennerleistung	[kW]	4,7

Bei der Durchführung der Messungen am Gastrockner wird wie folgt vorgegangen:

- Bestimmen des Trockengewichtes;
- Befeuchten der Tücher auf das geforderte Naßgewicht (relative Feuchte: 160 %);
- Im Abstand der im Versuchsprotokoll angegebenen Zeiten die Tücher entnehmen und den Grad der Entfeuchtung durch Gewichtsmessung feststellen.

Die Ergebnisse sind in das beiliegende Versuchsprotokoll und w,x-Diagramm (Anlage 5) einzutragen.

3.7 Auswertung

Um einen Überblick über Anwendungsbereich und spezifischen Energieverbrauch der untersuchten Trocknungsverfahren zu erhalten, werden die in den Versuchen ermittelten Daten vergleichend gegenübergestellt. Dazu wird das Diagramm in Anlage 6 verwendet, in dem der spezifische Energieverbrauch über der Feuchte aufgetragen ist. Um die weite Spanne der Werte zu erfassen, wird dieser logarithmisch dargestellt.

In einem zweiten Schritt werden die Energiebilanzen der thermischen Trocknungsverfahren Konvektionstrockner und Strahlungstrockner erstellt (Anlage 7). Die Energieflüsse sind in der Einheit kWh und in % der eingesetzten Endenergie (Strom) anzugeben.

4 Vorarbeiten

Um den zeitlichen Aufwand der Versuchsdurchführung zu reduzieren und um sich mit dem Thema schon im Vorfeld auseinanderzusetzen, werden von den Teilnehmern Vorarbeiten geleistet. Anhand zur Verfügung gestellter Daten eines Kondensationstrockners sollen die Zustände des Trocknungsmittels Luft in ein h_{1+x} - x -Diagramm eingezeichnet werden. Weiterhin sollen Vorschläge über das konzeptionelle Vorgehen zur Erstellung einer Energiebilanz in Form eines Sankey-Diagrammes für den Konvektions- und Strahlungstrockner gemacht werden.

4.1 h_{1+x} - x -Diagramm für das Trocknungsmittel Luft im Kondensationstrockner

Für den im Versuch betrachteten Kondensationstrockner sind für zwei verschiedene Betriebspunkte folgende Daten gemessen worden:

Tabelle 7: Meßdaten verschiedener Betriebspunkte des Kondensationstrockners

Meßstelle	Lufttemperatur [°C]	
	nach 10 min. Trocknungszeit	nach 45 min. Trocknungszeit
Kondensatorausgang	39	48
Trommeleingang	74	88
Trommelausgang	47	58
Kondensatoreingang	49	62

Anhand dieser Meßwerte ist für die angegebenen Zeitpunkte der jeweilige Prozeß, den das Trocknungsmittel durchläuft, in das beigegefügte h_{1+x} - x -Diagramm einzutragen.

4.2 Energiebilanz des Konvektionstrockners und des Strahlungstrockners

Für die thermischen Trockner sollen im Rahmen des Praktikums jeweils eine Energiebilanz erstellt werden. In möglichst hoher Genauigkeit sollen zu- und abgeführte Energieströme quantitativ erfaßt und in einem Sankey-Diagramm dargestellt werden. An dieser Stelle soll das konzeptionelle Vorgehen bei der Erstellung der Energiebilanz vorbereitet werden. In diesem Zusammenhang sind folgende Fragen zu beantworten:

- Wie detailliert bzw. welche Einflüsse können in der Energiebilanz dargestellt werden ?
- Wie bestimmt man die Größen der einzelnen Energieflüsse ?
- Wie kann man beim Kondensationstrockner die mit der Kühlluft abgeführte Feuchte bestimmen ? (Hinweis: die kondensierte Wassermenge im Wassertank kann mit den vorhandenen Meßeinrichtungen nicht bestimmt werden)

Auswertung – Energiebilanz Strahlungstrockner

An Meßinstrumenten stehen zur Verfügung:

- Meßgeräte für elektrische Arbeit,
- Feuchte- und Temperaturmeßgerät,
- Waage,
- Meßaufnehmer im Kondensationstrockner (vgl. Abb. 7).

Beim Kondensationstrockner ist zudem zu berücksichtigen:

- Der Kühlluftstrom des Kondensationstrockners kann bauartbedingt während des Kondensationsprozesses befeuchtet werden.
- Der Volumenstrom der Kühlluft ist konstant und beträgt $3,5 \text{ m}^3/\text{min}$