



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

ENERGIESPARENDER, WÄSCHE- SCHONENDER TROCKNER

THERMODYNAMIK UND FUNKTIONSMUSTER

Schlussbericht der 1. Phase

Ausgearbeitet durch

Dr. Markus Friedl, awtec AG für Technologie und Innovation

Leutschenbachstr. 48, 8050 Zürich, markus.friedl@awtec.ch, www.awtec.ch

Urs Weilenmann, awtec AG für Technologie und Innovation

Leutschenbachstr. 48, 8050 Zürich, urs.weilenmann@awtec.ch, www.awtec.ch

Impressum

Datum: 28. November 2006

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm
Elektrizität

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Koordinator: *felix.frey@bfe.admin.ch*

Projekt- und Vertragsnummer: 101681 / 152033

Bezugsort der Publikation: *www.energieforschung.ch / www.electricity-research.ch*

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor
dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung eines Wäschetrockners, der energieeffizient ist (Klasse A), die Wäsche schonend trocknet und nicht teurer als marktübliche Trockner ist. Dieses Ziel soll mit einem Vakuumentrockner mit Rekuperation erreicht werden.

Vakuumentrockner mit Rekuperation

Die thermodynamische Analyse hat gezeigt, dass mit dem vorgeschlagenen Konzept die Effizienz der heute leistungsfähigsten Trockner erreicht werden kann. Der kritische Parameter ist dabei der Wärmeübergang an der Innenseite der Trommel. Je grösser dieser ist, desto effizienter wird der Trockner. Eine Quantifizierung dieses Wärmeübergangs wird erst mit dem Funktionsmuster möglich sein.

Top-Effizienz ist erreichbar

Dieser Bericht beschreibt die thermodynamische Analyse sowie den Aufbau des Funktionsmusters. Die in diesem Bericht vorgestellten Berechnungen wurden im stationären Zustand durchgeführt. Zur Interpretation der Tests mit dem Funktionsmuster wird eine zeitabhängige Modellierung benutzt werden.

Stationäre Rechnungen

Das Funktionsmuster wird in der nächsten Projektphase gebaut und in Betrieb genommen. Durch diverse Mess- und Testreihen soll die Energieeffizienz nachgewiesen werden und der optimale Prozessverlauf gefunden werden.

Bau des Funktionsmusters in 2. Phase

Abstract

The goal of this project is to develop a tumble-dryer with high energy-efficiency (class A), which dries laundry gently and which does not cost more than usual dryers. This goal is to be achieved with a tumble-dryer with heat recuperation.

**Tumble-dryer
with heat
recuperation**

The thermodynamic analysis showed that with the suggested concept the efficiency of the most efficient dryers can be reached. The critical parameter is thereby the heat transfer at the inside of the dryer-drum. The greater this transfer is, the more efficient the dryer will be. A quantification of this heat transfer will be possible only with the operating model.

**Top efficiency is
attainable**

This report describes the thermodynamic analysis as well as the design of the operating model. The computations presented in this report are based on stationary conditions. For the interpretation of the tests with the operating model a time-dependent computation will be used.

**Stationary
computations**

In the next project phase the operating model will be manufactured. By various measurements and tests the energy efficiency is to be demonstrated and the parameters for an optimal drying-process are to be found.

**Manufacturing
of the operating
model in 2nd
Phase**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Thermodynamisches Modell	2
2.1	Betrachtungen am stationären Zustand.....	5
2.2	Schlussfolgerungen	10
3	Funktionsmuster	13
3.1	Komponenten.....	13
3.1.1	Trommel.....	14
3.1.2	Struktur und Trommelaufhängung.....	15
3.1.3	Antrieb der Trommel.....	16
3.1.4	Zusatzheizung	17
3.1.5	Vakuumschluss.....	18
3.1.6	Verdichter.....	18
3.1.7	Isolation.....	19
3.2	Instrumentierung.....	20
3.2.1	Temperaturmessung.....	20
3.2.2	Druckmessung.....	21
3.2.3	Leistungsmessung.....	21
3.2.4	Massenstrommessung.....	21
3.2.5	Dampfmessung.....	22
Anhang		
A1.	Nomenklatur	23
A2.	Bibliographie	25

1 Einleitung

Um das Funktionsmuster auslegen zu können, und um die zu erwartende Effizienz des neuen Trocknerkonzeptes abschätzen zu können, wurde ein thermodynamisches Modell erarbeitet, das die Prozesse des Trockners quantitativ beschreibt. Dieses Modell wird im ersten Teil dieses Berichts präsentiert. Im Kapitel 2 wird das Modell und seine Annahmen vorgestellt. Besonderes Augenmerk gilt dem konvektiven Wärmeübergang innen an der Trommel, der theoretisch mit zwei Referenzfällen aus der Theorie behandelt wird.

Warum ein thermodynamisches Modell

Das Modell wurde als Visual Basic Code programmiert und Benützt EXCEL für die Ein- und Ausgabe. Es ermöglicht sowohl stationäre Berechnungen als auch instationäre Berechnungen. Letztere wurden bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht durchgeführt und werden in der Phase des Funktionsmusters eine Rolle spielen.

Umsetzung als Visual Basic Code

Im Kapitel 3 wird der Aufbau des Funktionsmusters beschrieben. Das Funktionsmuster, welches die Messung der relevanten Prozessgrößen erlaubt, wird in einer nächsten Phase hergestellt und in Betrieb genommen. Damit soll einerseits der grundsätzliche Funktionsnachweis erbracht werden und andererseits wird das thermodynamische Modell durch Messungen gestützt und allenfalls optimiert.

Funktionsmuster zur Verifizierung des theoretischen Modells

2 Thermodynamisches Modell

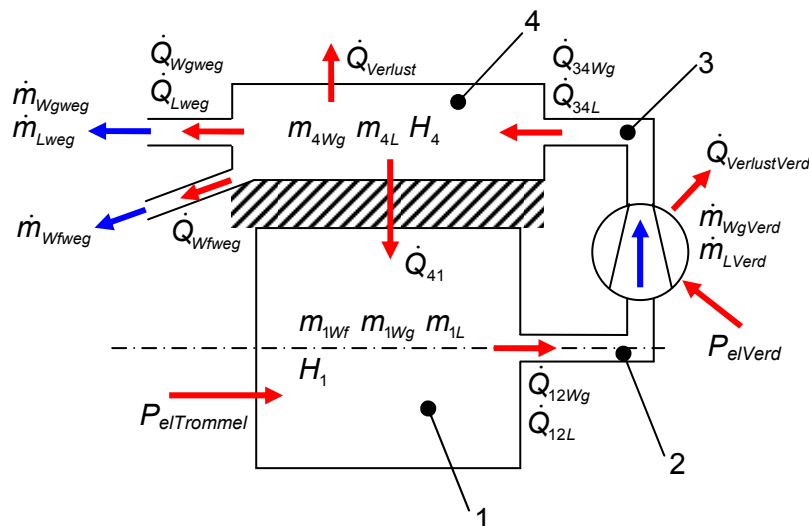


Abb. 1: Thermodynamisches Modell des Wäschetrockners. Die Zahlen 1 bis 4 bezeichnen die vier Zustände des aus der Trommel geförderten Inhalts. Mit blauen Pfeilen sind die Massenströme eingezeichnet, mit roten Pfeilen die Leistungsströme. Erklärung der Zeichen siehe Anhang A1.

Das Modell des Trockners ist in Abb. 1 dargestellt. Der Inhalt der Trommel wird von einem Verdichter aussen an der Trommel vorbei an die Umgebung gefördert. Dabei kondensiert ein Teil am Äußern der Trommel. Das Modell macht die folgenden Annahmen:

- Das gasförmige Medium im Trockner ist ein Gasgemisch bestehend aus Luft und Wasserdampf. Bei den beiden Komponenten handelt es sich um „ideale“ Gase, das Gemisch ist ein „ideales“ Gasgemisch¹.
- Zustand 1: Die Gasphase und flüssige Phase sind im Gleichgewicht. Die gasförmige Phase enthält genau so viel Wasser, wie sie aufgrund der Partialdrücke aufnehmen kann. Falls das Gemisch Luft enthält, kann man von einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100% sprechen. Die Temperatur des flüssigen Wassers in der Trommel, das sich in der Wäsche befindet, ist gleich wie die Temperatur der Gasphase in der Trommel.

Quantitative Erfassung

Gasgemisch aus Luft und Wasserdampf

Zustand 1

¹ „ideale“ Gase und „ideale“ Gasgemische sind thermodynamische Begriffe und erlauben gewisse Vereinfachungen, die bei den hier betrachteten Drücken sehr genau sind.

- Anders als der Zustand 1 besteht der Zustand 4 nur aus einer Gasphase. Es wird angenommen, dass alles was kondensiert, sofort abgeführt wird. Da Kondensation auftritt, ist die Temperatur gleich der Sattdampf Temperatur, die zum Partialdruck des Wassers im Zustand 4 gehört. Der Zustand 4 ist am Anfang der Simulation stationär. **Zustand 4**
 - Es werden keine Strömungswiderstände berücksichtigt. **Strömungswiderstand**
 - Die Trommel hat keine Wärmekapazität. Es braucht keine Energie, um sie aufzuheizen. Deswegen steigt ihre Temperatur sobald etwas kondensiert auf die Kondensationstemperatur. **Trommel**
 - Der Wärmeübergang aussen an der Trommel wird als perfekt angenommen. Als Folge davon ist die Temperatur im Aussenraum gleich der Temperatur an der Wand. Diese Annahme ist sinnvoll, da durch die Kondensation eines Teils des Wasserdampfs eine Strömung in Richtung Wand induziert wird². **Wärmeübergang ausserhalb der Trommel**
- Die Knacknuss der Modellierung ist der Wärmeübergang innen an der Trommel. Er bestimmt gleichzeitig die Effizienz des Trockners. Für den konvektiven Wärmeübergang verwendet das Modell 2 Referenzfälle, welche keine präzise Beschreibung der Realität darstellen aber die besten verfügbaren Annäherungen sind. Eine manuelle Eingabe erlaubt es, den Wärmeübergang um einen Faktor besser oder schlechter als diese Referenzfälle einzustellen³.
- Ebene Platte: Es wird der Wärmeübergang einer ebenen Platte berechnet, die gleich lang ist, wie der Umfang der Trommel. Der ebenen Platte entlang herrscht eine erzwungene Strömung mit der gleichen Geschwindigkeit, wie die Umfangsgeschwindigkeit der Trommel. **Ebene Platte**
 - Rührer: Ein zylindrischer Tank mit einem Rührwerk ist dasjenige Beispiel aus der Literatur, das der hier vorliegenden Anwendung des Trockners am nächsten kommt. Unabhängig von der Ausprägung des Rührwerks liegen die Wärmeübergangskoeffizienten in der gleichen Grössenordnung. **Rührer**

² Der Benutzer des Modells hat die Möglichkeit, einen Referenzfall zu wählen: Der Wärmeübergang einer einphasigen Strömung in einem Ringspalt, wobei sich die Strömungsgeschwindigkeit aus der Strömung der Gasphase in axiale Richtung und der Drehgeschwindigkeit der Trommel ergibt. Der Benutzer kann angeben, um wie viel besser oder schlechter der Wärmeübergang im Vergleich zu diesem Referenzfall ist. Da der Referenzfall die Kondensation und somit die Strömung in Richtung Wand nicht mitberücksichtigt, ist davon auszugehen, dass der Wärmeübergang entscheidend unterschätzt wird. Beim Modell wird ein perfekter Wärmeübergang eingestellt, indem der Benutzer eingibt, dass der Wärmewiderstand gleich null mal der Wärmewiderstand des Referenzfalls ist.

³ Die Idee, aus der Literatur angegebene typische Wärmeübergangskoeffizienten (z.B. $\alpha_i = 20$ für Radiatoren in Gebäuden) zu verwenden, wurde wieder verworfen. Es hat sich gezeigt, dass der Wärmeübergang stark vom Unterdruck in der Trommel abhängt (siehe Abb. 2) und somit kaum mit Erfahrungswerte bei Umgebungsdruck abgeschätzt werden kann.

In beiden Referenzfällen hängt der Wärmeübergang von der Umfangsgeschwindigkeit der Trommel ab. Das ist nicht so abwegig, solange die Wäsche nicht durch die hohe Drehgeschwindigkeit der Trommel an die Wand gedrückt wird. Die Wärmeübergangskoeffizienten der beiden Referenzfälle sind in Abhängigkeit des Drucks in der Trommel für drei Fälle in Abb. 2 gezeigt. Zusätzlich zum konvektiven Wärmeübergang erfolgt auch ein Strahlungsaustausch zwischen Trommel und Wäsche. Als Vergleich sind die Wärmeübergangskoeffizienten aussen an der Trommel und derjenige durch Wärmeleitung in Tab. 1 angegeben.

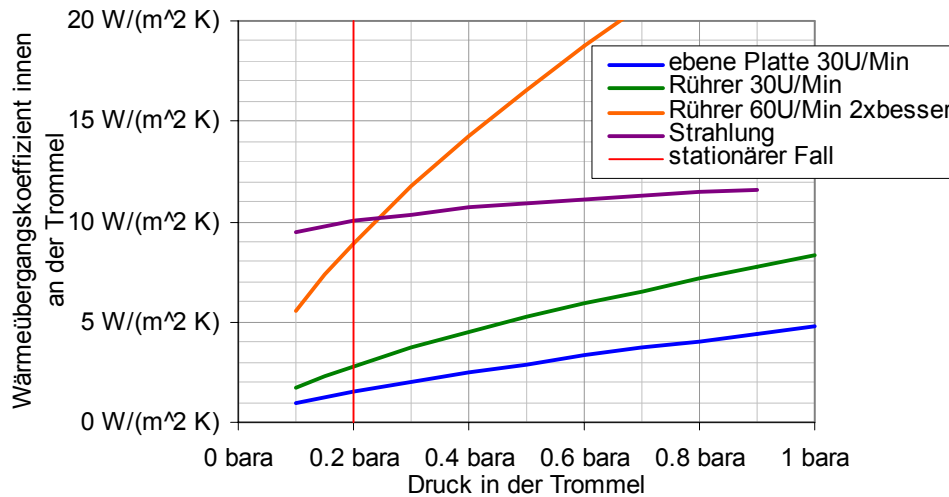


Abb. 2: Wärmeübergangskoeffizienten mit den Referenzfällen „ebene Platte“ und „Rührer“ für 30 und 60 Umdrehungen pro Minute. Die rote Linie zeigt den im nächsten Kapitel behandelten stationären Fall.

	Wärmeübergangskoeffizient α
10mm Ringspalt aussen 1bara 30U/Min.	13.2 W/(m ² K)
10mm Ringspalt aussen 1bara 60U/Min.	14.3 W/(m ² K)
Wärmeleitung durch die Trommel mit 2 mm Wandstärke	8530 W/(m ² K)
Konvektiver Wärmeübergang innen	siehe Abb. 2
strahlungsbedingter Wärmeübergang innen bei 0.2 bara	10.0 W/(m ² K)

Tab. 1: Werte einiger Wärmeübergänge.

Werden die in Abb. 2 gezeigten Wärmeübergangskoeffizienten mit der Fläche und der Temperaturdifferenz verrechnet, so erhält man die in Abb. 3 gezeigte übertragene Wärme. Die Fläche ist unabhängig vom Druck in der Trommel, die Temperaturdifferenz hängt stark davon ab. Somit verändern sich die Kurven und streben für den Druck von 1 bara (wo $\Delta T = 0$) gegen null.

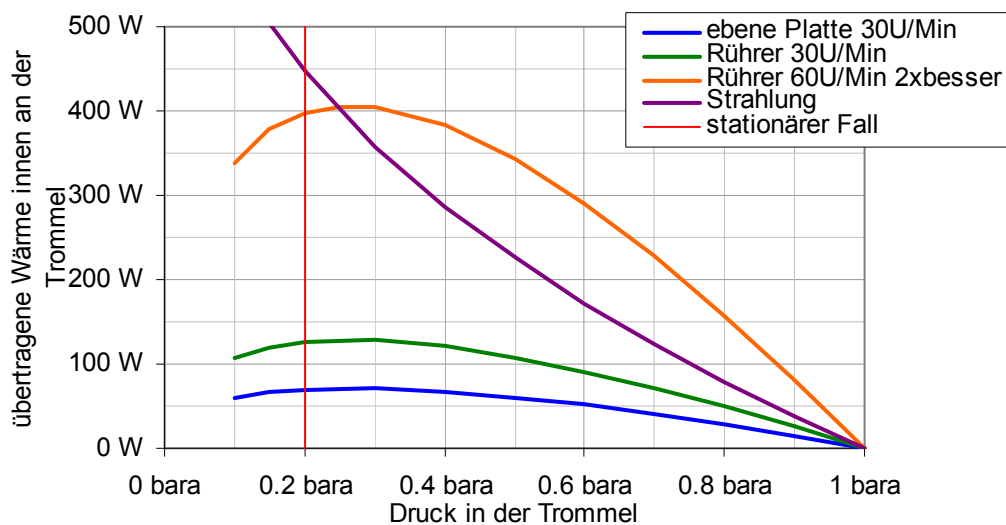


Abb. 3: übertragene Wärme innen an der Trommel für die drei Modellfälle und die Strahlung. Die rote Linie zeigt den im nächsten Kapitel behandelten stationären Fall.

2.1 Betrachtungen am stationären Zustand

In diesem Abschnitt werden anhand des stationären Zustands im anvisierten Betriebspunkt grobe Daten für die Auslegung des Funktionsmusters ermittelt. Die Trommel hat einen Durchmesser von 600 mm und eine axiale Ausdehnung von 600 mm. Der anvisierte Betriebspunkt ist bei 0.2 bara in der Trommel, woraus sich eine Temperatur von 60.2 °C ergibt.

**0.2 bara und
60 °C**

Aufgrund der Verfügbarkeit an elektrischer Leistung an einer normalen Steckdose, ist eine Heizleistung von maximal 1000 Watt sinnvoll. Nach ersten Informationen von Verdichterherstellern⁴, ist von herkömmlichen Verdichtern eine isentrope Effizienz η_{isentr} von 40-50 % zu erwarten. In dieser Betrachtung wurde einerseits diese Effizienz übernommen mit der weiteren Annahme, dass die Wärme der Hälfte dieser Verluste im Gas landet und die andere Hälfte an die Umwelt abgegeben wird ($\eta_{ind,isentr}$ in der Mitte von 100 und 50 % also bei 75 %). Andererseits wurde auch ein perfekter Verdichter mit 100 % Wirkungsgrad berücksichtigt. Um die Wärmeübergänge zu berechnen wurden Drehgeschwindigkeiten von 30 und 60 Umdrehungen/Min. berücksichtigt. Die Menge an flüssigem Wasser, das aus der Wäsche transportiert werden muss ergibt sich aus der vom Trockner zu trocknenden Wäschemenge von 7 kg Trockengewicht und der Norm EN - 61121, die festlegt, dass „Normwäsche“ 70 % ihres trockenen

**Begründung der
gewählten Para-
meter aus Tab. 2**

⁴ Zephyr Vakuumpumpe des Herstellers „Rietschle Thomas“

Gewichts als Wasser enthält⁵. Ein Überblick über alle verwendeten Parameter ist in Tab. 2 gezeigt.

Durchmesser der Trommel	$d =$	600 mm
Axiale Länge der Trommel	$L_{Trommel} =$	600 mm
Wanddicke der Trommel	$w_{Trommel} =$	2 mm
Druck in der Trommel	$p_1 =$	0.2 bara
Temperatur in der Trommel	$T_1 =$	60.2 °C
Heizleistung in der Trommel	$P_{elTrommel} =$	1000 W
Antriebsleistung, um die Trommel zu drehen.		100 W
Induzierte isentrope Verdichtereffizienz	$\eta_{ind, isentr} =$	100 & 70 %
Isentrope Verdichtereffizienz	$\eta_{isentr} =$	100 & 50 %
Drehgeschwindigkeit der Trommel:	$f =$	30 und 60 U/Min.
perfekter Wärmeübergang aussen an der Trommel.	$R_a =$	0 K/W
Anfängliche Menge an flüssigem Wasser	$m_{Wf}(0) =$	5 kg
Emmissionskoeffizient innen an der Trommel	$\epsilon_{Wandl} =$	100 %
Emmissionskoeffizient der Wäsche	$\epsilon_{Waesche} =$	100 %

Tab. 2: Wichtige Kenngrößen der Berechnungen im stationären Zustand. Erklärung der Variablen in Anhang A1.

Die Dauer des Trocknungsprozesses hängt vom Fördervolumen des Verdichters ab und von der Dichte des Mediums an seinem Eintritt. Letztere ist durch Druck und Temperatur in der Trommel gegeben. Der Zusammenhang ist in Abb. 4 dargestellt. Beim anvisierten Betriebspunkt von 0.2 bara muss der Verdichter 25 m³/h fördern, um 5 kg Wasser innerhalb von 90 Minuten aus der Trommel zu entfernen.

Verdichter bestimmt Dauer des Trocknungsprozesses

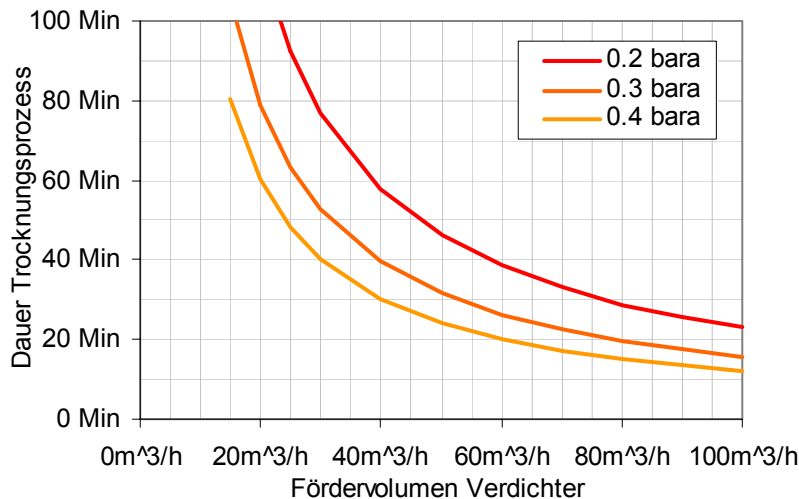


Abb. 4: Dauer des Trocknungsprozesses in Abhängigkeit des Fördervolumens des Verdichters für verschiedene Drücke in der Trommel berechnet aus einer stationären Betrachtung.

⁵ [2] Wehrli (2003) Seite 15.

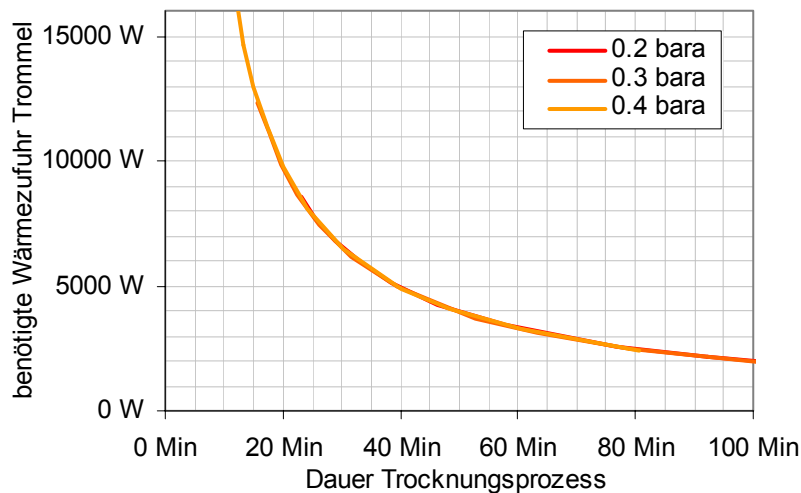


Abb. 5: Benötigte Wärmezufuhr in die Trommel in Abhängigkeit von der Dauer des Trocknungsprozesses für drei Drücke in der Trommel.

Um in der Trommel einen Druck von 0.2 bara aufrecht zu erhalten muss gleich viel Wärme zugeführt werden wie durch den Wasserdampf abgeführt wird. Je nach Förderleistung des Verdichters – und somit je nach Dauer des Trocknungsprozesses – ist diese Leistung unterschiedlich gross. Dieser Zusammenhang ist für die drei Drücke 0.2, 0.3 und 0.4 bara in Abb. 5 visualisiert. Da sich die Verdampfungsenthalpien bei den drei Drücken kaum unterscheiden, liegen die drei Kurven aufeinander.⁶

Die folgenden Betrachtungen beschränken sich auf den Betriebspunkt von 0.2 bara in der Trommel und werden mit den folgenden drei Modellen für den konvektiven Wärmeübergang innen an der Trommel gemacht, deren Wärmeübergangskoeffizienten in Tab. 1 angegeben sind⁷:

- ebene Platte mit 30 Umdrehungen pro Minute
- Rührer mit 30 Umdrehungen pro Minute
- Rührer mit 60 Umdrehungen pro Minute, wobei der Wärmeübergang im Vergleich zum Modell durch geeignete Massnahmen um den Faktor 2 gesteigert wurde.

Die in die Trommel benötigte Wärmezufuhr ist in Abb. 6 den gemäss den drei Wärmeübergangsmoellen auftretenden Wärmeströmen gegenübergestellt. Es wird ersichtlich, dass eine Lücke besteht, die durch eine Verbesserung des Wärmeübergangs innen an der Trommel und durch eine elektrische Heizung ($P_{elTrockner}$ in Abb. 1) geschlossen werden muss. Wird diese Lücke nicht geschlossen, so sinken Druck und Temperatur in der Trommel weiter ab, der Wärmestrom \dot{Q}_{41} nimmt aufgrund der grösseren

3 Fälle für konvektiven Wärmeübergang innen

Benötigte Wärmezufuhr in die Trommel.

⁶ Bei der Berechnung der durch den Wasserdampf abgeführten Leistung ist darauf zu achten, dass als Referenztemperatur die Temperatur in der Trommel eingesetzt wird. Die spezifische Enthalpie des Wasserdampfs ist somit die Verdampfungsenthalpie des Wassers beim in der Trommel herrschenden Druck.

⁷ Beschreibung der Modelle im Kapitel 2.

Temperaturdifferenz zu und der Verdichter hat zunehmend Mühe, die Druckdifferenz zu bewältigen und wird ineffizient.

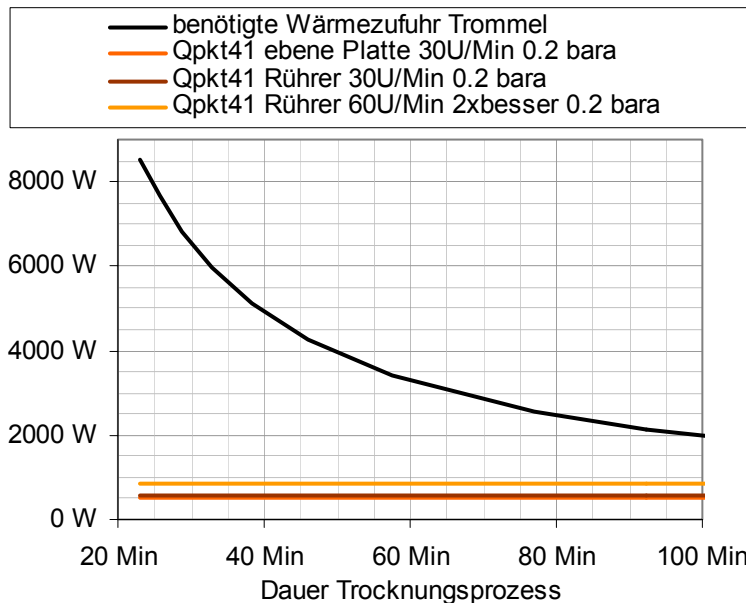


Abb. 6: Vergleich zwischen benötigter Wärmezufuhr in die Trommel und durch die Trommel hindurch geleitete Wärmemenge \dot{Q}_{41} gemäss den drei beschriebenen Modellen für den Wärmeübergang innen an der Trommel.

Abb. 6 zeigt ebenfalls, dass bei einer Trocknungszeit von 90 Minuten die Lücke mit der zur Verfügung stehenden Heizleistung von 1000 Watt und im Vergleich mit den Modellen verbesserten Wärmeübergang zu schliessen ist. Der geforderte konvektive Wärmeübergangskoeffizient in Funktion der Trocknungszeit ist in Abb. 7 gezeigt und mit den aus den Modellen berechneten Wärmeübergangskoeffizienten verglichen. Die mittels Strahlung übertragene Wärme wurde berücksichtigt. Sie kann durch eine dunkle Oberfläche innen an der Trommel verbessert werden. Für die Berechnungen hier wurde bereits eine schwarze Oberfläche angenommen. Somit besteht im Vergleich mit den Rechnungen nur noch Verbesserungspotential beim konvektiven Wärmeübergang. Es ist realistisch, dass mit geeigneten Massnahmen ein konvektiver Wärmeübergangskoeffizient von $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ erreicht werden kann. Die $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ für kleine Trocknungszeiten sind nicht realistisch. Klarheit über die erreichbaren Wärmeübergangskoeffizienten kann schliesslich nur das Funktionsmuster liefern.

Schliessen der Lücke aus Abb. 6.

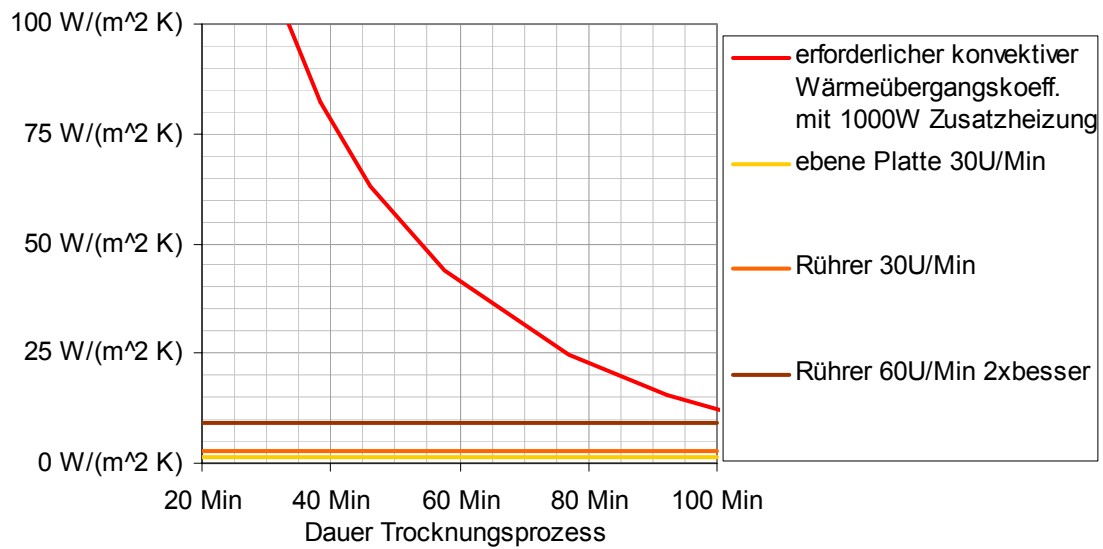


Abb. 7: Erforderlicher konvektiver Wärmeübergangskoeffizient innen an der Trommel, um bei 0.2 bara Druck und 1000 Watt Zusatzheizung den stationären Zustand aufrecht zu erhalten. Als Vergleich sind die mit den Modellen berechneten Wärmeübergangskoeffizienten aus Tab. 1 angegeben. Beachte: Zusätzlich zur Konvektion wird Wärme mittels Strahlung übertragen, was in diesen Werten berücksichtigt ist.

Unter der Annahme, dass die Wärmeübergangskoeffizienten aus Abb. 7 erreicht werden können, ist in Abb. 8 die gesamte elektrische Leistungsaufnahme des Trockners gezeigt. Vergleicht man die Zahlen mit der maximal aus einer normalen Steckdose zu beziehenden Leistung von 2300 Watt⁸, so wird ersichtlich, dass bei 90 Minuten Trocknungszeit auch mit einem ineffizienten Verdichter noch eine Reserve vorhanden ist, um z.B. mehr als 1000 Watt in der Trommel zu heizen.

Elektrische Leistungsaufnahme

⁸ 10 Ampère und 230 Volt.

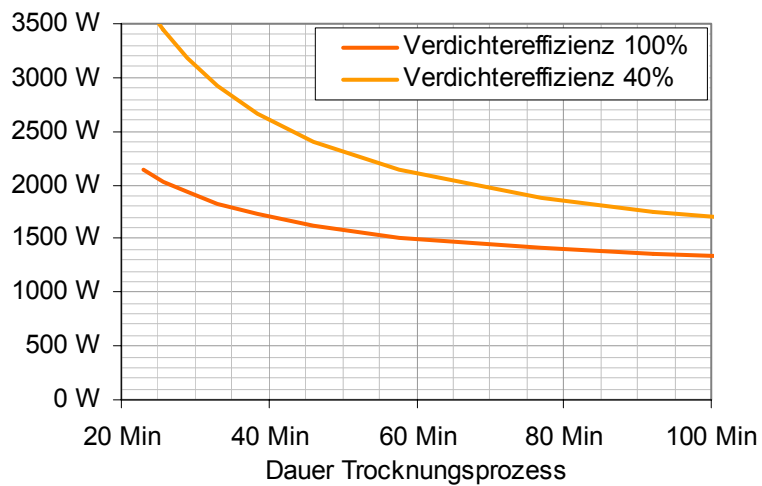


Abb. 8: Gesamte Leistungsaufnahme durch den Motor zum Drehen der Trommel (100 W), die Zusatzheizung (1000 W) und den Verdichter.

2.2 Schlussfolgerungen

Die gesamte Energieaufnahme des Trockners pro Gewicht trockener Wäsche mit verschiedenen Wärmeübergangskoeffizienten innen an der Trommel ist in Abb. 9 dargestellt und wird mit den effizientesten zur Zeit erhältlichen Trocknern aus Tab. 3 verglichen. Zum Vergleich sind die Kurven auch angegeben für einen idealen Trockner mit 100 % Effizienz.

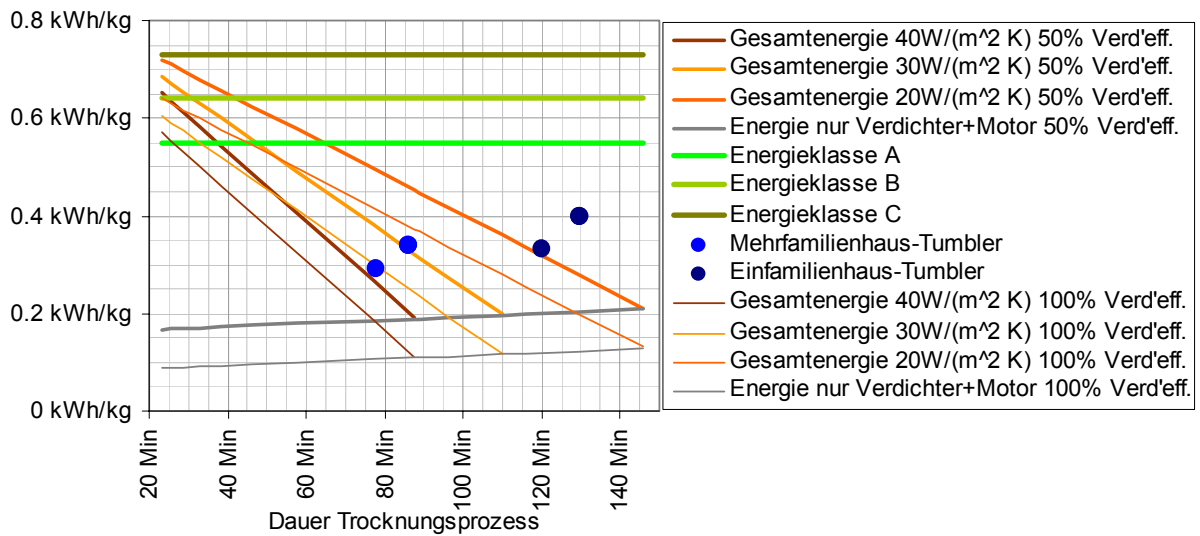


Abb. 9: Energieeffizienz des modellierten Trockners mit 100 W Leistung, um die Trommel zu drehen, einem Verdichter mit 50% Effizienz⁹ und einem Wärmeübergangskoeffizienten innen an der Trommel von 40, 30 und 20 W/(m² K). Energieklassen aus EN61121 für Kondensations-trockner¹⁰. Daten von Mehr- und Einfamilienhaus-Trocknern gemäss Tab. 3.

	Trocknungszeit	Energieaufwand	Preis
Mehrfamilienhaus-Trockner			
V-ZUG Unimatic TW282	78 Min	0.29 kWh/kg	CHF 6550
Merker VENTO 610 WP	86 Min	0.34 kWh/kg	CHF 6290
Schulthess SPIRIT TOPLINE TWP 6706	86 Min	0.34 kWh/kg	CHF 6290
Einfamilienhaus-Trockner			
FORS TKF-1350 A	120 Min	0.33 kWh/kg	CHF 2790
AEG LAVATHERM 8040 TW	130 Min	0.4 kWh/kg	CHF 3280
Electrolux EDH 6370	130 Min	0.4 kWh/kg	CHF 3280

Tab. 3: Effizienzen der besten zur Zeit erhältlichen Trockner gemäss www.topten.ch. Energieaufwand in kWh pro Gewicht trockene Wäsche.

- Je mehr Wärme von ausserhalb der Trommel ins Innere der Trommel fliesst, desto effizienter wird der Trockner. Der Flaschenhals dabei ist der Wärmeübergang innen. Je grösser dieser Wärmeübergang ist, desto effizienter ist der Trockner. Beim gegenwärtigen Stand des Wissens, ist es unsicher, welche Wärmeübergangskoeffizienten erreicht werden können. Die benutzten Modelle zeigen, dass die geforderten Wärmeübergangskoeffizienten erreicht werden können.

Je mehr Wärme von aussen nach innen desto besser

⁹ Von den bis 100% fehlenden Effizienz bleibt die Hälfte im Prozess, die andere Hälfte wird nach aussen abgegeben. Übersetzt in thermodynamische Terminologie heisst das, dass der induzierte, isentrope Wirkungsgrad $\eta_{ind, isentr} = 0.75$ und der isentrope Wirkungsgrad $\eta_{isentr} = 0.50$ beträgt.

¹⁰ [2] Wehrli (2003) Seite 14

- Der Betriebspunkt von 0.2 bara und 60 °C in der Trommel ist gut gewählt. Bei einem höheren Druck ist bei einer bestimmten Dauer des Trocknungsprozesses gleich viel Wärmezufuhr in die Trommel notwendig (Wärmeleitung \dot{Q}_{41} durch die Trommel plus elektrische Heizung $P_{elTrommel}$), um den Zustand aufrecht zu erhalten (siehe Abb. 5). Die durch die Trommel geleitete Wärme wird bei gleichem Wärmeübergangskoeffizient wegen des kleineren Temperaturunterschieds bei höheren Drücken jedoch kleiner. Deswegen ist der Druck möglichst tief zu halten. **0.2 bara in der Trommel sind gut**
- Die Wärmeübertragung von der Trommel auf die Wäsche durch Strahlung ist wichtig. Deshalb muss die Oberfläche der Trommel innen einen hohen Emissionskoeffizienten aufweisen **Trommel innen**
- Isolation gegen die Umgebung: Obwohl in dieser stationären Betrachtung ein perfekter Wärmeübergang aussen an der Trommel angenommen wurde, ist die Gasphase in der Realität etwas wärmer als die Trommel. Die isolierte Wand muss wärmer sein als die Aussenwand der Trommel, sodass der kälteste Ort die Trommel selber ist und die Kondensation nur dort stattfindet. Vergleicht man die Leistungen, die in die Trommel gehen und diejenige, die mit dem Wasserdampf den Trockner verlässt, so findet man, dass für alle gerechneten Konstellationen maximal ca. 500 Watt Wärmeverluste nach aussen dringen dürfen. **Isolation gegen aussen**
- Die Innenseite der Trommel ist aufgrund der guten Wärmeleitung fast gleich heiss, wie ihre Aussenseite. Somit wird Wäsche, welche die Wände berührt, ebenfalls 100 °C warm. **Trommel innen ist 100 °C heiss**

3 Funktionsmuster

Parallel zur thermodynamischen Analyse wurde ein Funktionsmuster entwickelt. Damit soll gezeigt werden, dass der Trocknungsprozess nach dem Vakuumprinzip funktioniert.

Funktionsmuster entwickelt

Der Bau und die Inbetriebnahme des Funktionsmusters wird in einer 2. Projektphase erfolgen. Nachfolgend wird der Aufbau des Funktionsmusters beschrieben.

Bau in nächster Phase

3.1 Komponenten

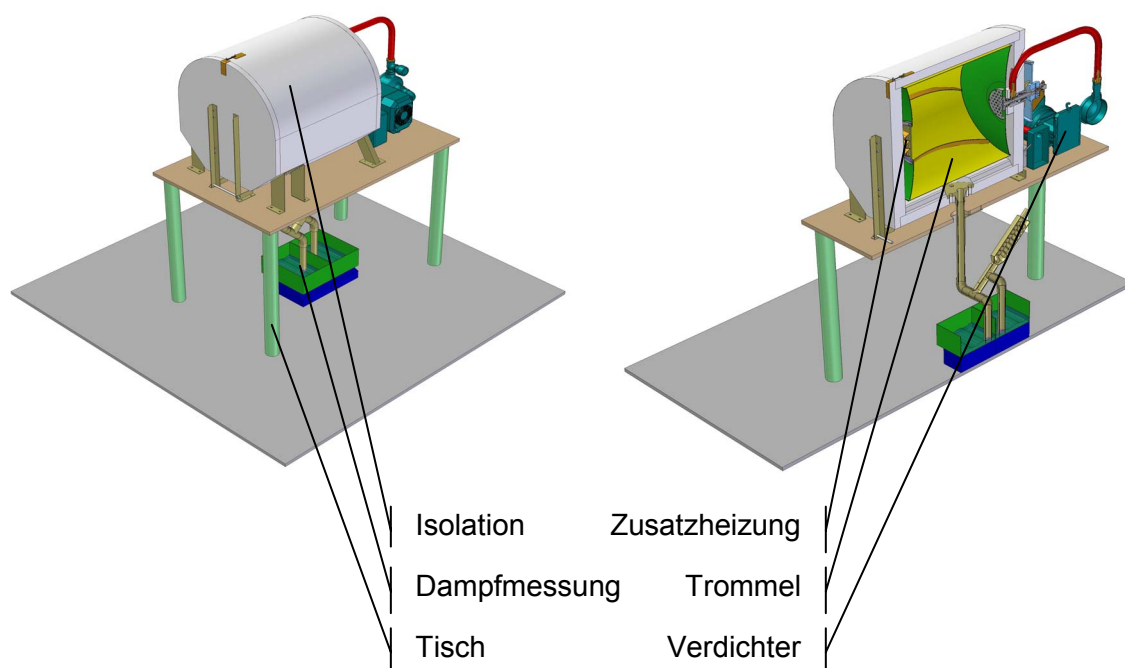


Abb. 10 Funktionsmuster. Totale und geschnittene Ansicht mit beschrifteten Hauptkomponenten. Der Trommelantrieb ist auf dieser Darstellung nicht sichtbar und daher nicht beschriftet.

Wie aus der obenstehenden Abbildung (Abb. 10) ersichtlich wird, besteht ein Vakuumtrockner nur aus wenigen Komponenten.

Wenige Komponenten

Die Trommel nimmt die nasse Wäsche auf, der Verdichter erzeugt einen Unterdruck in der Trommel und fördert den Wasserdampf aus der Trommel.

Trommel und Verdichter

Zusätzlich muss die Trommel und damit die Wäsche bewegt werden, was einen Trommelantrieb bedingt. Der Raum um die Trommel muss gegen die Umgebung thermisch isoliert werden. Die Zusatzheizung hilft, die Wäsche aufzuheizen, falls die Kondensationsenergie dazu nicht ausreicht.

**Trommelantrieb,
Isolation und
Zusatzheizung**

Das Funktionsmuster wird umfangreich instrumentiert, sodass sämtliche Prozessgrößen gemessen werden können. Diese Daten werden zum Verständnis des Prozesses beitragen und es erlauben, das theoretische Modell zu verfeinern, sodass es die Realität möglichst genau wiedergibt.

**Instrumen-
tierung**

3.1.1 Trommel

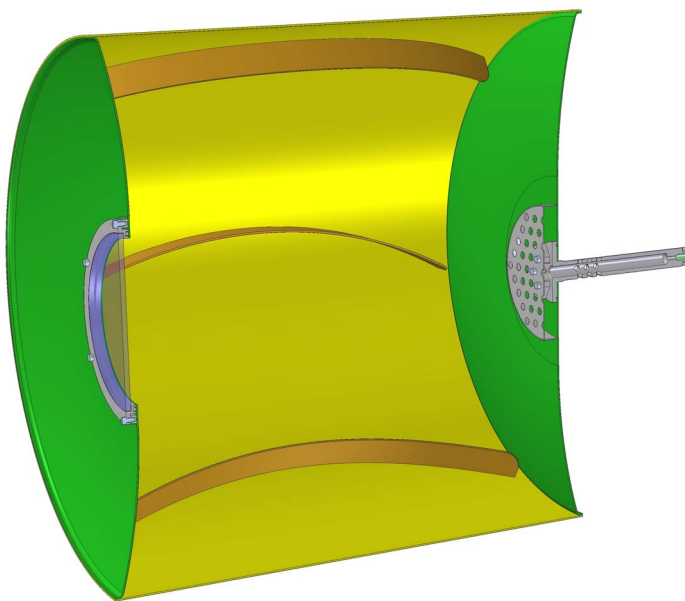


Abb. 11 Trommel mit zylindrischem Mantel und konkaven Stirnseiten.

Die Trommel muss mit nasser Wäsche befüllt werden können und soll der Wäsche möglichst viel Platz bieten, damit sie nicht knittert. Diese Forderungen gelten für jede Trocknertrommel. Die Trommel eines Vakuumentrockners muss noch einige weitere Forderungen erfüllen. Sie muss luftdicht sein und ein Vakuum im Innern ertragen, ohne zu kolabieren. Eine Form, welche diese Forderungen gut erfüllt, ist eine zylindrische Mantelfläche mit leicht konkaven Abschlüssen.

**Vakuumfeste
Trommel**

Die konkaven Stirnseiten werden ausschliesslich auf Zug belastet, welcher schon mit einer geringen Wandstärke¹¹ aufgenommen werden kann.

**Konkave
Stirnseiten**

¹¹ Im vorliegenden Fall beträgt die notwendige Wandstärke der Stirnflächen 1 mm, wobei die Form noch nicht optimiert wurde, sodass sicher noch Potential zur weiteren Reduktion der Wandstärke vorhanden ist.

Ausserdem bieten die konkaven Flächen Platz für Anschlüsse sowie Zusatzheizung.

Die zylindrische Mantelfläche könnte durch das Vakuum im Innern beulen. Dies wird durch eine grössere Wandstärke sowie Rippen in der Trommel verhindert¹².

Zylindrischer Mantel ...

Die Rippen dienen gleichzeitig der Wäschemitnahme, sodass die Wäsche durch die Rotation der Trommel gleichmässig bewegt und durchmischt wird. Dies gewährleistet, dass die Wäsche gleichmässig trocknet und nicht ein Wäschestück dauernd Kontakt mit der heissen Trommelwand hat.

... mit Rippen zur Wäschebewegung

Weiter muss die Trommel aus einem nicht rostenden Material aufgebaut sein und Wärme gut leiten. Dadurch kann die Kondensationsenergie, die aussen auf der Trommelwand frei wird, in die Wäsche transportiert werden. Die Trommel wird aus rostfreiem Stahl gebaut, der diese Kriterien gut erfüllt.

Rostfreier Stahl

3.1.2 Struktur und Trommelaufhängung

Das Funktionsmuster wird auf einem Tisch aufgebaut, um darunter Platz für Messeinrichtungen zu erhalten (siehe Abschnitt 3.2). Die Tragstruktur des Funktionsmusters wird teils aus Normwinkeln geschweisst, teils aus gebogenen Blechteilen gefertigt.

Struktur aus Normwinkeln und Blechteilen

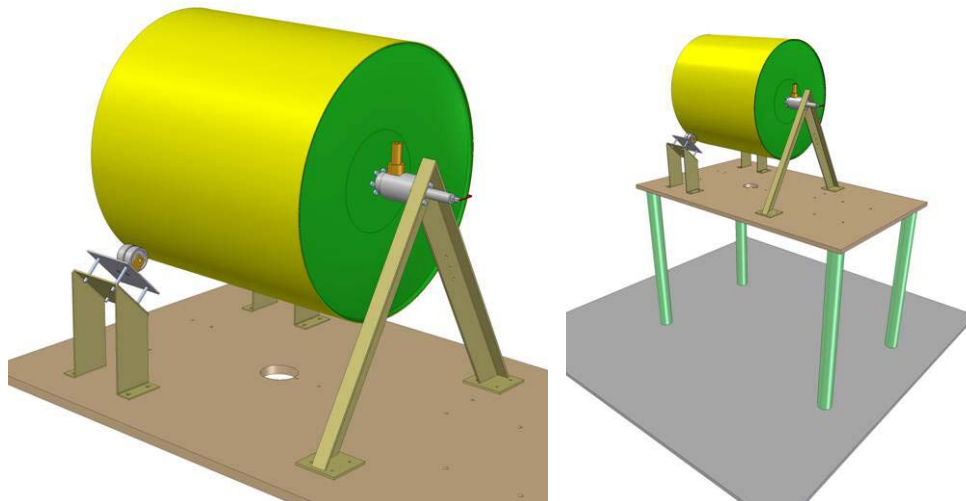


Abb. 12 Trommelabstützung: Axiale Abstützung an der Rückwand, Auflage auf Rollenpaar bei der Frontwand.

¹² Bei einer Wandstärke von 1.6 mm ergibt sich ein Sicherheitsfaktor von 1.5 gegen den ersten Beulfall, wobei noch keinerlei Rippen oder Strukturierungen der Mantelfläche betrachtet wurden.

Die obenstehende Abbildung (Abb. 12) zeigt die Abstützung der Trommel. An der Rückseite wird die Trommel über eine Achse getragen. Nahe bei der Frontseite wird die Trommel auf 2 Rollen abgestützt. Diese Anordnung wurde analog zu handelsüblichen Trocknern gewählt.

**Trommelab-
stützung analog
zu heutigen
Trocknern**

3.1.3 Antrieb der Trommel

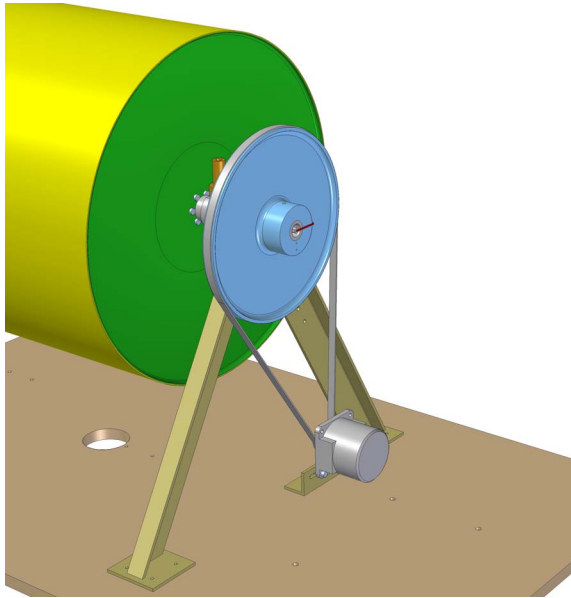


Abb. 13 Trommelantrieb mit Elektromotor und Zahnriemen.

Die Trommel wird mit einem Elektromotor über einen Zahnriemen angetrieben. Dabei werden Motor und Übersetzungsverhältnis so auf einander abgestimmt, dass die Trommel mit ca. 50 Umdrehungen pro Minute rotiert.

50 U/min

3.1.4 Zusatzheizung

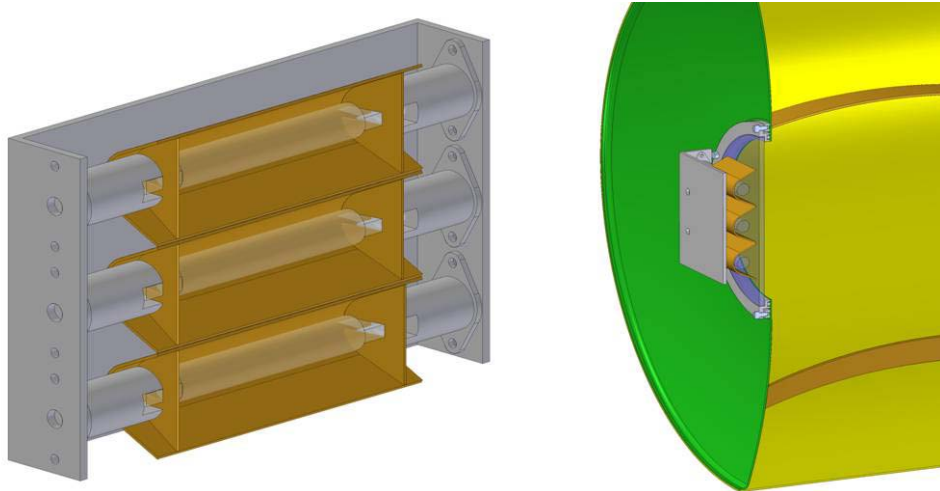


Abb. 14 Zusatzheizung und Fenster in der Trommel.

Die thermodynamische Analyse ergab, dass der Wärmeübergang von der heissen Trommelwand auf die Wäsche wahrscheinlich nicht ausreicht, um die Wäsche genügend zu erhitzen. Daher wird eine Zusatzheizung von ca. 1 kW benötigt.

Zusatzheizung ist nötig

Im Funktionsmuster wird die Zusatzheizung als Strahlungsheizung ausgelegt. Dazu werden Halogenlampen eingesetzt, die ca. 90% ihrer Leistung in Form von Wärmestrahlung abgeben. 3 Halogenstrahler mit je 500 W bieten genügend Spielraum, um bei verschiedenen Betriebszuständen genügend Leistung zur Verfügung zu haben. Die Strahler haben alle einen eigenen Reflektor aus Aluminiumblech, der die Strahlung auf die Wäsche reflektiert.

Halogenstrahler als Heizung

Die Trommel hat in der Frontwand ein Fenster aus Quarzglas, durch welches die Zusatzheizung die Wäsche erwärmt. Das Quarzglas ist für Infrarotstrahlung fast vollkommen transparent und stabil genug, um der Belastung durch den Unterdruck stand zu halten.

Ein Fenster in der Trommel ...

Dieses Fenster erlaubt es die Strahlungsheizung ausserhalb der Trommel zu positionieren, was mehrere Vorteile bringt. Erstens dreht die Heizung nicht mit der Trommel mit, was die elektrische Speisung stark vereinfacht. Zweitens kann keine Wäsche die Heizstrahler berühren, wodurch die Wäsche vor Verbrennungen geschützt wird. Zusätzlich wird das Fenster beim Funktionsmuster als Befüllöffnung für die Trommel benutzt.

... vereinfacht den Einbau der Heizung

3.1.5 Vakuumschluss

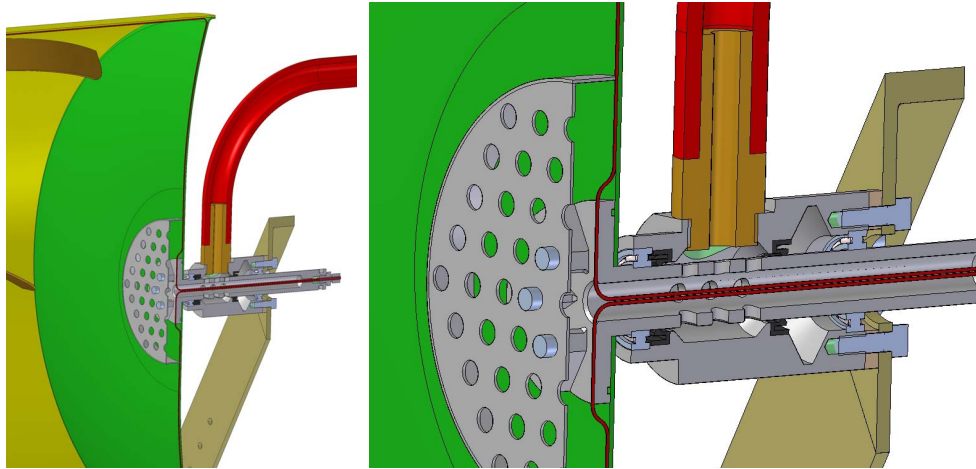


Abb. 15 Vakuumschluss durch die Achse.

Der Anschluss des Verdichters an die Trommel wird durch die Achse geführt, welche auch die Trommel trägt. Die Achse wird dabei als Hohlwelle ausgebildet und mit Querbohrungen versehen. Der Bereich der Bohrungen wird beidseitig mit Wellendichtringen gegen die Lagerschale abgedichtet. Der Verdichter wird über einen Schlauch mit der Lagerschale verbunden.

Vakuumschluss durch die Achse

3.1.6 Verdichter

Der Verdichter erzeugt einen Unterdruck in der Trommel und fördert den Wasserdampf aus der Wäsche. Der Ansaugdruck des Verdichters beträgt ca. 0.2 bar absolut bei 60 °C. Von diesem Zustand wird der Dampf verdichtet auf 1 bar absolut und ca. 120 °C. Das notwendige Fördervolumen beträgt 25 m³/h, um eine Menge von 5 kg Wasser in 90 Minuten aus der Trommel zu fördern.

Verdichter:
0.2 bara / 60°C
auf
1.0 bara / 120 °C
25 m³/h

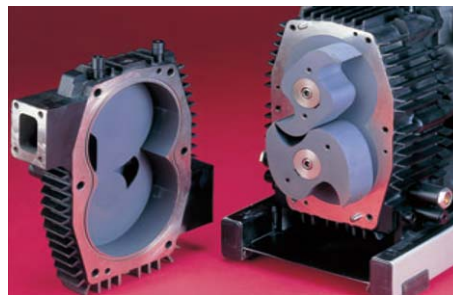
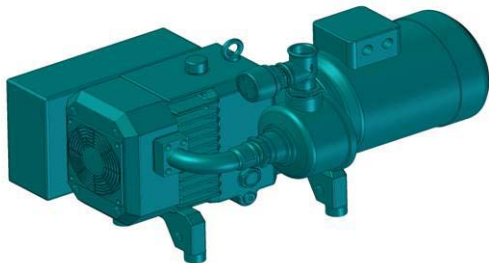


Abb. 16 Klauenverdichter

Im Funktionsmuster wird dazu ein Klauenverdichter eingesetzt (siehe Abb. 16). Der ausgewählte Verdichter hat ein maximales Fördervolumen von $60 \text{ m}^3/\text{h}$, was genügend Spielraum offen lässt, um verschiedene Trocknungszeiten zu Testen.

Klauenverdichter mit $60 \text{ m}^3/\text{h}$

Der Verdichter wird wie im Abschnitt 3.1.5 beschrieben, über einen Schlauch mit der Trommel verbunden. Dabei ist wichtig, dass der Verdichter nie Wassertropfen ansaugt, da er sonst zerstört wird. Im Funktionsmuster wird durch eine Schlauchbeheizung der Dampf im Schlauch leicht überhitzt. In einem Seriergerät könnte das durch koaxiale Führung von Verdichterein- und austritt gelöst werden. Dadurch wird der eintretende Dampf von der Austrittsleitung geheizt.

Schlauchbeheizung zur Überhitzung des angesaugten Dampfes

Die Verbindungsleitung vom Verdichteraustritt zur Trommelaussenseite muss isoliert werden, sodass der Dampf erst auf der Trommel kondensiert und nicht schon in der Leitung.

Schlauchleitung isoliert

3.1.7 Isolation

Aus der thermodynamischen Analyse folgt, dass 500 W Verlust durch die Isolation kein Problem darstellen. Durch eine Isolationsdicke von ca. 20 mm PU-Schaum wird der maximale Verlust auf nur 300 W beschränkt.

20 mm PU-Schaum ergibt 300 W Verluste

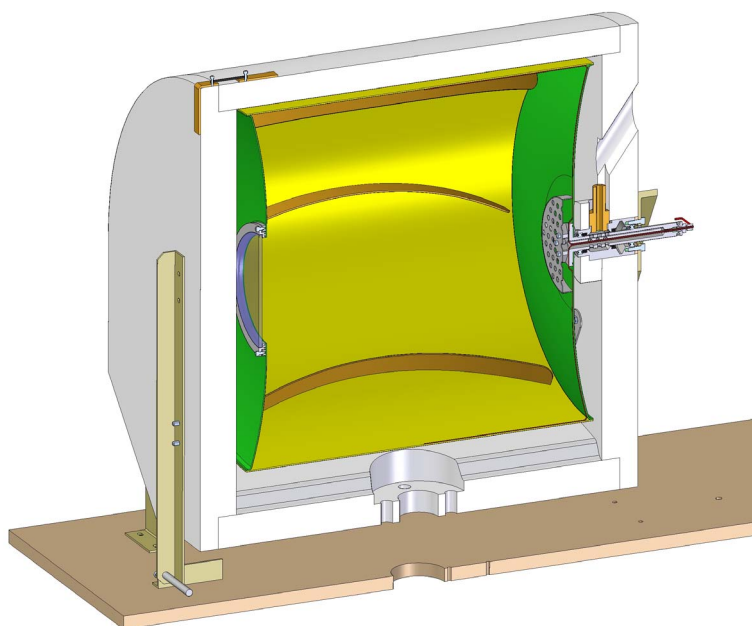


Abb. 17 Isolation der Trommel aus PU-Schaum-Formkörpern.

Die Isolation besteht im Funktionsmuster aus drei Formkörpern. Die Rückwand wird direkt auf den Strukturwinkeln befestigt. Der zylindrische Mittelteil wird von der Rückwand sowie den Rollenstützen getragen. Die Front-

3 Formkörper

wand ist separat abgestützt und kann zur Befüllung der Trommel weggeklappt werden.

3.2 Instrumentierung

Die Instrumentierung des Funktionsmusters dient dazu, den Prozess genau zu verstehen und so die verschiedenen Prozessparameter optimal steuern zu können. Dazu müssen alle prozessrelevanten Grössen gemessen und aufgezeichnet werden. Das folgende Schema (Abb. 18) gibt eine Übersicht, welche Grössen wo gemessen werden. In den nächsten Abschnitten wird auf einige Punkte noch genauer eingegangen.

Messung aller prozessrelevanten Grössen

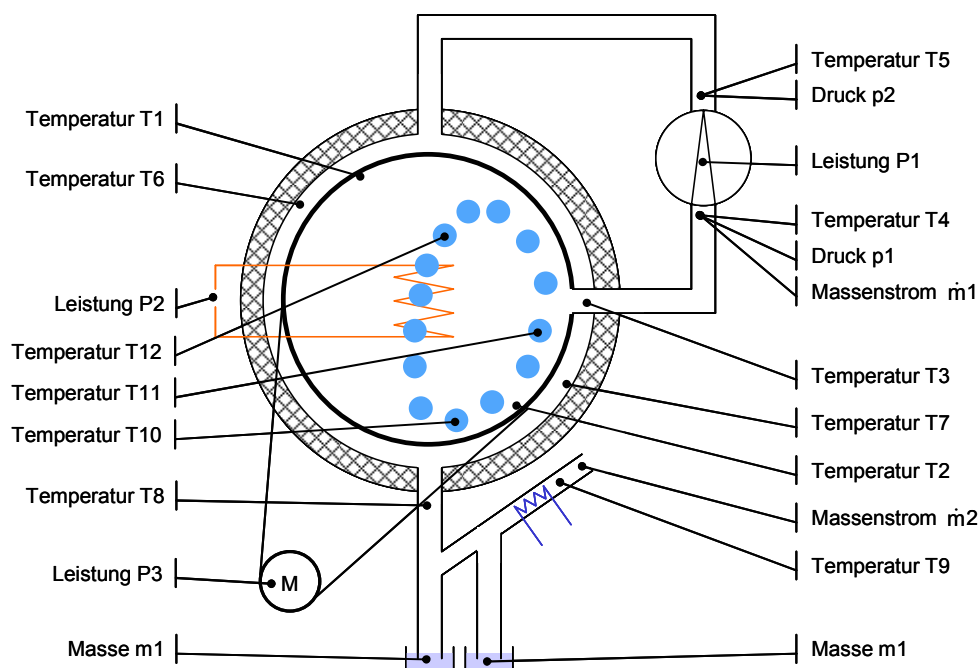


Abb. 18 Instrumentierung des Funktionsmusters

3.2.1 Temperaturmessung

Temperaturmessungen werden an diversen Orten im Prozesskreislauf (T1-T9) sowie in einigen Wäschestücken (T10-T12) gemessen. Die Prozesstemperaturen werden mit Thermoelementen in den Rohrleitungen gemessen. Die Temperatur der Wäschestücke wird mit so genannten Smart-Tags gemessen. Dies sind kompakte Temperaturfühler, welche die gemessene Temperatur aufzeichnen und nach dem Trocknen ausgewertet werden können.

Temperaturmessungen in Rohrleitungen

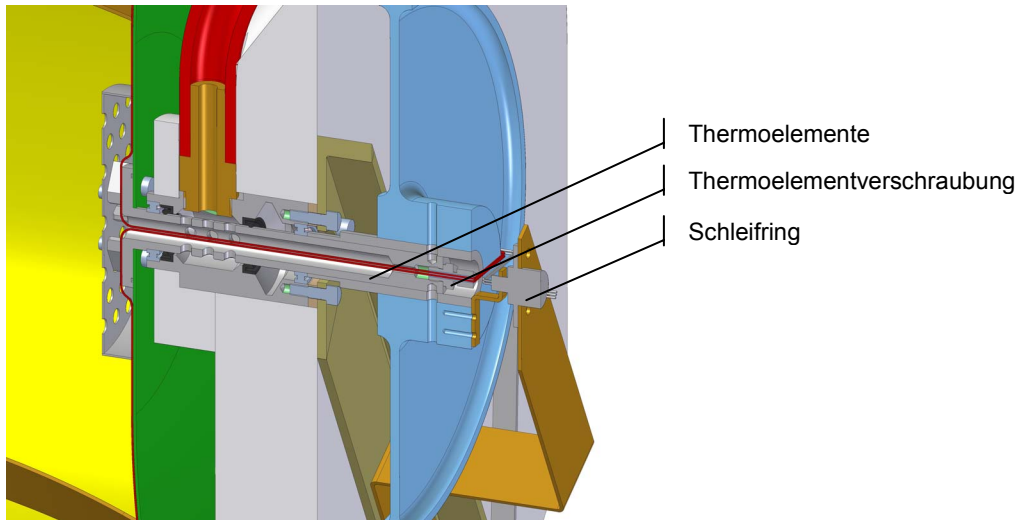


Abb. 19 Thermoelementführung zur Trommelinnenseite

Zur Temperaturmessung der Trommelwand werden zwei Thermoelemente durch die Achse in die Trommel geführt (siehe Abb. 19). Durch eine Thermoelementverschraubung wird die Vakuumdichtheit gewährleistet. Die Signale der Thermoelemente werden verstärkt und über einen Schleifring abgegriffen.

Temperaturmessung in der Trommel

3.2.2 Druckmessung

Die Druckdifferenz über dem Verdichter ist eine wichtige Grösse, um die Effizienz des Verdichters zu bestimmen. Deshalb wird vor und nach dem Verdichter der Druck gemessen.

Druckdifferenz über Verdichter

3.2.3 Leistungsmessung

Es werden drei Leistungen erfasst. Die Verdichterleistung (P_1) dient zusammen mit der Druckdifferenz (3.2.2) und dem Massenstrom (3.2.4) zum Bestimmen der Verdichtereffizienz. Die Leistung der Zusatzheizung (P_2) und diejenige des Trommelmotors (3) werden ebenfalls erfasst.

Leistung des Verdichters, der Heizung und des Motors

3.2.4 Massenstrommessung

Der vom Verdichter geförderte Massenstrom (\dot{m}_1) ist die dritte Grösse zur Bestimmung der Verdichtereffizienz und daher Prozessrelevant.

Massenstrom im Verdichter

3.2.5 Dampfmessung

Aus der thermodynamischen Analyse folgt, dass nur ein Teil des Dampfes, der aus der Trommel gefördert wird, aussen auf der Trommel kondensiert. Der Rest des Dampfes entweicht als Überschussdampf aus dem Prozess. Bei einem Kondensationstrockner darf höchstens 20% des Wasserdampfes an die Umgebung abgegeben werden. Das Funktionsmuster erlaubt es daher, den kondensierten Dampf und den Überschussdampf separat zu messen.

**Nur 20% Dampf
in die
Umgebung**

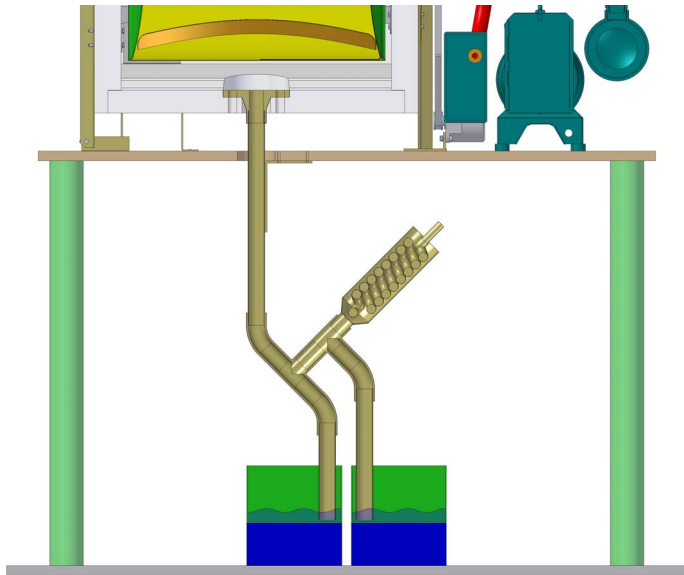


Abb. 20 Dampfmeßstrecke zur separaten Messung von Trommelkondensat und Überschussdampf.

Das Trommelkondensat und der Überschussdampf entweichen durch eine Leitung unten an der Isolation. Durch die in Abb. 20 gezeigte Anordnung der Leitungen gelangt alles Kondensat in den linken Behälter (m1). Der Überschussdampf zweigt nach rechts ab und wird in einer Kühlfalle auskondensiert, worauf das Kondensat in den rechten Behälter fließt (m2). So können mit 2 Waagen die Menge an Trommelkondensat und der Überschussdampf separat gemessen werden.

**Trommelkon-
densat und
Überschuss-
dampf separat
messen**

A1. Nomenklatur

f_{Verd}	1/s	Frequenz, mit der der Verdichter betrieben wird
A_1 bis A_7		Koeffizienten zur Berechnung der spezifischen molaren Enthalpie.
$A_{Trommel}$	m^2	Fläche für die Wärmeübertragung an der Trommel
B_1	K	Koeffizient zur Berechnung der spezifischen molaren Enthalpie
bara		Bar absolut, Absolutdruck
\tilde{c}_p	J/(mol K)	molare Wärmekapazität
$d_{Trommel}$	m	Durchmesser der Trommel
$f_{Trommel}$	1/s	Drehzahl der Trommel
H	J	Gesamter Enthalpieinhalt
h	J/kg	spezifische Enthalpie
h_{NASA}	J/kg	spezifische Enthalpie berechnet nach [1] NASA (1993)
\tilde{h}	J/mol	spezifische molare Enthalpie
ℓ	m	charakteristische Länge
$\lg()$		Logarithmus zur Basis 10
$L_{Trommel}$	m	Länge der Trommel
M	mol/kg	Molgewicht
m	kg	Masseninhalte
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
Min()		Minimum
P_{el}	W	elektrische Leistungsaufnahme des Verdichters.
p	Pa	Gesamtdruck
p_0	Pa	Referenzdruck $p_0 = 10^5$ Pa für die Berechnung der absoluten spezifischen Entropien
p_D	Pa	Dampfdruck von Wasser
\dot{Q}	W	Wärmestrom
Re	–	Reynoldszahl
R_s	J/(kg K)	spezifische Gaskonstante der Komponenten Luft und Wasserdampf
$R_{Trommel}$	K/W	Wärmewiderstand über die Trommelwand, Index a : aussen, Index i : innen, Index w : Wärmeleitung in der Wand.
s	J/(kg K)	absolute spezifische Entropie
$s^0(T)$	J/(kg K)	absolute spezifische Entropie in Funktion der Temperatur T der Komponenten Luft und Wasserdampf beim Referenzdruck p_0 .
T_{satt}	K	Satttemperatur von Wasser
u	m/s	Geschwindigkeit
$V_{Hubraum}$	m^3	Volumen des Hubraums des Verdichters
\dot{V}_2	m^3/s	Volumenstrom des Verdichters bezogen auf den Eintrittsdruck p_2
$\dot{V}_{2theoretisch}$	m^3/s	theoretisch vom Verdichter geförderter Volumenstrom.

$w_{Trommel}$	m	Wanddicke der Trommel
α	W/(K m ²)	Wärmeübergangskoeffizient
α_{eben}	W/(K m ²)	Wärmeübergangskoeffizient einer ebenen Platte, die bei der Berechnung des Wärmeübergangs innen in der Trommel als Referenz verwendet wird.
γ	–	Faktor bei der Berechnung des Wärmeübergangs im Ringspalt
λ	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
η_g	kg/(m s)	dynamische Viskosität
$\eta_{ind isentr}$	–	induzierter isentroper Wirkungsgrad des Verdichters
η_{isentr}	–	isentroper Wirkungsgrad des Verdichters
$\eta_{Mech+Ventile}$	–	Wirkungsgrad der Mechanik und der Ventile des Verdichters
η_{Motor}	–	Wirkungsgrad des Motors des Verdichters
η_{vol}	–	volumetrischer Wirkungsgrad des Verdichters
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
σ	W/(m ² K ⁴)	Stephan Boltzmann Konstante, $5.67 \cdot 10^{-8}$ W/(m ² K ⁴)
ξ	–	Massenanteil der Komponente im Gemisch aus Luft und Wasserdampf
ψ	–	Molanteil = Volumenanteil der Komponente im Gemisch aus Luft und Wasserdampf
ζ	–	Hilfsfunktion zur Berechnung der Nusseltzahl im Ringspalt

weitere Indizes

1	in der Trommel (siehe Abb. 1 Seite 2)
2	am Eintritt des Verdichters (siehe Abb. 1 Seite 2)
3	am Austritt des Verdichters (siehe Abb. 1 Seite 2)
3isentr	am Austritt des Verdichters, wenn die Verdichtung isentrop stattfinden würde
4	ausserhalb der Trommel (siehe Abb. 1 Seite 2)
5	am Austritt des Aussenraums (siehe Abb. 1 Seite 2)
a	ausser an der Trommel
g	gasförmige Phase
i	innen an der Trommel
Konv	konvektiv
L	Luft
Str	Strahlung
Wand	Grösse an der Wand
Wf	Wasser in der flüssigen Phase
Wg	Wasser in der gasförmigen Phase

A2. Bibliographie

Angaben am rechten Rand [] verweisen auf die Nummer, unter der das Dokument in der Bibliothek von awtec abgelegt wurde.

- [1] NASA (1993) "Thermodynamic data tables", CEA, 1993, Originaldokument nicht verfügbar, Gleichungen in EXCEL Tabelle aus einem alten awtec-Projekt
- [2] Wehrli, M. (2003) "Energieeffizienter, kostengünstiger Wäschetrockner (Tumbler), Konzept für die Erfüllung der Energieeffizienzklasse A" Diplomarbeit an der Fachhochschule Aargau, Studiengang Maschinenbau betreut durch Prof. Dr. K.C. Heiniger und Prof. Dr. W. Schlachter, 28. November 2003

[AWT340]