



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

FUNKTIONSMUSTER EINES ENERGIESPARENDEN WÄSCHETROCKNERS

FUNKTIONSMUSTER UND VERSUCHE

Schlussbericht der 2. Phase

Ausgearbeitet durch

Urs Weilenmann, awtec AG für Technologie und Innovation

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

Mit freundlicher Unterstützung von EWZ Stromsparfond

Impressum

Datum: Mai 2008

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Elektrizitätstechnik und -anwendung

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-Bereichsleiter, *thilo.krause@bfe.admin.ch*

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 152412 / 101681

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

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

Zusammenfassung

In dieser Projektphase wurde ein Funktionsmuster eines Wäschetrockners aufgebaut, welcher die Wäsche bei Unterdruck trocknet. Das Funktionsmuster wurde umfangreich instrumentiert, sodass alle prozessrelevanten Daten erfasst werden können.

**Funktions-
muster eines
Vakuum-
trockners**

Die bisherigen Versuche ergaben gute, vielversprechende Resultate. Das vorgeschlagene Trocknungsprinzip eines Vakuumtrockners mit Wärmerückgewinnung funktioniert und die Wäsche kann schonend getrocknet werden.

**Vielverspre-
chende Ver-
suchsresultate**

Die Wäsche wird höchstens 60 °C warm und es fallen wenig Flusen an, was einen wäscheschonenden Prozess ergibt. Es wurden Trocknungsleistungen von 2 kg Wasser pro Stunde erreicht. Das Ziel von 3 kg/h ist damit noch nicht erreicht, eine Steigerung der Entfeuchtungsleistung scheint aber realistisch.

**Wäschescho-
nend ...**

Die erreichbaren Trocknungszeiten sind noch nicht bestimmt. Trocknungszeiten wie bei herkömmlichen Trocknern scheinen aber erreichbar zu sein. Auch die erreichbare Energieeffizienz muss noch bestimmt werden. Aufgrund der guten Prozessstabilität - auch ohne Zuheizen - kann die angestrebte Energieeffizienzklasse A nach heutigem Kenntnisstand deutlich übertroffen werden.

**... und energie-
effizient**

Abstract

In this project phase, an operating model of a tumble-dryer was built and tested. It dries laundry at pressures below atmospheric pressure. The operating model was equipped with numerous sensors such that all relevant data of the process could be recorded.

**Operating model
of a vacuum
tumble-dryer**

The measurements reported in this document show that good and promising results were obtained with the functional model. The proposed concept of the vacuum tumble-dryer with heat recovery works well and the laundry can be dried in a gentle way.

**Promising
results of the
measurements**

The laundry experiences temperatures not higher than 60 °C. Only few fluff balls appear. This implies a process which is kind to fabrics. During the testing the drying performance reached 2 kg water per hour. The goal of 3 kg water per hour was not achieved yet.

Kind to fabrics...

The drying duration have not been determined yet. It seems possible, that the drying duration of state of the art tumble-dryers can be reached. The energy efficiency of the new process has still to be determined. Due to the demonstrated process stability – also without additional heating – energy class A is surpassable considering all available results.

**... and energy
efficient**

Inhaltsverzeichnis

1	Funktionsmuster	5
1.1	Trommel.....	6
1.2	Isolation.....	7
1.3	Frontwand	8
1.4	Verdichter.....	9
1.5	Dampfleitung.....	10
1.6	Zusatzheizung.....	10
1.7	Unterbau	11
1.8	Kühlfalle und Kondensatsammler	11
1.9	Instrumentierung, Steuerung und Messdatenerfassung.....	13
2	Versuche	14
2.1	Übersicht.....	14
2.2	Versuchablauf und Erkenntnisse	16
3	Energieeffizienz	18
3.1	Energieabschätzung aus Messwerten.....	18
3.2	Energieabschätzung mit theoretischem Modell.....	20
4	Fazit	22
5	Ausblick	24

Anhang

A1. Instrumentierung	25
A2. Steuerung, Messdatenerfassung	27
A3. Versuche	28
A3.1. Versuch 1	28
A3.2. Versuch 2	28
A3.3. Versuch 3	30
A3.4. Versuch 4	31
A3.5. Versuch 5	31
A3.6. Versuch 6	33
A3.7. Versuch 7	34
A3.8. Versuch 9	34
A4. Literaturliste	36

1 Funktionsmuster

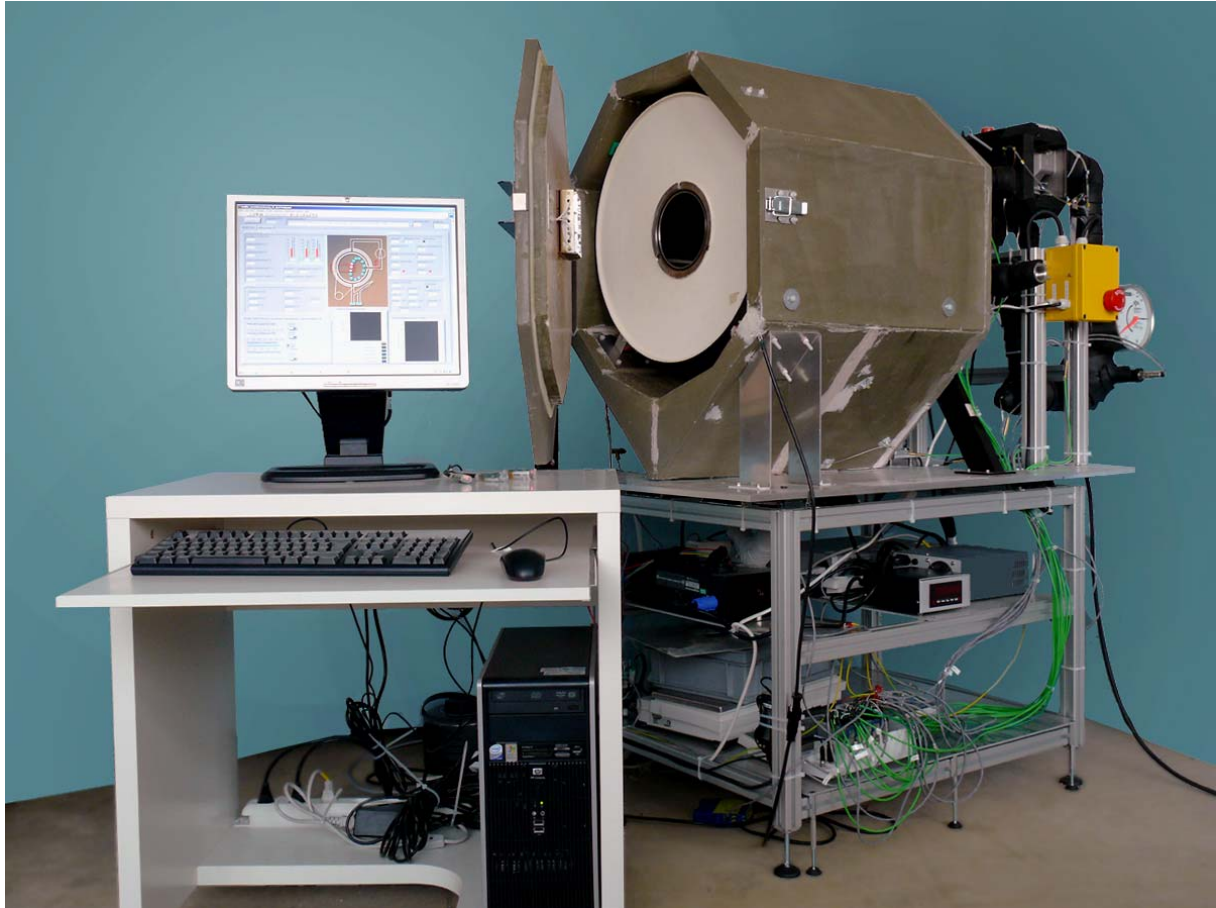


Abb. 1: Gesamtansicht des Funktionsmusters: Betriebsbereiter Aufbau des Funktionsmusters mit offener Frontwand und PC zur Messdatenerfassung und Steuerung.

Der Aufbau des Funktionsmusters entspricht im wesentlichen dem im Bericht [2] „Energiesparender, wäscheschonender Trockner / Thermodynamik und Funktionsmuster“ vom 28. November 2006 beschriebenen Aufbau. Daher wird an dieser Stelle der Aufbau nur grob beschrieben. Eine Übersicht über das Funktionsmuster ist in Abb. 2 und Abb. 3 gegeben.

Aufbaubeschreibung

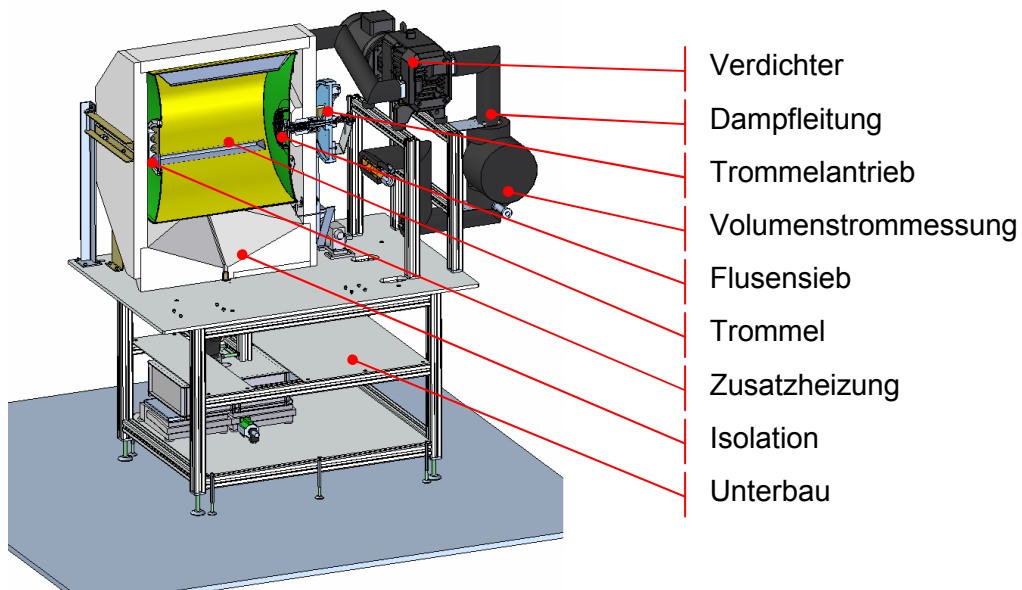


Abb. 2: Schnittansicht des Funktionsmusters mit beschrifteten Hauptbaugruppen.

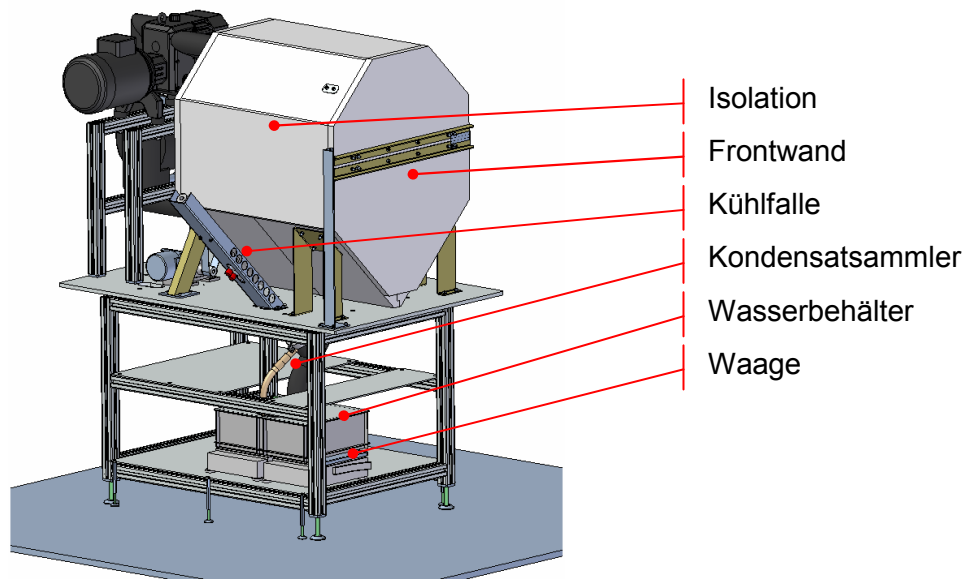


Abb. 3: Rückansicht des Funktionsmusters mit beschrifteten Hauptbaugruppen.

1.1 Trommel

Die Trommel ist aus zwei gedrückten, konkaven Deckeln und einem zylindrischen Mantel vakuumdicht verschweisst. In der vorderen Stirnfläche ist eine Scheibe eingebaut. Diese kann ausgebaut werden und dient so als Öffnung zum Befüllen der Trommel. Das Glas ist infrarot-transparent,

Trommel mit konkaven Deckeln verschweisst

sodass die Zusatzheizung durch dieses Fenster die Wäsche aufheizen kann.

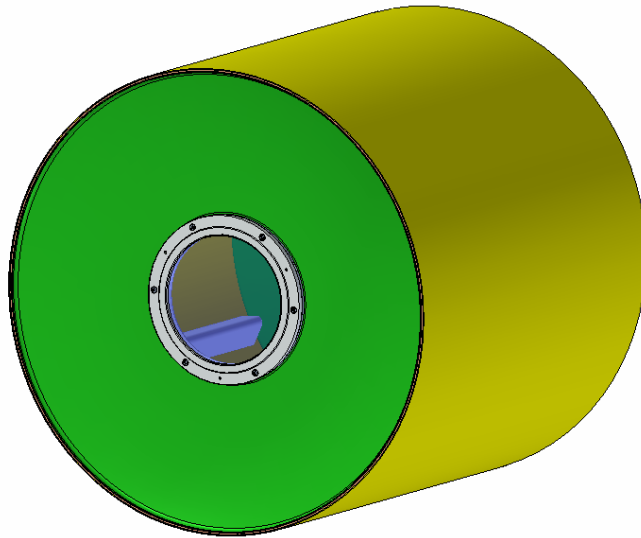


Abb. 4: CAD-Ansicht der Trommel mit eingebautem Fenster. Die (grüne) Front- und Rückwand sind konkav, die (gelbe) Mantelfläche ist zylindrisch. Drei eingeschweisste Rippen dienen der Wäschebewegung.

1.2 Isolation

Die Isolation trennt den Kondensationsraum um die Trommel von der Umgebung. Sie ist aus Hochtemperatur-Polyuretan-Schaumkörpern aufgebaut. Diese sind formstabil und ertragen bis 200 °C, was für diese Anwendung (max. Temperatur des Dampfes 150 °C) genug ist.

**Isolation aus
Hart-PU-Schaum**

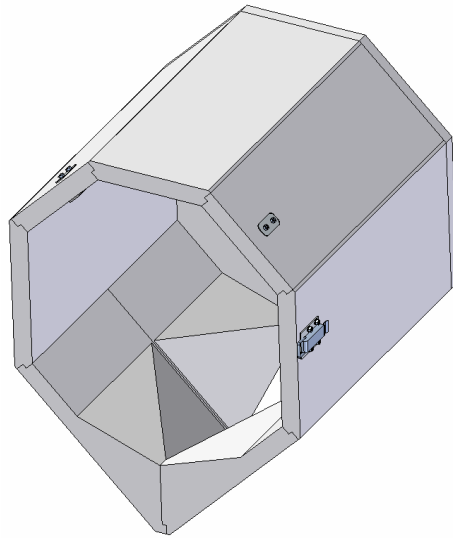


Abb. 5: Isolation aus PU-Hartschaumkörpern. Die Schrägflächen im unteren Bereich sorgen dafür, dass kondensiertes Wasser vollständig gesammelt werden kann.

Im unteren Bereich sind die Isolationsteile so geformt, dass Kondenswasser möglichst vollständig abfließt. Dazu sind die Schrägflächen um mindestens 20° gegen den zentralen Abfluss geneigt. Die gesamte Innenfläche der Isolation ist mit einem Epoxi-Harz gestrichen, der eine wasserdichte Oberfläche bildet, sodass sich der PU-Schaum nicht mit Wasser voll saugen kann.

**Isolation abge-
schrägt um Kon-
denswasser zu
sammeln**

1.3 Frontwand

Die Frontwand besteht aus dem oben beschriebenen Isolationsmaterial. Sie kann weggeklappt werden, um die Trommel befüllen zu können und den Zugang zur Zusatzheizung zu gewährleisten. Die Frontwand wird gegen die Isolation mit selbstklebenden Schaumstoff-Isolationsbändern abgedichtet.

**Frontwand
gelenkig**

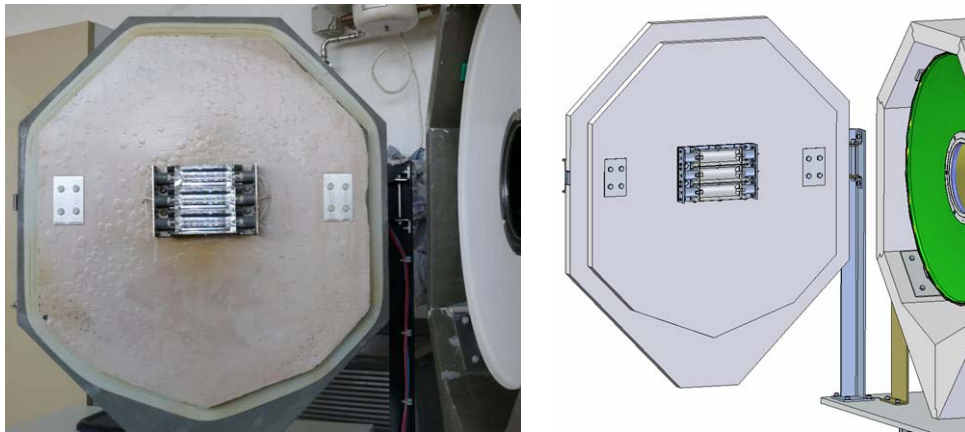


Abb. 6: Frontwand mit Zusatzheizung.

1.4 Verdichter

Zum Erzeugen des Unterdrucks in der Trommel wird ein Klauenverdichter der Marke Zephyr eingesetzt. Dieser ist etwa doppelt so leistungsfähig wie notwendig, ist aber der kleinste erhältliche Verdichter dieser Art. Der Klauenverdichter ist als Verdichtertyp für diese Anwendung geeignet, da er ein grosses Verhältnis von Volumenstrom zu Baugrösse aufweist. Somit wird der Verdichter im serientauglichen Endprodukt möglichst klein.

Klauenverdichter als Vakuumpumpe

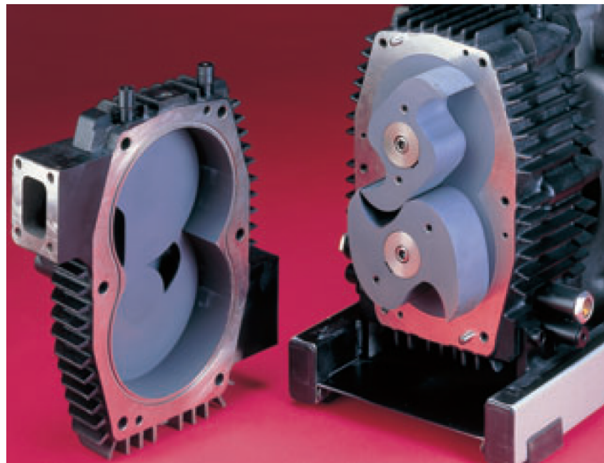


Abb. 7: Klauenverdichter mit geöffneter Verdichtereinheit. Gut sichtbar sind die beiden Klauen und im Deckel die Ansaug- und Ausblasöffnung.

1.5 Dampfleitung

Die Dampfleitung wurde aus Messingrohren und Serto-Verschraubungen aufgebaut. Die Leitung von der Trommel zum Verdichter wird von einem Heizdraht erwärmt, sodass kein Wasserdampf auf der Leitung kondensiert. Dies ist wichtig, damit der Verdichter keine Tropfen ansaugt, welche ihn beschädigen könnten. Die Leitungen sind isoliert, um die Wärmeverluste möglichst gering zu halten.

Dampfleitung leicht überhitzt um Kondensation zu verhindern

1.6 Zusatzheizung

Die ursprünglich geplante und eingebaute Zusatzheizung, besteht aus drei Halogenlampen und Reflektoren, welche die Strahlung möglichst vollständig durch das Trommelfenster auf die Wäsche richten (Abb. 8 links). Diese Anordnung verursacht im Betrieb Probleme mit Wäsche-flusen, die auf der Scheibe verbrennen und anbacken. Die dadurch auftretende Schwärzung des Glases führt zu einer übermässigen Erwärmung der Scheibe, wodurch die Dichtungen der Scheibe zerstört werden und die Trommel undicht wird.

Zusatzheizung durch Fenster verbrennt Flusen

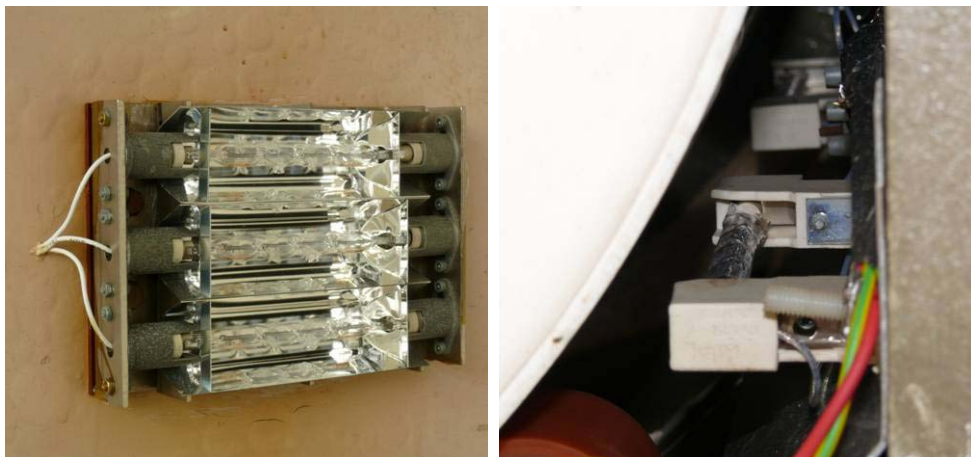


Abb. 8: Zusatzheizung: Links ursprüngliche Fensterheizung, bestehend aus 3 Halogenstrahlern und Reflektoren. Rechts zusätzlich eingebaute Trommelmantelheizung, bestehend aus 2 Halogenstrahlern und Reflektorblech.

Es wurde für weitere Versuche eine alternative Zusatzheizung eingebaut, welche seitlich auf den Trommelmantel strahlt und die Wäsche indirekt erwärmt (Abb. 8 rechts). Diese Heizung hat sich in den Versuchsreihen bewährt.

Alternative Heizung auf Trommelmantel

1.7 Unterbau

Der Unterbau des Funktionsmusters besteht aus Systemprofilen. Darauf wird die Grundplatte mit Maschinendämpfern befestigt. Auf der Grundplatte werden alle weiteren Baugruppen fixiert. Die Zwischenböden im Unterbau dienen der Aufnahme der Datenerfassungsgeräte sowie verschiedener Netzgeräte.

Unterbau aus Systemprofilen

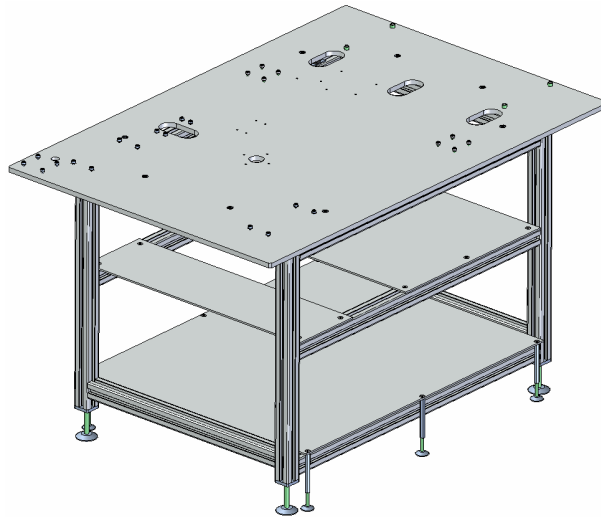


Abb. 9: Unterbau mit Grundplatte. Die Grundplatte ist mit Dämpfern gelagert und trägt alle Elemente des Funktionsmusters. Die Zwischenböden dienen der Aufnahme aller Messgeräte und der zugehörigen Elektronik.

1.8 Kühlfalle und Kondensatsammler

Der Wasserdampf, welcher vom Verdichter in den Kondensationsraum zwischen Trommel und Isolation geleitet wird kondensiert nur zum Teil auf der Trommelwand. Ein Teil des Dampfes ist überschüssig und verlässt den Kondensationsraum dampfförmig.

Kondenswasser und Überschussdampf...

Um beide Massenströme zu erfassen, stehen 2 Waagen mit separaten Behältern zur Verfügung. Das Trommelkondensat fließt direkt in den rechten Behälter (siehe Abb. 10). Der Überschussdampf wird in der Kühlfalle auskondensiert und fließt in den linken Behälter.

... werden getrennt erfasst

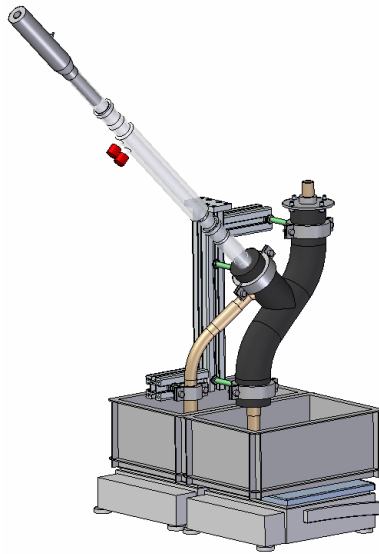


Abb. 10: Kühlfalle mit Kondensatsammler: Das auf der Trommel kondensierte Wasser fließt direkt in den rechten Behälter. Der überschüssige Dampf wird in die (gläserne) Kühlfalle geleitet und kondensiert dort. Das Kondensat fließt danach in den linken Behälter.

Bei den ersten Versuchen mit dem Funktionsmuster erwies sich die eingebaute Kühlfalle als zu klein, um den gesamten Überschussdampf zu kondensieren. Daraufhin wurde im Labor eine eigene Kühlfalle aus Kupferrohren gebaut und ins Funktionsmuster integriert. Diese Kühlfalle ist genügend leistungsfähig, um den gesamten Wasserdampf zu kondensieren.

Erste Kühlfalle zu klein ... ersetzt durch grössere Kühlfalle

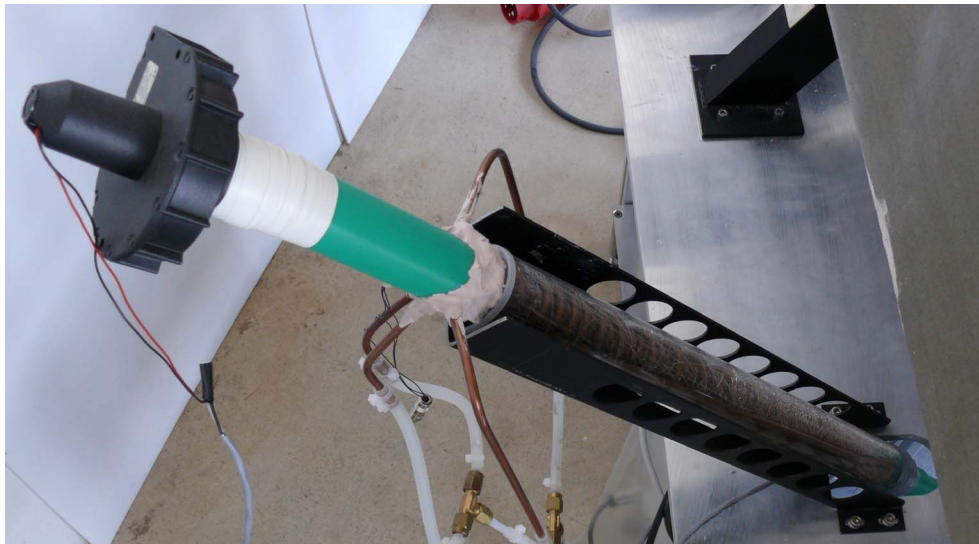


Abb. 11: Selbst gebaute Kühlfalle aus Kupferrohren mit angeflanschem Lüfter. Die Kupferrohre werden wassergekühlt, der Lüfter dient dazu, einen leichten Unterdruck im Kondensationsraum zu erzeugen, wodurch der gesamte Überschussdampf in die Kühlfalle gelangt.

Im Experiment ist es notwendig, den gesamten Massenstrom an Wasser zu erfassen. Um zu verhindern, dass Überschussdampf durch Ritzen in der Isolation entweicht und nicht von der Messeinrichtung erfasst werden kann, wurde versuchsweise ein Lüfter auf die Kühlfalle montiert, welcher einen leichten Unterdruck im Kondensationsraum erzeugt.

Lüfter zur Absaugung des Überschussdampfes

Ob auch im schlussendlichen Serieprodukt eine Kühlfalle (Kondensator) benötigt wird, entscheidet sich anhand der Menge des anfallenden Überschussdampfes. Ein Kondensationstrockner darf höchstens 20 % des Wassers als Dampf an die Umgebung abgeben. Fällt also mehr Überschussdampf an, muss eine Kühlfalle eingebaut werden.

Höchstens 20 % Überschussdampf bei Kondensationstrocknern

1.9 Instrumentierung, Steuerung und Messdatenerfassung

Am Funktionsmuster werden über 30 Messgrößen erfasst und aufgezeichnet. Die Instrumentierung des Funktionsmusters ist im Anhang detailliert beschrieben (siehe Abschnitt A1).

30 Messgrößen
...

Die Steuerung und Messdatenerfassung aller Messgrößen wird mit LabView vorgenommen. Eine Beschreibung dazu findet sich im Anhang (siehe Abschnitt A2).

...
mit LabView erfasst

2 Versuche

In diesem Kapitel werden die Versuchsergebnisse der ersten Versuche aufgezeigt. Die Versuchsreihen sind noch nicht abgeschlossen, wodurch den Schlussfolgerungen auch nur ein provisorischer Status zukommt.

**Vorläufige
Resultate**

Bei allen Angaben des Druckes in diesem Kapitel wird der Absolutdruck in Bar angegeben (nicht relativ zur Umgebung).

Absolutdruck

2.1 Übersicht

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick der bisherigen Versuche, der jeweiligen Betriebsweise und der daraus gewonnenen Resultate. In den folgenden Abschnitten 2.2-A3.5 wird auf die einzelnen Versuche genauer eingegangen.

**Übersicht der
bisherigen
Versuche**

Ver- such Nr.	Betriebsweise	Resultate
1	<ul style="list-style-type: none"> ○ 3 kg Wäsche ○ 2 l Wasser (66%) ○ Verdichter geregelt 0.2 bar ○ Zusatzheizung: 0, 750 W 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Druckschwankungen wirken sich stark auf Prozess aus ○ Fenster stark geschwärzt durch angebackene Flusen ○ Plötzliches Leck durch Versagen vom O-Ring ○ Massendefizit von 0.7 kg => Kühlfalle unterdimensioniert ○ Druck- und Temperaturwerte der Wäschesensoren stimmen sehr gut mit den in der Trommel gemessenen Werten überein
2	<ul style="list-style-type: none"> ○ 3 kg Wäsche ○ 2 l Wasser (66%) ○ Verdichter auf Volllast ○ Zusatzheizung: 0, 500, 1000 W 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Trocknungsleistung von 30-35 g/min (2 kg/h) ○ Starke Korrelation von Kondensationsraumtemperatur und Trocknungsleistung ○ Kondensationsraumtemperatur zeigt den Energieinhalt des Systems ○ Fenster stark geschwärzt durch angebackene Flusen ○ Bruch der Antriebskupplung
3	<ul style="list-style-type: none"> ○ 3 kg Wäsche ○ 2 l Wasser (66%) ○ Verdichter auf Volllast ○ Zusatzheizung: nur vorwärmen 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Optimale Trommeldrehzahl: 40 U/min ○ Restfeuchte: 680 g (22%) ○ Massendefizit: 100 g ○ Keine angebackenen Flusen dank neuer Trommelheizung
4	<ul style="list-style-type: none"> ○ 3 kg Wäsche ○ 2 l Wasser (66%) ○ Verdichter auf Volllast ○ Zusatzheizung: 0, 500, 1000 W 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Restfeuchte: 520 g (17%) ○ Massendefizit: 470 g
5	<ul style="list-style-type: none"> ○ 3 kg Wäsche ○ 2 l Wasser (66%) ○ Verdichter auf Volllast ○ Zusatzheizung: 0, 500, 1000 W 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Restfeuchte: 0 g (0%) ○ Wäsche trocken ○ Massendefizit: 1 kg ○ Entfeuchtungsleistung sinkt mit zunehmender Trockenheit der Wäsche
6	<ul style="list-style-type: none"> ○ 3 kg Wäsche ○ 1.8 l Wasser ○ Verdichter geregelt 0.2 bar ○ Zusatzheizung: nur vorwärmen 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Prozess läuft stabil ohne Zusatzheizung ○ Trocknungsleistung von 20-30 g/min (1-2 kg/h) ○ Entfeuchtungsleistung sinkt mit zunehmender Trockenheit der Wäsche
7	<ul style="list-style-type: none"> ○ 3 kg Wäsche ○ 1.8 l Wasser ○ Verdichter geregelt 0.3 bar ○ Zusatzheizung: nur vorwärmen 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Prozess läuft stabil ohne Zusatzheizung ○ Trocknungsleistung von 10-15 g/min (<1 kg/h) ○ Entfeuchtungsleistung sinkt mit zunehmender Trockenheit der Wäsche nur wenig ab
8	<ul style="list-style-type: none"> ○ 3 kg Wäsche ○ 1.8 l Wasser 	<ul style="list-style-type: none"> ○ keine Daten - Fehler in Datenaufzeichnung
9	<ul style="list-style-type: none"> ○ 3 kg Wäsche ○ 1.8 l Wasser ○ Verdichter geregelt 0.2 bar ○ Zusatzheizung: 500 W konstant 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Prozess läuft stabil in stationärem Zustand ○ 500 W Zusatzheizung simuliert Verdichterabwärme ○ Versuch abgebrochen wegen Wasserschaden an Elektronik ○ Restfeuchte 15%, Wasserdefizit 600 g

Tab. 1: Übersicht der gefahrenen Versuche mit dem Funktionsmuster.

2.2 Versuchablauf und Erkenntnisse

An dieser Stelle wird exemplarisch der erste Versuch beschrieben. Die Beschreibungen und Grafiken der weiteren Versuche befinden sich im Anhang (siehe Abschnitt A3).

1. Versuch exemplarisch beschrieben

Bei diesem Versuch wurde ein Betriebspunkt von 0.2 bar absolut und 60 °C in der Trommel angestrebt. Bei 0.2 bar liegt der Siedepunkt von Wasser bei 60 °C.

0.2 bar / 60 °C

Die Trommel wurde mit 5 kg Wäsche und 3 l Wasser (66 % Feuchtigkeit) gefüllt. Anschliessend wurde die Trommel einige Minuten gedreht, um das Wasser möglichst gleichmässig zu verteilen.

5 kg Wäsche / 3 l Wasser

Die feuchte Wäsche wurde mit der Fensterheizung vorgewärmt. Die Heizleistung betrug 1000 W, wobei die Leistungsmessung bei den ersten Versuchen noch ungenau war.

Vorwärmen mit 1000 W Fensterheizung

Der Verdichter wurde automatisch auf 0.2 bar geregelt. Schwankungen des Druckes, welche durch die Regelung verursacht wurden, wirkten sich stark auf den Prozess aus. Um zu verhindern, dass Wasserdampf im Verdichter kondensiert und diesen beschädigt, wurde der Verdichter einige Minuten vorgewärmt.

Druckschwankungen wirken stark auf Prozess

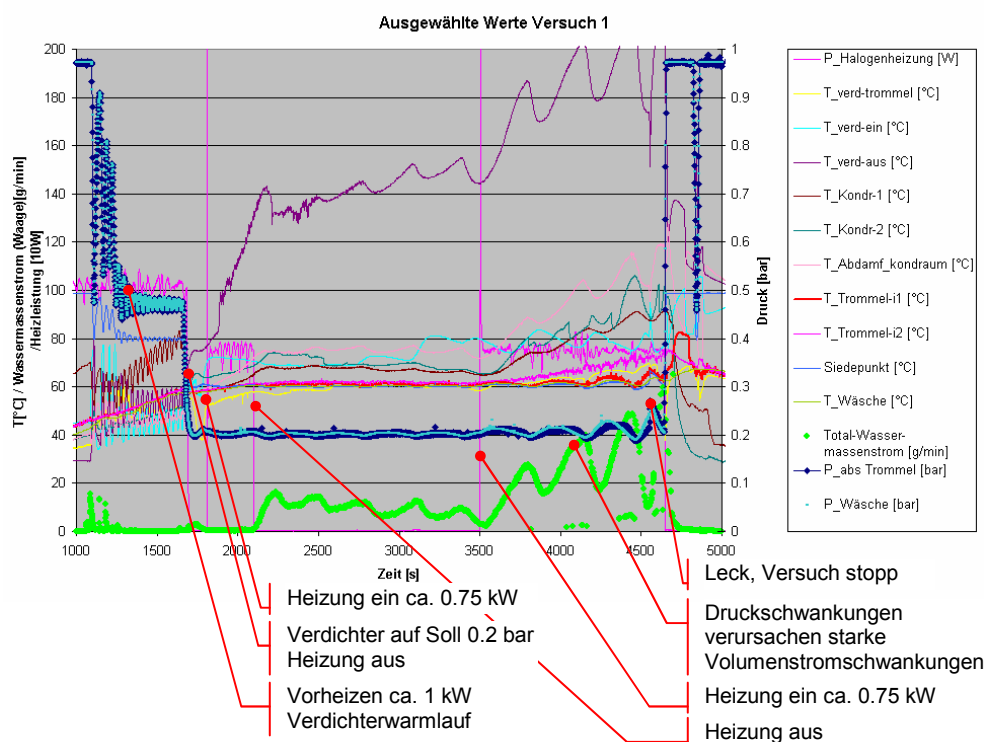


Abb. 12: Versuch 1: In der Grafik sind ausgewählte Temperaturen, der Trommel-
druck sowie der Wasser-Massenstrom dargestellt.

Das Fenster in der Trommel wurde durch angebackene Flusen stark geschwärzt, wodurch die thermische Belastung des Fensters und der O-Ringe stark zunahm.

**Flusen am
Fenster
angebacken**

Der Versuch wurde abgebrochen, nachdem ein plötzliches Leck im Unterdruckraum (Trommel und Rohrleitung) auftrat. Das Leck wurde wahrscheinlich durch thermisches Versagen des O-Rings, welcher die Scheibe dichtet, verursacht. Dieser wurde für weitere Versuche durch einen temperaturbeständigeren O-Ring ersetzt.

**Abbruch nach
plötzlichem
Leck**

Die Wägung der Wäsche nach Abbruch des Versuches zuzüglich des in den Waagen gesammelten Kondensates zeigte ein Massendefizit von 0.7 kg. Ein Teil des fehlenden Wassers bleibt jeweils an der Innenwand der Isolation zurück. Der Rest des Wasserdefizites dürfte durch die unterdimensionierte Kühlfalle entwichen sein. Die Kühlfalle wurde später durch eine leistungsfähigere Konstruktion ersetzt (siehe Abschnitt 1.8, Abb. 11).

**Massendefizit
von 0.7 kg =>
Kühlfalle zu
klein**

Die autonomen Datenlogger werden in Wäschestücken eingewickelt der Wäsche beigegeben und zeichnen Druck und Temperatur auf. Die Auswertung dieser Daten zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Werten, welche an der Trommelinnenwand gemessen werden. Der in der Grafik (Abb. 12) dargestellte Wassermassenstrom ist aus den Werten der zwei Waagen errechnet.

**Messung der
Datenlogger
stimmen
überein**

3 Energieeffizienz

Die vorläufige Abschätzung des Energiebedarfs des Vakuumtrockners wurde auf zwei verschiedene Arten angegangen. Einerseits wurden aus den Messwerten des Versuchs 9 diejenigen Energieströme abgeschätzt, welche in einer zukünftigen Seriemaschine notwendig wären (Abschnitt 3.1). Andererseits wurde das theoretische Modell des Trockners mit den Messwerten verifiziert, um so zu einer Aussage über die erreichbare Energieeffizienzklasse zu kommen (Abschnitt 3.2).

2 Wege zur Energiebilanz

3.1 Energieabschätzung aus Messwerten

Um eine Abschätzung des Energiebedarfs zu machen wurde ein Versuch mit möglichst stationärem Betrieb durchgeführt (Versuch 9). Eine detaillierte Beschreibung des Versuchs befindet sich im Anhang unter Punkt A3.8.

Stationärer Versuch für saubere Daten

Die untenstehende Tabelle (Tab. 2) zeigt die Energieeffizienzschätzung aufgrund des Versuchs 9. In der Spalte „Messwerte Versuch 9“ sind die während dem Versuch aufgezeichneten Daten zusammengefasst. Die Werte sind nach Vorheizen und Trocknung gegliedert.

1. Spalte: Messwerte

Die Spalte „Extrapolierte Werte“ enthält Daten, die sich durch lineare Extrapolation aus den Messwerten ergeben. Die Daten sind auf jenen Zeitpunkt extrapoliert, zu dem die Wäsche keine Feuchtigkeit mehr enthält.

2. Spalte: Extrapolation

Die Daten in der Spalte „Seriegerät“ zeigen teils geschätzte, teils berechnete Werte, welche aufgrund der vorliegenden Messungen mit einem zukünftigen Seriegerät erreichbar sind.

3. Spalte: Seriegerätschätzungen

	Messwerte Versuch 9	Extrapolier- te Werte	Seriegerät
Vorwärmen			
Vorheizzeit	61 min	61 min	30 min
Energiebedarf für Verdichtervorwärmung	0.268 kWh	0.268 kWh	0.134 kWh ¹
Energiebedarf für Schlauchheizung	0.406 kWh	0.406 kWh	0.000 kWh ²
Energiebedarf für Trommelheizung	0.470 kWh	0.470 kWh	0.341 kWh ³
Totaler Energiebedarf für Vorheizen	1.144 kWh	1.144 kWh	0.475 kWh
Trocknung			
Trocknungszeit	45 min	59 min	60 min
Wassergehalt in der Wäsche bei Prozessende	15%	0%	0%
Wirkungsgrad Verdichter	12% ⁴	12%	50% ⁵
Energiebedarf für Verdichter	0.917 kWh	1.225 kWh	0.301 kWh ⁶
Energiebedarf für Schlauchheizung	0.019 kWh	0.026 kWh	0.000 kWh
Energiebedarf für Trommelheizung	0.371 kWh	0.496 kWh	0.150 kWh ⁷
Totaler Energiebedarf für Trocknung	1.307 kWh	1.746 kWh	0.451 kWh
Total Trocknungsprozess			
Trocknungszeit	105 min	120 min	90 min
Energiebedarf	2.451 kWh	2.890 kWh	0.926 kWh
Energieklasse A	0.55 kWh/kg	0.55 kWh/kg	0.55 kWh/kg
Energieverbrauch / kg Wäsche		0.96 kWh/kg	0.31 kWh/kg
Erreichbare Energieklasse		1.8 * A	0.6 * A

Tab. 2: Energieabschätzung aufgrund des Versuchs 9. Die Spalte „Messwerte Versuch 9“ zeigt die während dem Versuch aufgezeichneten Daten. Die Spalte „Extrapolierte Werte“ zeigt die auf den Zeitpunkt der vollständigen Trocknung der Wäsche linear extrapolierten Werte. Die Spalte „Seriegerät“ zeigt die geschätzten Werte für ein zukünftiges Seriegerät.

¹ Der Energiebedarf zur Verdichtervorwärmung sollte durch geringere Verdichtermasse und geeignete Isolation auf die Hälfte reduziert werden können.

² Die Schlauchheizung wird im Seriegerät nicht mehr benötigt. Die Überhitzung der Verdichterzuleitung kann durch koaxiale Leitungsführung von der Verdichter-ableitung übernommen werden.

³ Der Energiebedarf um das System (Trommel, Wäsche, Wasser) aufzuheizen wird im Seriegerät durch ein viel geringeres Trommelgewicht erreicht.

⁴ Der eingesetzte Verdichter ist Faktor 2 überdimensioniert und läuft daher im benötigten Betriebspunkt mit nur 12% Wirkungsgrad.

⁵ Ein Wirkungsgrad von 50% ist mit einem Klauenverdichter bei optimaler Auslegung auf einen Betriebspunkt erreichbar.

⁶ Die Leistungsaufnahme des Verdichters reduziert sich aufgrund des besseren Wirkungsgrades.

⁷ Die Trommelheizung wird während des Trocknungsprozesses nur noch in geringem Umfang benötigt, da die Verdichterabwärme ihre Aufgabe zu einem grossen Anteil übernimmt.

Die Abschätzung der erreichbaren Energieeffizienzklasse ergibt einen Wert von 0.6 * A-Klasse, also ein A++. Dies entspricht den Werten, welche die besten marktüblichen Wärmepumpentrockner erreichen.

0.6*A-Klasse

3.2 Energieabschätzung mit theoretischem Modell

Im theoretischen Trocknermodell, welches in der ersten Projektphase erstellt wurde (siehe Bericht [1] "Energiesparender, wäscheschonender Trockner, Thermodynamik" vom 14. September 2006) war eine Grösse sehr unsicher und konnte nicht bestimmt werden. Dies war der Wärmeübergang von der Trommelinnenwand auf die Wäsche. Einige Analogien aus der Literatur ergaben zwar Anhaltspunkte doch der tatsächlich erreichbare Wert blieb offen.

Wärmeübergang im theoretischen Modell noch offen...

Mit den Messwerten aus den Versuchen am Funktionsmuster konnte der Wärmeübergang rechnerisch bestimmt werden. Er beträgt $44 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ und ist damit leicht höher als der höchste angenommene Wert von $40 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

... durch Messwerte bestimmt

Die untenstehende Graphik (Abb. 13) zeigt die Resultate aus der thermodynamischen Analyse (siehe Bericht [1] "Energiesparender, wäscheschonender Trockner, Thermodynamik" vom 14. September 2006).

Grafik aus theoretischer Analyse

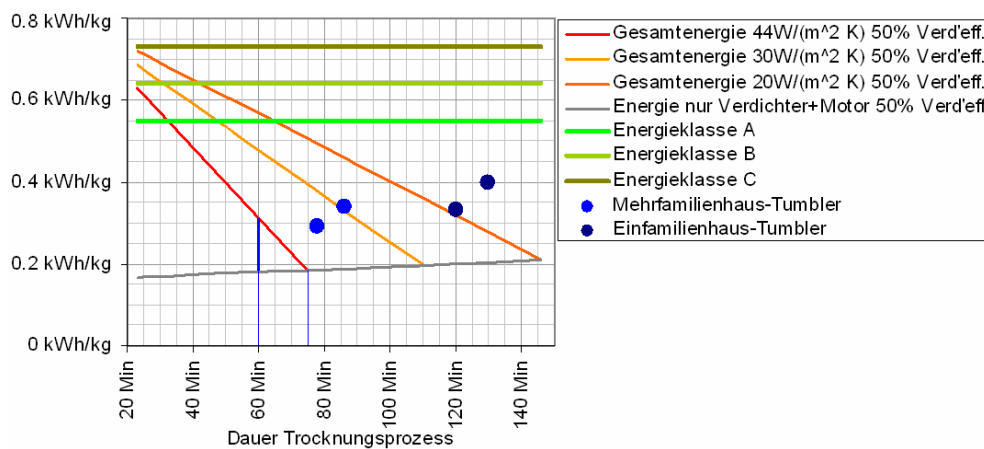


Abb. 13: Gesamtenergieverbrauch bei verschiedenen Wärmeübergängen und Trocknungszeiten. Mit aus den Versuchen errechneten $44 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ergibt sich für 60 min Trocknungszeit ca. $0.3 \text{ kWh}/\text{kg}$. Dies entspricht $0.55 \cdot \text{A-Klasse}$. Für 75 min Trocknungszeit ergibt sich ein Wert von $0.2 \text{ kWh}/\text{kg}$ oder $0.35 \cdot \text{A-Klasse}$.

Gezeigt ist die Energie, welche der Verdichter und der Trommelantrieb benötigen (graue Linie). Diese Kurve zeigt die erreichbare Effizienz, wenn keine Zusatzheizung eingesetzt wird. Die Kurve „Gesamtenergie $44 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ “ (rot) zeigt die erreichbare Energieeffizienz mit einer Zusatzheizung, welche die „Lücke“ zwischen grauer und roter Kurve füllt. Dies heisst beispielsweise bei 60 min Trocknungszeit liefert der Verdichter eine

0.55-0.35*A-Klasse erreichbar

Energie von ca. 0.18 kWh/kg trockener Wäsche und die Zusatzheizung liefert ca. 0.22 kWh/kg.

Je nach angestrebter Trocknungszeit ist also eine Energieeffizienzklasse von 0.5* A oder A+++ erreichbar. Damit erreicht der Vakuumentrockner die Effizienz der besten Wärmepumpentrocknern oder übertrifft diese sogar.

**Gleich gut oder
besser wie WP-
Trockner**

4 Fazit

Die Versuche am gebauten Funktionsmuster zeigen, dass das vorgeschlagene, neuartige und in den Berichten [1] und [2] beschriebene Trocknungsprinzip des Vakuumtrockners mit Wärmerückgewinnung funktioniert.

Trocknungsprinzip funktioniert

Die höchste Temperatur, welche in der Wäsche gemessen wurde, betrug 62 °C, wodurch auch die Wäscheschonung gewährleistet sein sollte. Es wurden im Flusensieb keine Flusen gefunden, es sammeln sich aber Flusen in Kanten der Trommel an. Über die Menge der anfallenden Flusen kann noch keine Aussage gemacht werden, sodass noch unsicher ist, ob die Wäsche auch in dieser Hinsicht geschont wird.

Wäsche wird höchstens 60 °C warm

Am Funktionsmuster wurden in den ersten Versuchen Trocknungsleistungen von 2 kg Wasser pro Stunde gezeigt. Das Ziel von 3 kg/h konnte in den ersten Versuchen noch nicht erreicht werden. Eine Steigerung der Trocknungsleistung ist aber durch verstärktes Zuheizen, durch optimale Wahl der Trommel-Drehzahl sowie möglicherweise durch eine veränderte Oberflächengestaltung der Trommel möglich. Die Trocknungsleistung wird durch den Wärmeübergang von der Trommelwand auf die Wäsche limitiert. Der Wärmeübergang nimmt mit zunehmender Trockenheit der Wäsche ab.

Trocknungsleistungen von 2 kg/h erreicht, Steigerungspotential ist vorhanden

Die Wärmerückgewinnung auf der Trommel funktioniert. Eine Quantifizierung dieser Wärmerückkopplung kann aber erst mit längeren Versuchsreihen in Angriff genommen werden.

Wärmerückgewinnung funktioniert

Im Kondensationsraum wurden bisher Temperaturen von 80 °C gemessen, womit das theoretische Maximum von 100 °C (reine Dampfphase) noch nicht ausgeschöpft wird. Hier ist noch Potenzial vorhanden, wenn es gelingt - durch geeignete Prozesssteuerung - eine möglichst hohe Dampfkonzentration im Kondensationsraum zu erzeugen.

Kondensationsraumtemp. noch steigerungsfähig

Die Fensterheizung ist problematisch, da die Scheibe - trotz hoher Infrarot-Transparenz - so stark erhitzt wird, dass Flusen daran festbacken. Die Fensterheizung kann aber durch eine Heizung ersetzt werden, welche die Trommelwand erwärmt. Mit dieser Heizung wurden in den Versuchen gute Erfahrungen gemacht.

Fensterheizung problematisch => ersetzt durch Trommelheizung

Die erreichbaren Trocknungszeiten müssen noch evaluiert werden. Aufgrund der gezeigten Entfeuchtungsleistungen sind Trocknungszeiten wie in herkömmlichen Trocknern aber durchaus denkbar.

Erreichbare Trocknungszeit ist noch offen

Die Energieeffizienz des Vakuumtrockners wurde auf 2 verschiedene Arten abgeschätzt. Aus den Messwerten ergibt sich eine geschätzte Effizienzklasse von 0.6*A oder A++. Aus dem verbesserten thermodynamischen Modell ergibt sich eine Energieeffizienzklasse von bis zu 0.35*A oder A+++.

Energieeffizienz von A+++ erreichbar

Damit erreicht der Trockner die Werte der besten marktüblichen Trocknern oder übertrifft diese sogar.

Die Versuche am Funktionsmuster haben ausserdem gezeigt, dass der Verdichter viel zu laut ist. Selbst wenn der Verdichter in einer Serielösung innerhalb der Isolation angeordnet wird, muss die Geräuschentwicklung des Verdichters noch reduziert werden. Erste Lösungsideen, wie der Einbau eines Auslassventiles, sind vorhanden.

**Verdichter viel
zu laut**

5 Ausblick

Mit dem Industriepartner sind Verhandlungen über das weitere Vorgehen im Gange, um das Funktionsmuster zu einem Prototypen weiter zu entwickeln und gleichzeitig einen neuen Verdichter zu entwickeln.

**Verhandlungen
mit Industrie-
partner über
weiteres
Vorgehen**

Anhang

A1. Instrumentierung

Am Funktionsmuster werden über 30 Messgrößen erfasst und ausgewertet. Verschiedene physikalische Messprinzipien werden eingesetzt und liefern elektrische Signale, die in einer Datenerfassung von National Instruments zusammengeführt und konditioniert werden.

Über 30 Messgrößen

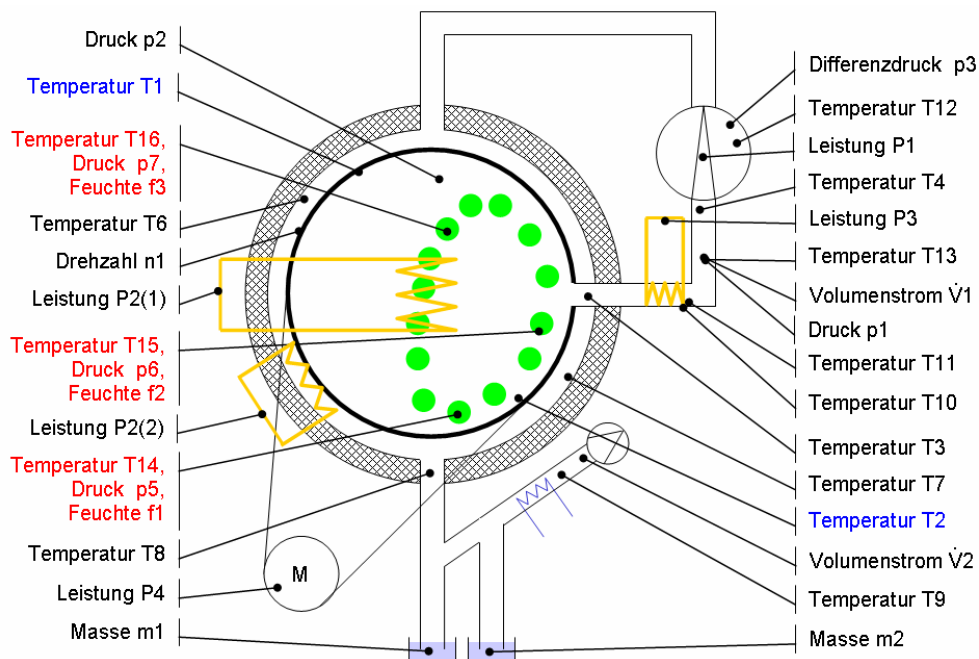


Abb. 14: Instrumentierungs-Schema: Temperaturen werden an der Trommelwand (T_1 & T_2), in der Wäsche (T_{14} & T_{15} & T_{16}), in den Rohrleitungen (T_3 & T_4 & T_9 & T_{10} & T_{11} & T_{13} & T_{14}), im Kondensationsraum (T_6 & T_7) und am Verdichter (T_{12}) gemessen. Es werden die Leistungen vom Verdichter (P_1), von den 2 Zusatzheizungen ($P_2(1)$ & $P_2(2)$), von der Rohrheizung (P_3) und vom Trommelantrieb (P_4) gemessen. Aus Druck (p_1), Temperatur (T_{13}) und Volumenstrom (V_1) wird der Massenstrom durch den Verdichter berechnet.

Die Temperaturen werden mittels Thermoelementen Typ K gemessen, Zwei Thermospannungswandler sind an der drehenden Trommel befestigt, so dass die Signale über eine Drehdurchführung der Spannungserfassung zugeführt werden müssen. Diese messen die Temperatur der Trommel-Innenwand.

Thermoelemente Typ K

Für Druckmessungen mit hohen Anforderungen sind hochpräzise Absolutdrucktransmitter eingebaut. Über der Vakuumpumpe wird mit einem

Absolutdrucktransmitter für genaue Messungen

Standard-Differenzdrucksensor die Drehrichtung des Elektromotors kontrolliert.

Für die Wassermassenwägung werden zwei Laborwaagen verwendet, die über eine digitale Schnittstelle verfügen und so an den Computer angebunden werden können.

**Massenwägung
mit Laborwaagen**

Leistungsmessungen erfolgen mit Echt-Effektiv-Stromwandlern oder werden über Handmultimeter angezeigt und durch den Operator notiert. Die Trommeldrehzahl erfasst ein Reedsensor am Antriebsstrang mit einem nachgeschalteten Drehzahlwandler.

**Leistungs- und
Drehzahl-
messung**

Eine kritische Messgrösse ist der Massenstrom durch die Vakuumpumpe. Nach längeren Abklärungen wurde schlussendlich ein Rotameter eingebaut, das auf dem Schwebekörperprinzip aufbaut und ein analoges Ausgangssignal liefert. Aus dem gemessenen Volumenstrom wird mit Temperatur und Druck der vom Verdichter geförderte Massenstrom errechnet.

**Massenstrom
wird mit Schwe-
bekörper
gemessen**

Für autonome Messungen in der Wäschetrommel stehen drei MSR-Datenlogger in der wasserdichten Ausführung zur Verfügung. Diese daumengrossen Universal-Messwertesammler können unter anderem im Sekundentakt Temperatur, Absolutdruck und die Feuchte aufzeichnen und nach dem Versuch mit den anderen Messwerten zeitsynchron kombiniert ausgewertet werden.

**Autonome
Sensoren für
Messungen in
der Wäsche**

A2. Steuerung, Messdatenerfassung

Die ganze Steuerung der Maschine und die Auswertung und Aufnahme der Messdaten erfolgt mittels einer in National Instruments Labview programmierten Software, einem VI (Virtual Instrument). Pro Messung wird ein Messdatenfile (ASCII-Tabelle) erzeugt, die von Excel gelesen werden kann.

**Steuerung mit
LabView**

Nebst allen aktuellen Messwerten, werden auch zeitliche Verläufe der wichtigsten Temperaturen, Wassermassen und Drücken so dargestellt, dass der Operator den Tumbler in den gewünschten Betriebspunkt steuern kann.

**Laufende Dar-
stellung am
Prüfstand**

Regler (z.B. Heizregler für die Rohrheizung) unterstützen den Operator, lassen aber immer auch manuelles Eingreifen zu. Fast alle Aktoren werden vom VI aus angesteuert und werden auch zusammen mit den Messwerten erfasst, so dass bei der Auswertung einer Messung alle Soll- und Ist-Werte zur Verfügung stehen.

**Regler zur
Vereinfachung
der Handhabung**

Um schon während der Messung den Massenstrom der Waagen darzustellen, werden in Pseudo-Echtzeit Messwerte miteinander verrechnet und die so errechneten Messgrößen fortlaufend dargestellt und auch mit aufgezeichnet, damit die anschliessende Messwerteanalyse in Microsoft Excel erleichtert wird.

**Massenstrom
über die
Waagen wird
errechnet**

A3. Versuche

A3.1. Versuch 1

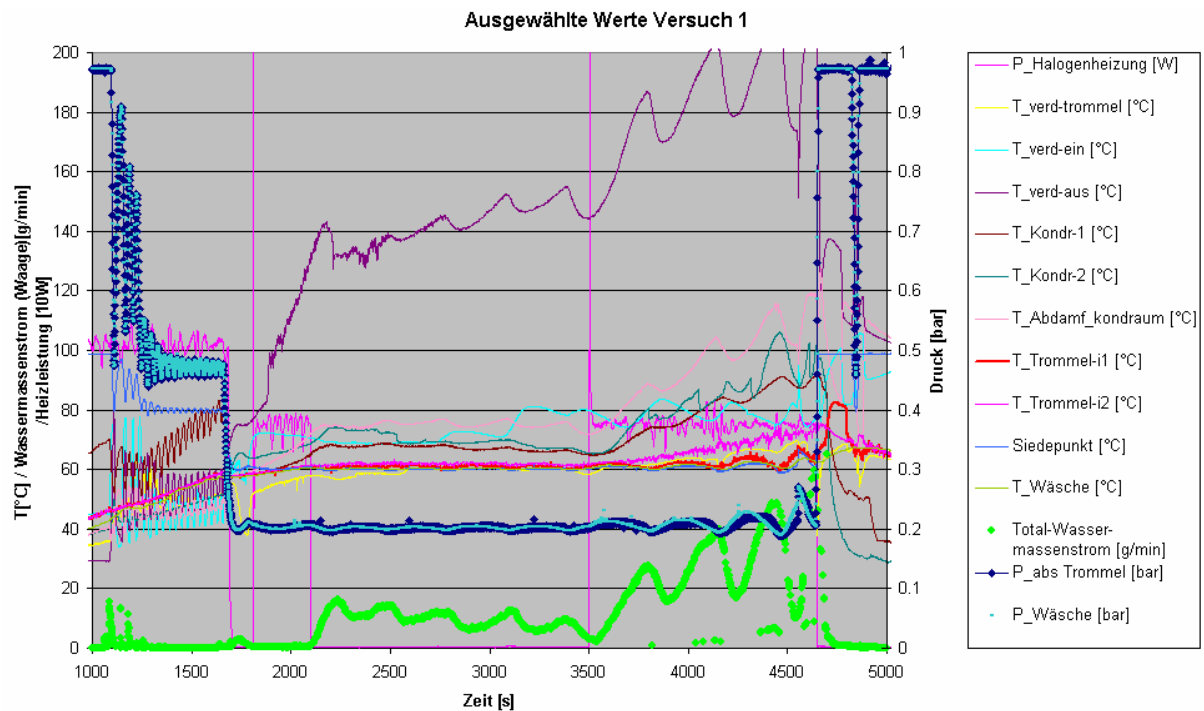


Abb. 15: Versuch 1: In der Grafik sind ausgewählte Temperaturen, der Trommeldruck sowie der Wasser-Massenstrom dargestellt.

A3.2. Versuch 2

Beim 2. Versuch wurde ein Betriebspunkt von 0.2 bar absolut und 60 °C in der Trommel angestrebt und die Trommel wurde mit 5 kg Wäsche und 3 l Wasser (66 % Feuchtigkeit) gefüllt

0.2 bar / 60 °C
5 kg Wäsche /
3 l Wasser

Die Wäsche wurde mit der Fensterheizung mit 1 kW vorgewärmt. Der aufgezeichnete Messwert der Heizung ist ungenau. Die Heizleistungen betragen jeweils 0, 500 oder 1000 W, wobei der genaue Wert durch eine Handmessung mit Multimetern eingestellt wurde.

Vorwärmen mit
Fensterheizung

Der Verdichter wurde in diesem Versuch nach kurzer Regelung auf 0.2 bar umgeschaltet auf volle Leistung (50 Hz). Dadurch sank der Trommeldruck bei diesem Versuch bis auf 0.15 bar ab.

Verdichter auf volllast

Die Trocknungsleistung von 30-35 g/min (ca. 2 kg/h) lag bei diesem Versuch noch nicht ganz so hoch wie gewünscht (3 kg/h), aber die Größenordnung stimmt.

Trocknungsleistung in gewünschter Größenordnung

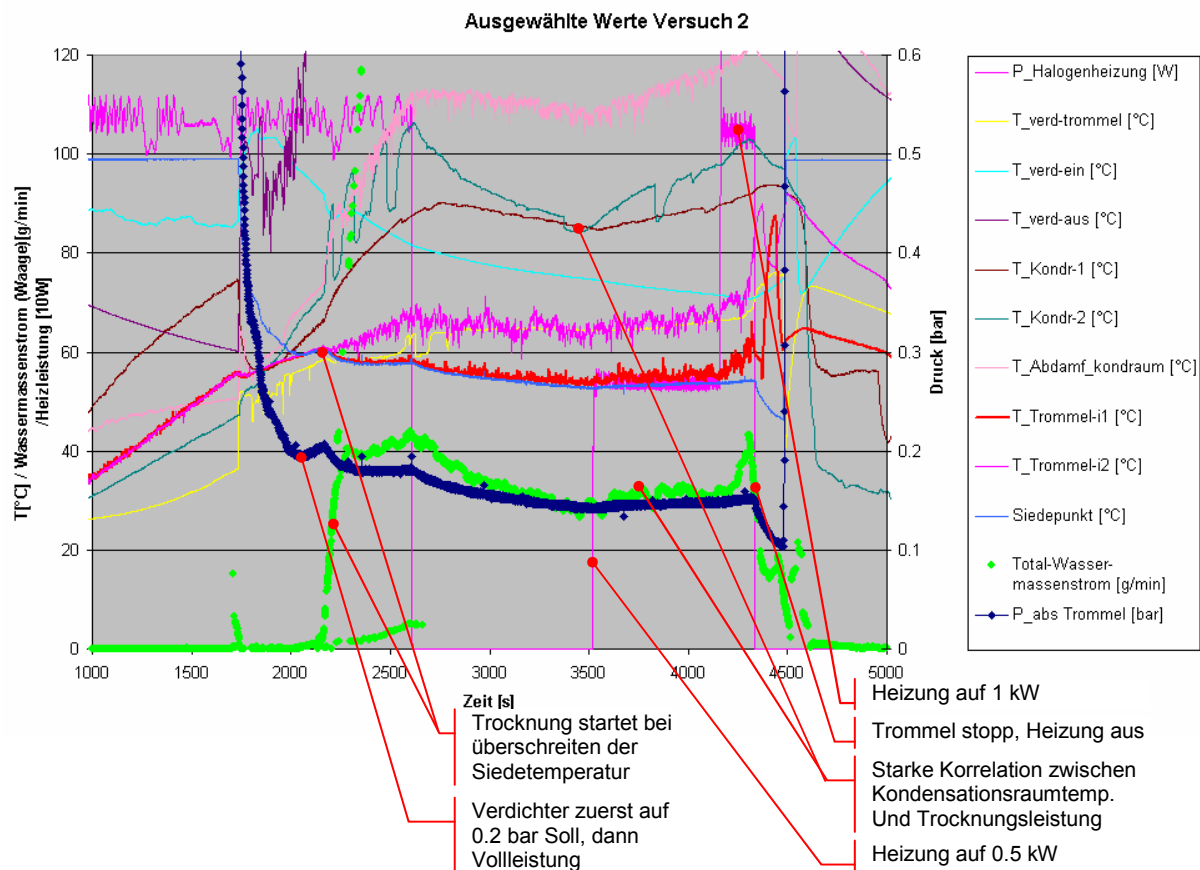


Abb. 16: Versuch 2: In der Grafik sind ausgewählte Temperaturen, der Trommeldruck sowie der Wasser-Massenstrom dargestellt.

Die Entfeuchtungsleistung zeigt eine direkte Korrelation mit der Kondensationsraumtemperatur. Die Temperatur im Kondensationsraum ist ein gutes Mass für den Energieinhalt des System. Diese Temperaturen steigen sofort an, wenn die Zusatzheizung eingeschaltet wird und sinken bei ausgeschalteter Heizung stetig ab. Der Prozess entzieht dem System bei ausgeschalteter Heizung Energie und die Entfeuchtungsleistung sinkt ab (siehe auch Versuch 3, Abschnitt A3.3).

Kondensationsraumtemp. zeigt Energieinhalt des Systems

Der Versuch wurde wegen eines Versagers im Trommelantrieb (Bruch der Kupplung zwischen Motor und Getriebe) abgebrochen. Auch bei diesem Versuch wurde das Fenster durch angebackene Flusen stark geschwärzt, der nun eingesetzte temperaturbeständigere O-Ring ertrug die Belastung aber einwandfrei.

Bruch im Trommelantrieb

A3.3. Versuch 3

Bei diesem Versuch wurde ebenfalls mit 3 kg Wäsche und 2 l Wasser gearbeitet. Dabei wurde der Verdichter von Beginn weg unter Volllast betrieben.

**3 kg Wäsche /
2 l Wasser**

Die Zusatzheizung wurde in diesem Versuch ab Trocknungsbeginn ausgeschaltet. Dadurch blieb die Trocknungsleistung zwar eher klein (15-20 g/min) sank aber nur langsam ab. Dies zeigt, dass die Wärmerückgewinnung vom Wasserdampf durch die Trommelwand auf die feuchte Wäsche funktioniert. Der Energieinhalt des Systems reichte also aus, um den Prozess 5/4 Stunden lang aufrecht zu erhalten und war danach noch nicht erschöpft.

**Trocknung ohne
Zusatzheizung**

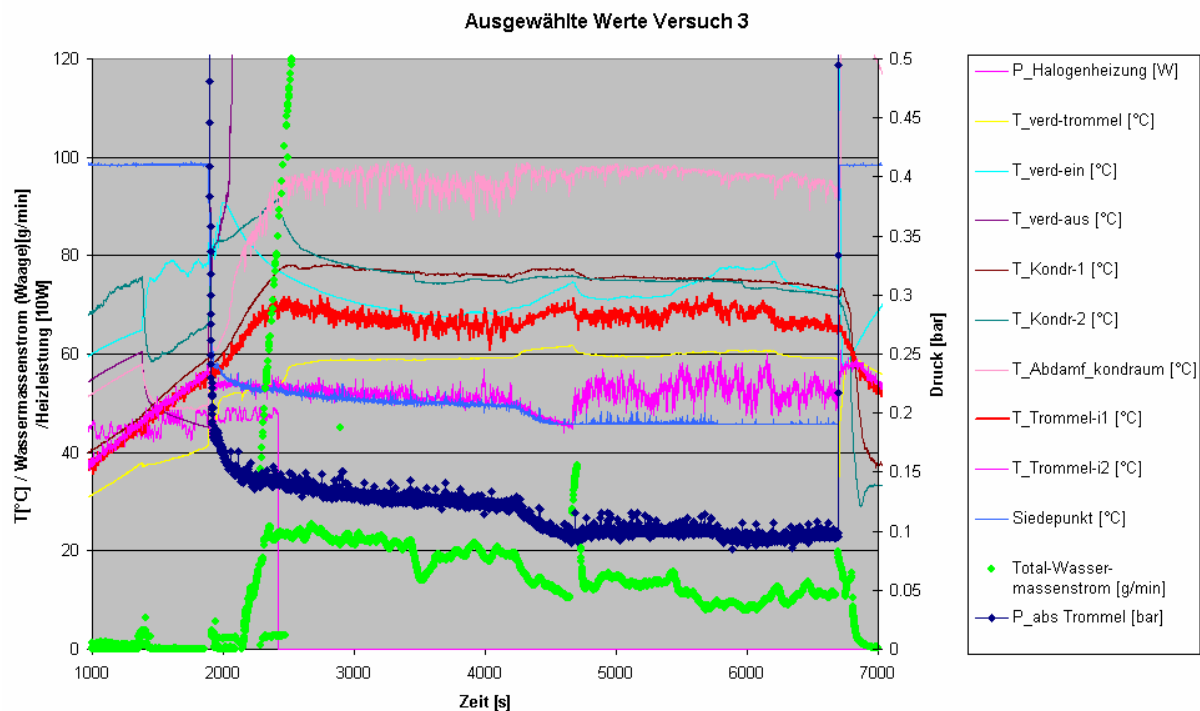


Abb. 17: Versuch 3: In der Grafik sind ausgewählte Temperaturen, der Trommeldruck sowie der Wasser-Massenstrom dargestellt.

Bei diesem Versuch wurde erstmals die Trommeldrehzahl gezielt variiert, um die optimale Drehzahl zu finden. Aus diesen und weiteren Versuchen wurde eine Drehzahl von 40 U/min als Optimum gefunden, bei welcher der Wärmeübergang von der Trommelwand auf die Wäsche möglichst gross ist. Diese Drehzahl ist auch davon abhängig, wie stark die Trommel befüllt ist. Um dazu genauere Werte zu ermitteln sind weitere Messreihen notwendig.

**Trommel-Dreh-
zahl 40 U/min**

Nach Abbruch des Versuches bleibt eine Restfeuchte von 22 % in der Wäsche, das Massendefizit betrug dank der neuen Kühlfalle nur 100 g. Das

**Restfeuchte
22 %**

Massendefizit stieg bei den weiteren Versuchen allerdings zum Teil stark an.

A3.4. Versuch 4

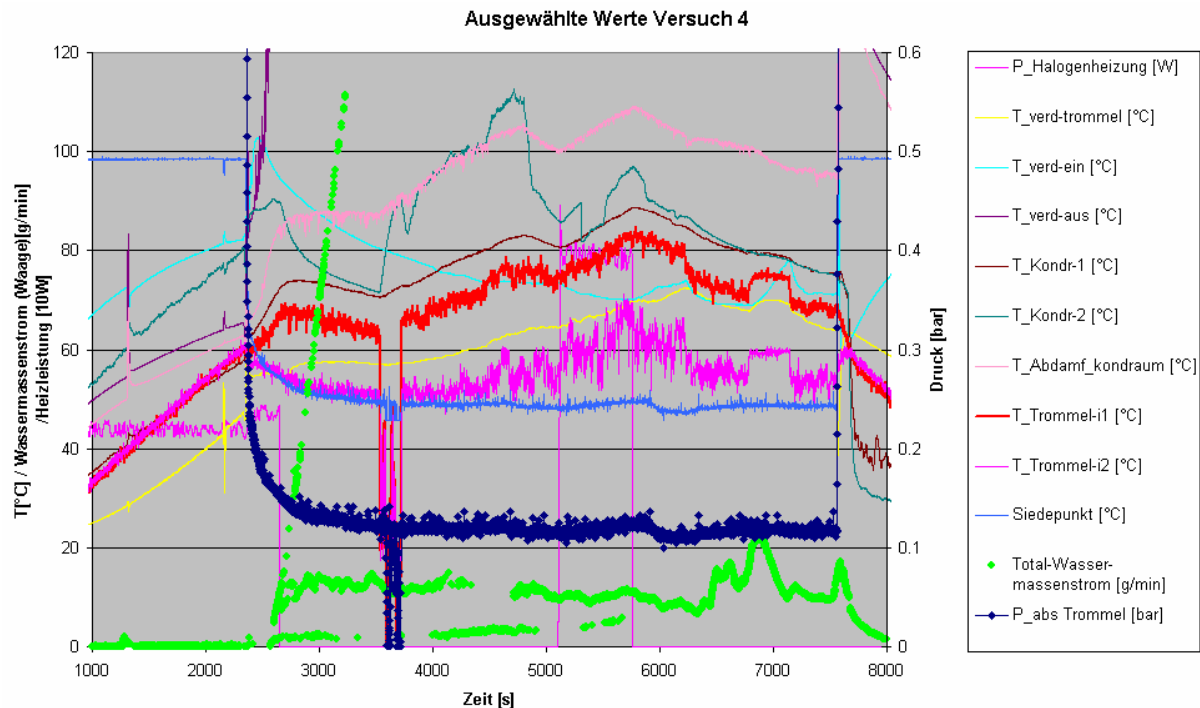


Abb. 18: Versuch 4: In der Grafik sind ausgewählte Temperaturen, der Trommeldruck sowie der Wasser-Massenstrom dargestellt.

Die Wäsche wurde bei diesem Versuch - wieder mit zeitweisem Einsatz der Zusatzheizung - bis auf eine Restfeuchte von 17 % getrocknet. Es bestand zum Schluss ein Massendefizit von 470 g.

**Restfeuchte
17 %**

A3.5. Versuch 5

Der Versuch wurde kurz unterbrochen, da die Datenaufzeichnung der Waagen schlecht funktionierte. Das hohe Massendefizit von 1 kg dürfte damit zusammenhängen. Die restlichen Messwerte sind wie immer korrekt.

**Unterbruch im
Versuch**

Bei diesem Versuch gelang es zum ersten Mal, die Wäsche zu trocknen. Das Gewicht der nach Versuchsende entnommenen Wäsche entsprach genau demjenigen der trockenen Wäsche bei Versuchsbeginn (3 kg).

**Wäsche voll
trocken**

Die Entfeuchtungsleistung sinkt mit zunehmender Trockenheit der Wäsche ab, was auch durch vermehrten Einsatz der Heizungen nicht vollständig ausgeglichen werden kann.

Entfeuchtung sinkt bei trockener Wäsche ab

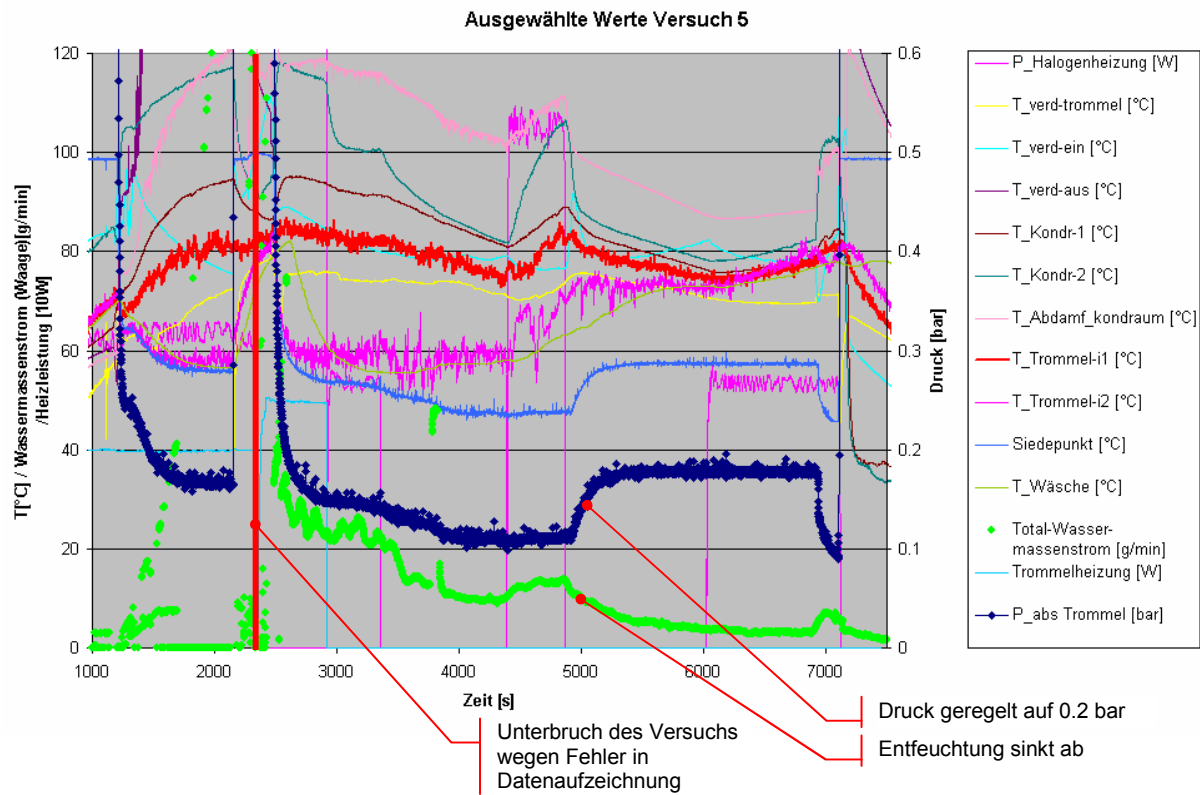


Abb. 19: Versuch 5: In der Grafik sind ausgewählte Temperaturen, der Trommeldruck sowie der Wasser-Massenstrom dargestellt.

A3.6. Versuch 6

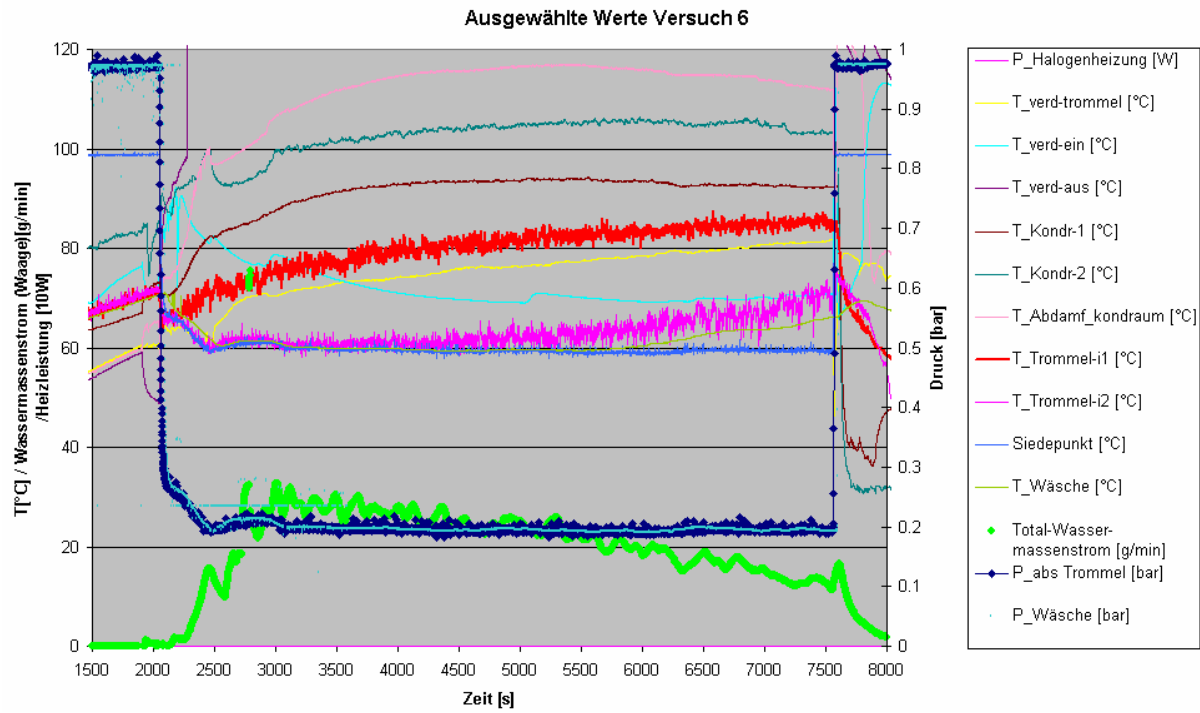


Abb. 20: Versuch 6: In der Grafik sind ausgewählte Temperaturen, der Trommeldruck sowie der Wasser-Massenstrom dargestellt.

A3.7. Versuch 7

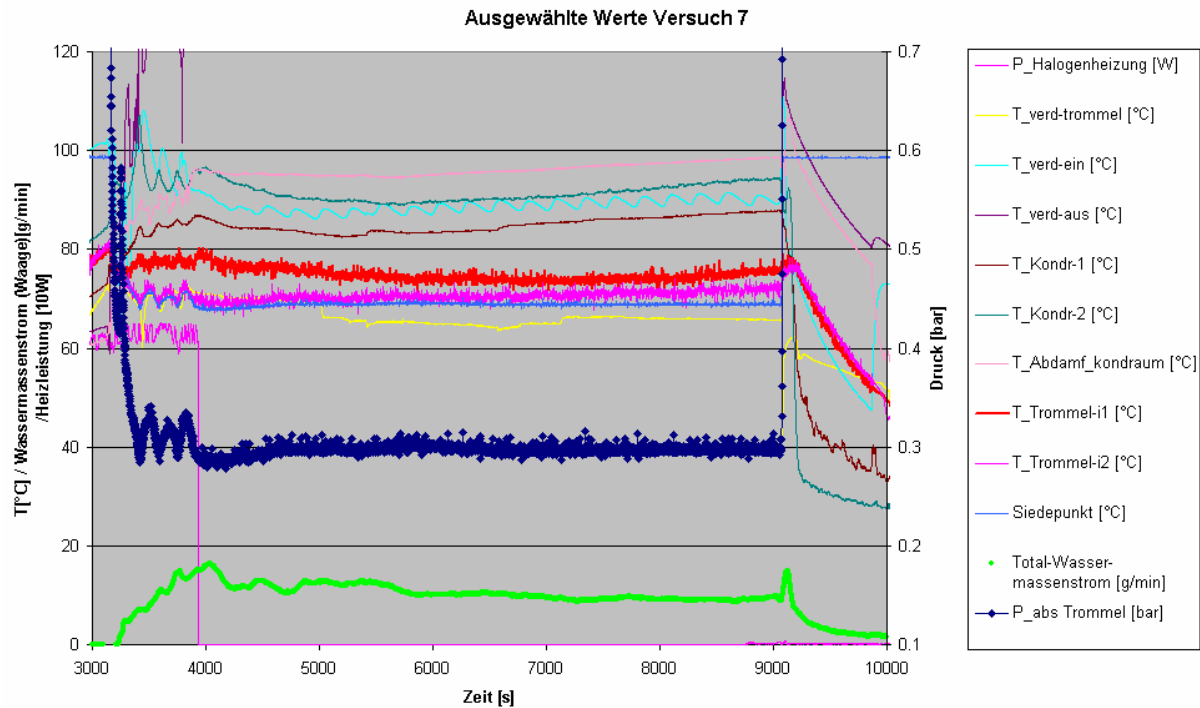


Abb. 21: Versuch 7: In der Grafik sind ausgewählte Temperaturen, der Trommeldruck sowie der Wasser-Massenstrom dargestellt.

Im Versuch 7 wurde der Druck auf 0.3 bar geregelt, um den Effekt eines anderen Druckniveaus zu testen. Die Temperaturen bleiben während des ganzen Versuchs ziemlich konstant, obwohl die Zusatzheizung beim Einsetzen des Trocknungsprozesses ausgeschaltet wurde.

0.3 bar

Das System lief in diesem Betriebspunkt also stabil (ohne von Energieinhalt des Systems zu zehren). Allerdings ist die Entfeuchtungsrate sehr gering. Es blieb dann beim Versuchsabbruch auch eine Restfeuchte von 300 g (10 %) in der Wäsche zurück.

System stabil

Entfeuchtungsleistung klein

A3.8. Versuch 8

Zum Versuch 8 sind keine Daten vorhanden, da das Messdatenerfassungsprogramm defekt war.

A3.9. Versuch 9

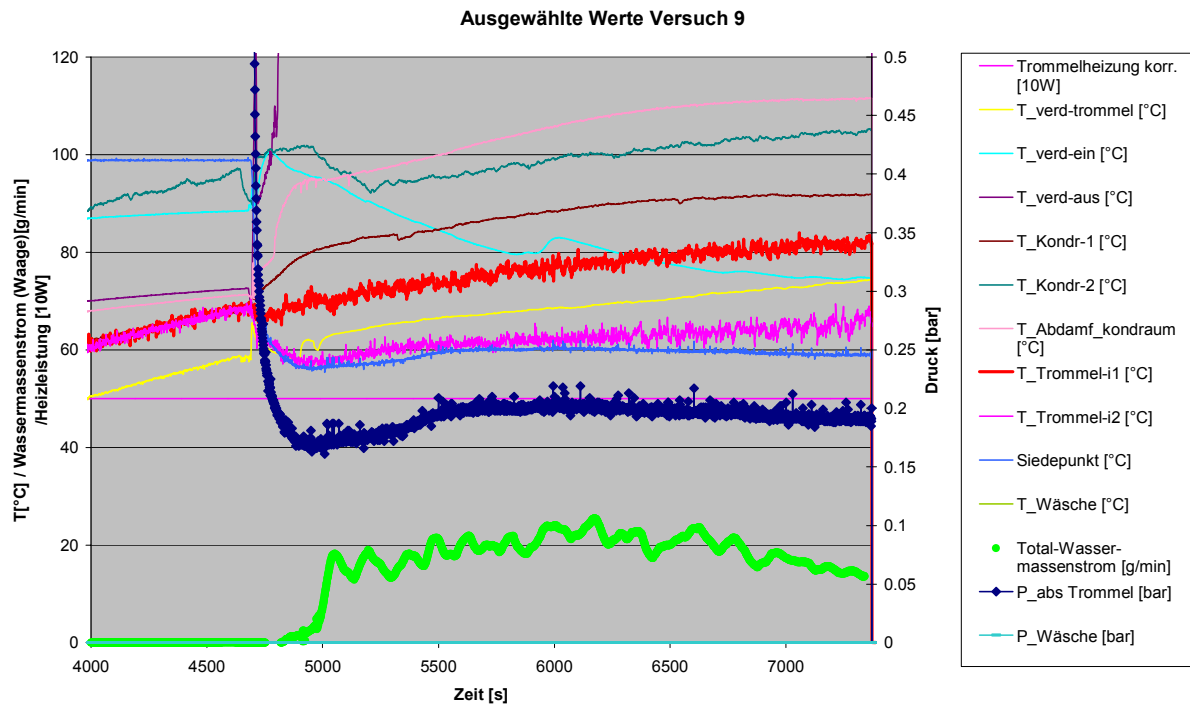


Abb. 22: Versuch 9: In der Grafik sind ausgewählte Temperaturen, der Trommeldruck sowie der Wasser-Massenstrom dargestellt.

In Versuch 9 wurde ein stationärer Betriebszustand eingestellt, um für die Abschätzung des Energiebedarfs eine möglichst eindeutige Datenbasis zu erhalten. Der Verdichter wurde dabei auf 0.2 bar geregelt. Der „stationäre“ Zustand wurde ca. 15 Minuten nach dem Start des Trocknungsprozesses erreicht.

Stationärer Betrieb für Energiebilanz

Die Zusatzheizung wurde während des gesamten Versuchs mit 500 W betrieben. Dies simuliert die Abwärme eines Verdichters mit 1000 W und 50% Wirkungsgrad, welche bei geeigneter Konstruktion im System erhalten bleibt.

500W Zusatzheizung simuliert Verdichterabwärme

Bis zum Versuchsabbruch wurde 1.35 kg Wasser aus der Wäsche entnommen. Dies entspricht einer Entfeuchtungsleistung von 1.8 l/h, wobei die Trocknungsleistung mit zunehmender Trockenheit der Wäsche abnimmt.

Entfeuchtung von 1.8 l/h

A4. Literaturliste

- [1] *Friedl, M (2006)* "Energiesparender, wäscheschonender Trockner, Thermodynamik", Bericht R001, 14. September 2006
- [2] *Friedl, M. und Weilenmann, U. (2006)* "Energiesparender, wäscheschonender Trockner, Thermodynamik und Funktionsmuster", Bericht R002, 4. Dezember 2006