

Ganzheitliche Untersuchung von kältemittelfreien thermoelektrischen Wäschetrocknertechnologien

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 32384 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Projektleiter: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Ragnar Somdalen
Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler
Verfasser: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Ragnar Somdalen
Antragssteller: TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik

Braunschweig, Mai 2017

gefördert durch



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben:

Ganzheitliche Untersuchung von kältemittelfreien thermoelektrischen
Wäschetrocknertechnologien

Projektleitung:

Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

Institut für Thermodynamik

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Ragnar Somdalen / Dr.-Ing. Wilhelm Tegethoff / Dr.-Ing. Nikolas Lemke
/ Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler

Hans-Sommer-Str. 5

38106 Braunschweig

Tel.: +49 (0)531 / 391 - 2627

E-Mail: ift@tu-bs.de

Internet: www.ift.tu-bs.de

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	32384/01	Referat	24/0	Fördersumme	123.050,00
----	----------	---------	-------------	-------------	-------------------

Antragstitel **Ganzheitliche Untersuchung von kältemittelfreien thermoelektrischen Wäschetrocknertechnologien**

Stichworte Thermoelektrik, Wäschetrockner, Energie

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
18 Monate	01.01.2015	30.09.2016	1

Zwischenberichte	2
------------------	---

Bewilligungsempfänger	Technische Universität Braunschweig	Tel	0531/391-2627
	Institut für Thermodynamik	Fax	0531/391-7814
	Herr Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler	Projektleitung	
	Hans-Sommer-Str. 5	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler	
38106 Braunschweig	Bearbeiter		
		Dipl.-Wirtsch.-Ing. Ragnar Somdalen	

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Für den Wärmepumpenprozess in einem Wäschetrockner wird derzeit standardmäßig das Kältemittel R134a eingesetzt, welches mit einem GWP-Wert von 1430 eine hohe Treibhauswirkung besitzt. Ein konventioneller Kondensationswäschetrockner weist in etwa einen elektrischen Energieverbrauch von 3,5 – 4,4 kWh pro Norm-Trocknungsgang auf und liegt damit etwa beim doppelten Energieverbrauch eines Wärmepumpentrockners. Die negative Umweltauswirkung konventioneller Kondensationstrockner hat seine Ursache somit im deutlich höheren Energieverbrauch. Bei konventionellen Wärmepumpentrockner belastet neben dem Energieverbrauch zusätzlich auch die Nutzung umweltbedenklicher Kältemittel die Umwelt. Mit der Nutzung thermoelektrischer Module für die Wäschetrocknung wird an beiden Punkten angesetzt. Zum einen wird eine kältemittelfreie thermoelektrische Wärmepumpe verwendet, die die Entsorgung deutlich einfacher gestaltet. Zum anderen wird der Trocknungsprozess durch das gleichzeitige thermoelektrische Kühlen und Heizen im Vergleich zum Kondensationstrockner deutlich effizienter ausfallen.

Ziel des beantragten Förderprojektes ist eine grundlegende ganzheitliche Untersuchung der Wäschetrocknung mittels thermoelektrischer Wärmepumpe und das Aufbauen eines Prototyps, welcher mit der Effizienz von marktverfügbaren Geräten vergleichbar ist. Hierbei werden erstmalig die komplexen Wechselwirkungen zwischen der Wäschetrocknung als solcher und einem thermoelektrischen Wärmepumpenprozess im transienten Prozessverlauf grundlegend untersucht. Für einen geringen Energieverbrauch pro Normtrocknungsgang müssen neue Betriebsstrategien entwickelt werden, die sowohl auf die Systemkonfiguration als auch auf die Besonderheiten der transienten Prozessführung abgestimmt sein müssen. Hierfür werden neuartige Optimierungsmethoden basierend auf transienten Systemmodellen zum Einsatz kommen. Die Ergebnisse detaillierter transienter Systemsimulationen werden mit Messergebnissen des aufgebauten Prototyps eines thermoelektrischen Wäschetrockners verglichen. Somit wird ein ganzheitliches Konzept eines thermoelektrischen Wäschetrockners zur Verfügung gestellt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Als Grundlage für die Untersuchungen dient ein Kondensationstrockner gemäß aktuellem Stand der Technik. Davon ausgehend wird ein vielversprechendes Anlagenschema für einen Trockner mit einer thermoelektrischen Wärmepumpe erarbeitet und ein entsprechender Prototyp aufgebaut. Der Prototyp wird wiederum im Detail analysiert und Optimierungspotenziale hinsichtlich des Energieverbrauchs werden abgeleitet. Die entwickelten Simulationsmodelle dienen dazu, Sensitivitätsanalysen und Parameterstudien durchzuführen und unterschiedliche Geometrien und Verschaltungen bewerten zu können. Zusätzlich werden durch die transiente Abbildung der physikalischen Effekte, Strategien hinsichtlich einer optimalen dynamischen Betriebsweise entwickelt, die einen minimalen Energieverbrauch ermöglichen. Das Einsparpotenzial wird schließlich validiert und der Energieverbrauch im Detail mit den im Rahmen des Projekts definierten Referenzsystemen eines Kondensationstrockners und eines Wärmepumpentrockners verglichen.

Ergebnisse und Diskussionen

In einer Konzeptionierungsphase wurden günstige Prozess- und Geometrieparameter für ein thermoelektrisches Wäschetrocknersystem identifiziert. Nach einer Abschätzung des zu erwartenden Betriebsbereichs wurde ein Prototyp eines thermoelektrischen (TE) Wärmeübertragers gefertigt. Durch Integration in den Prozessluftkreislauf eines Kondensationstrockners wurde außerdem ein Prototyp eines thermoelektrischen Wäschetrockners aufgebaut und ausführlich vermessen.

Es wurde ein detailliertes Modell bestehend aus vorhandenen Wäschetrocknerkomponenten und einem entwickelten Modell eines TE-Wärmeübertragers erstellt. Dieses konnte mittels zahlreicher Messungen am aufgebauten Prototypen ausreichend validiert werden. In einer anschließenden thermodynamischen Analyse konnten potentielle Verlustmechanismen des thermoelektrischen Wäschetrockners aufgezeigt werden.

Mit Hilfe verschiedener Parameterstudien unter sowohl stationären als auch dynamischen Randbedingungen konnten vorteilhafte Systemkonfigurationen und wichtige Einflussgrößen auf das Systemverhalten identifiziert werden. Es wurden zwei Betriebsarten definiert. Eine Betriebsart hat die Minimierung des Energieverbrauchs zum Ziel. Mit der zweiten Betriebsart wird eine minimale Trockendauer angestrebt. Durch die dynamischen Untersuchungen wurde das energetische Einsparpotential für einen optimierten transienten Trocknerbetrieb evaluiert. Weiterhin zeigten die Untersuchungen, dass im Vergleich zum herkömmlichen Kondensationstrockner die Trockendauer deutlich reduziert werden kann.

Die Trockendauer des TE-Wäschetrockners ist für die Betriebsart minimaler Trockendauer 40 % geringer als die eines herkömmlichen Kondensationstrockners bei leicht geringerem Energieverbrauch. Mit der Betriebsart eines minimalen Energieverbrauchs benötigt der TE-Wäschetrockner etwa 26 % weniger Energie als ein herkömmlicher Kondensationstrockner. Er kann somit sowohl im Hinblick auf den Energieverbrauch als auch im Hinblick auf die Trockendauer mit handelsüblichen Kondensationstrocknern konkurrieren.

Im Vergleich mit einem Wärmepumpenwäschetrockner kann der TE-Wäschetrockner zwar deutlich schneller als ein handelsübliches Seriengerät trocknen, verbraucht dabei aber auch mehr Energie. Der im Rahmen des Projekts konzipierte TE-Wäschetrockner benötigt bei optimalen Einstellungen etwa 46 % weniger Zeit bei doppeltem Energieverbrauch. Bei energieoptimaler Betriebsart benötigt der TE-Wäschetrockner knapp 58 % mehr Energie und trocknet die Wäsche etwa 32 % langsamer. Vorteile gegenüber dem Wärmepumpentrockner kann jedoch die flexible Steuerung der Modulstromstärke bieten. Diese ermöglicht die einfache Umsetzung verschiedener Betriebsarten, die vom Nutzer eingestellt werden könnten, wie bspw. eine besonders geringe Trockendauer. Entwicklungen in der Materialwissenschaft lassen eine weitere Steigerung der Effizienz thermoelektrischer Module zu. Die Güte thermoelektrischer Module hängt von drei Materialparametern ab. Eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit bei Auslegungstemperatur zum Beispiel um 50 % bewirkt einen Energieverbrauch, der nur noch etwa 30 % höher als der eines handelsüblichen Wärmepumpentrockners ist. Dabei ist die Trockendauer rund 20 % geringer.

Es wurde eine Studie durchgeführt, die potentielle Umweltauswirkungen der betrachteten Wäschetrocknertechnologien in verschiedenen Nutzungsszenarien miteinander vergleicht. Unter Berücksichtigung der Produktion und Entsorgung der Geräte besitzt der TE-Wäschetrockner in den meisten Nutzungsszenarien ein Treibhauspotential, das zwischen denen der handelsüblichen Geräte liegt. Bei geringer Gerätenutzung ist ein Kondensationstrockner am umweltschonendsten. Bei hoher Gerätenutzung emittiert ein Wärmepumpentrockner am wenigsten CO₂. Da der TE-Wäschetrockner kein Kältemittel enthält, gestaltet sich jedoch die Entsorgung einfacher als bei einem Wärmepumpentrockner.

Der TE-Wäschetrockner ist in der Lage, Wäsche schneller als handelsübliche Geräte mit geschlossenem Prozessluftkreislauf zu trocknen. Für Waschalons und andere Nutzer, bei denen die Zeit - bspw. über Personalkosten - den größten Kostenfaktor bildet, stellt der TE-Trockner eine Alternative zu am Markt verfügbaren Wäschetrocknern dar. Er bietet damit ein hohes Potential zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes zukünftiger Trocknergenerationen. Ausgehend von einem Austausch der Hälfte der aktuell verwendeten Kondensations- durch TE-Wäschetrockner (ca. 6,75 Mio. Geräte), könnte der CO₂-Ausstoß um 4,81 bis 9,51 Mio. Tonnen reduziert werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

R. Somdalen, „Theoretical investigation of a novel thermoelectric laundry dryer system“, in *Materials Today: Proceedings, 14th European conference on Thermoelectrics*, Lissabon, 2016. R. Somdalen, „Thermodynamische Analyse eines Thermoelektrischen Wäschetrockners“, Dissertation an der TU Braunschweig, wird 2017 eingereicht.

Fazit

Durch das Vorhaben konnte grundsätzlich gezeigt werden, dass ein thermoelektrischer Wäschetrockner mit am Markt verfügbaren Geräten im Hinblick auf die Trockendauer konkurrieren kann. In Bezug auf den Energieverbrauch liegt der thermoelektrische Wäschetrockner zwischen einem handelsüblichen Kondensationstrockner und einem Wärmepumpentrockner. Fortschritte in der Materialwissenschaft könnten hier zu einer weiteren Verbesserung des thermoelektrischen Wärmepumpeneffekts und damit zu einer weiteren Reduzierung des Energieverbrauchs führen.

Inhalt

1	Zusammenfassung.....	9
2	Einleitung.....	11
2.1	Ausgangssituation.....	11
2.2	Zielsetzung und Aufgabenstellung.....	11
3	Prototypenauslegung eines thermoelektrischen Wäschetrockners.....	13
3.1	Bestehende Wäschetrocknerkonzepte.....	13
3.2	Das thermoelektrische Wäschetrocknerkonzept.....	15
3.3	Identifizierung charakteristischer Größen bei Haushaltswäschetrocknern.....	18
3.4	Entwurf des thermoelektrischen Wärmeübertragers für die Wäschetrocknung.....	21
4	Messtechnische Untersuchungen.....	24
4.1	Vermessung des Referenzsystems eines Kondensationstrockners.....	24
4.2	Messaufbau des thermoelektrischen Wäschetrockners.....	26
4.3	Durchführung der Messung.....	28
4.4	Ergebnisse der Messung.....	29
5	Modellerstellung für einen thermoelektrischen Wäschetrockner.....	39
5.1	Modellierung der bestehenden Systemkomponenten.....	39
5.2	Modellerstellung des TE-Wärmeübertragermodells.....	40
5.3	Modellvalidierung.....	48
5.3.1	Kondensationstrockner.....	48
5.3.2	Thermoelektrischer Wäschetrockner.....	50
6	Systemanalyse eines thermoelektrischen Wäschetrockners.....	54
6.1	Identifikation von Einflussfaktoren auf das dynamische Trocknungsverhalten.....	54
6.2	Parameterstudien.....	54
6.2.1	Parameterstudie eines thermoelektrischen Wärmeübertragers.....	54
6.2.2	Parameterstudie des thermoelektrischen Wäschetrockners.....	59
6.3	Vergleich und Bewertung des thermoelektrischen Wäschetrockners mit den Referenzsystemen.....	66
6.3.1	Vergleich der Wäschetrocknersysteme.....	68
6.3.2	Kostenabschätzung eines thermoelektrischen Wäschetrockners.....	70
7	Potentielle Umweltentlastung.....	72
8	Fazit.....	76
	Literaturverzeichnis.....	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fließschema eines Kondensationstrockners	13
Abbildung 2: Fließschema eines Wärmepumpentrockners.....	14
Abbildung 3: Typische Trocknungskurve für Textilien.....	15
Abbildung 4: Fließschema des neuen Konzepts eines Thermoelektrischen Wäschetrockners. Die Kombination des Wärmepumpenkonzepts mit einem Luftkühler ermöglicht eine flexible Nutzung der thermoelektrischen Module.	15
Abbildung 5: Typische Trocknungsdreiecke bei konstanter Trocknungsgeschwindigkeit. Die Prozessführung eines TE-Wäschetrockners kann direkt über die Modulleistung beeinflusst werden.	16
Abbildung 6: Verlauf von COP und Kälteleistung über der Stromstärke eines Hochleistungsmoduls TM-241-1.6-28.0MM der Firma Ferrotec-Nord Corporation für unterschiedliche Modultemperaturdifferenzen.	18
Abbildung 7: Exemplarischer Temperaturverlauf der Trommeleintritts- und Trommelaustrittstemperatur der vorgestellten Trocknersysteme.	19
Abbildung 8: Definition der mittleren Modultemperaturdifferenz im thermoelektrischen Wärmeübertrager. Die am jeweiligen Modul vorliegende Temperaturdifferenz ist positionsabhängig.	20
Abbildung 9: Messaufbau des Referenzrockners.....	25
Abbildung 10: Gemittelte Werte der Messungen eines Kondensationstrockners mit 7 kg Wäschebelastung.....	25
Abbildung 11: Messaufbau des thermoelektrischen Wäschetrockners.	26
Abbildung 12: Prototypenzeichnung des thermoelektrischen Wärmeübertragers zur Wäschetrocknung. Die Kaltseite der Module ist blau, die Warmseite ist rot eingefärbt. Durch Aufteilung der Module auf zwei Schichten können die Wärmeübertragerflächen größer gestaltet werden.....	27
Abbildung 13: Repräsentativer Druckverlauf im Prozessluftkreislauf des thermoelektrischen Wäschetrockners.	30
Abbildung 14: Prozesslufttemperaturen des thermoelektrischen Wäschetrockners bei unterschiedlicher Leistungsaufnahme der Module.....	31
Abbildung 15: Ein- und austretende Energieflüsse des thermoelektrischen Wärmeübertragers.....	32
Abbildung 16: Energieflussdiagramm des thermoelektrischen Wärmeübertragers für einen typischen Zustand konstanter Trocknungsgeschwindigkeit. Durch die Aufteilung in drei Bilanzräume wird der thermoelektrische Wärmepumpeneffekt verdeutlicht.....	33
Abbildung 17: An thermoelektrischen Modulen vorliegende Gesamtleistung bei einer Modulstromstärke von 6 A.....	34
Abbildung 18: An thermoelektrischen Modulen vorliegende Gesamtleistung bei einer Modulstromstärke von 7 A.....	35
Abbildung 19: An thermoelektrischen Modulen vorliegende Gesamtleistung bei einer Modulstromstärke von 8 A.....	35

Abbildung 20: Exergieflussdiagramm des thermoelektrischen Wärmeübertragers. Der im jeweiligen Kontrollvolumen vorliegende Exergieverlust ist als gestrichelter hellblauer Pfeil eingezeichnet.....	36
Abbildung 21: Skizze des Simulationsmodells eines thermoelektrischen Wäschetrockners in Modelica.....	39
Abbildung 22: Skizze der thermischen Widerstände innerhalb des Wärmeübertragers. Durch eine Diskretisierung in Stromflussrichtung wird der Detailgrad der Modellierung deutlich gesteigert.....	41
Abbildung 23: Skizze der thermischen Verschaltung des thermoelektrischen Wärmeübertragers.....	43
Abbildung 24: Modellierte TE-Wärmeübertragergeometrien.....	43
Abbildung 25: Skizze möglicher Anordnungen der thermoelektrischen Module im Wärmeübertrager.	45
Abbildung 26: Skizze des Simulationsmodells für die vorgenommenen Parameterstudien am thermoelektrischen Wärmeübertrager.	45
Abbildung 27: Variation der Anordnung der thermoelektrischen Module im Wärmeübertrager.....	46
Abbildung 28: Elektrische Verschaltungsvarianten von TE-Modulen eines TE-Wärmeübertragers.....	47
Abbildung 29: Simulationsmodell eines Kondensationstrockners.....	48
Abbildung 30: Validierung der Lufttemperatur am Trommeleintritt und -austritt. Die Trommeleintrittstemperatur ist aufgrund des inhomogenen Strömungsverhaltens stark abhängig von der genauen Messposition.....	49
Abbildung 31: Validierung der Umgebungslufttemperatur am Lüftereintritt und -austritt. Der Einfluss des Reversierens wird im Simulationsmodell nicht berücksichtigt.....	50
Abbildung 32: Simulationsmodell des Prototypenprüfstands eines thermoelektrischen Wäschetrockners.	50
Abbildung 33: Gegenüberstellung von Prozesslufttemperaturen charakteristischer Zustandspunkte von Messung und Simulation über der Zeit.	53
Abbildung 34: Variation der Wärmeübertragungskoeffizienten eines thermoelektrischen Wärmeübertragers.	55
Abbildung 35: Variation des Luftvolumenstroms durch einen thermoelektrischen Wärmeübertrager.	56
Abbildung 36: Variation des thermischen Widerstands auf der Kaltseite eines thermoelektrischen Wärmeübertragers.	57
Abbildung 37: Variation des thermischen Widerstands auf der Warmseite eines thermoelektrischen Wärmeübertragers. Ein schwarzer Punkt stellt den Punkt maximal erzielbarer Kälteleistung beim jeweiligen Widerstand dar.	58
Abbildung 38: Energieverbrauch und Trockendauer des thermoelektrischen Wäschetrockners bei Variation des thermischen Widerstands auf der Warmseite des thermoelektrischen Wärmeübertragers mit 12 Modulen. Rechts der roten Linie im linken Diagramm liegen Ergebnisse von Konfigurationen, die bestehende Temperaturgrenzen übersteigen.....	60
Abbildung 39: Energieverbrauch und Trockendauer des thermoelektrischen Wäschetrockners bei Variation des thermischen Widerstands auf der Warmseite des thermoelektrischen Wärmeübertragers mit 10 Modulen. Rechts der roten Linie im linken Diagramm liegen Ergebnisse von Konfigurationen, die bestehende Temperaturgrenzen übersteigen.....	61

Abbildung 40: Energieverbrauch und Trockendauer des thermoelektrischen Wäschetrockners bei Variation des thermischen Widerstands auf der Warmseite des thermoelektrischen Wärmeübertragers mit 14 Modulen. Rechts der roten Linie im linken Diagramm liegen Ergebnisse von Konfigurationen, die bestehende Temperaturgrenzen übersteigen.....	62
Abbildung 41: Energieverbrauch und Trockendauer des thermoelektrischen Wäschetrockners bei Variation des thermischen Widerstands auf der Kaltseite des thermoelektrischen Wärmeübertragers mit 12 Modulen. Rechts der roten Linie im linken Diagramm liegen Ergebnisse von Konfigurationen, die bestehende Temperaturgrenzen übersteigen.....	64
Abbildung 42: Energieverbrauch und Trockendauer des thermoelektrischen Wäschetrockners bei Variation des Prozessluftvolumenstroms. Rechts der roten Linie im linken Diagramm liegen Ergebnisse von Konfigurationen, die bestehende Temperaturgrenzen übersteigen.	65
Abbildung 43: Zeitlicher Verlauf der optimierten Steuergrößen beider Betriebsstrategien eines thermoelektrischen Wäschetrockners.....	67
Abbildung 44: Temperaturverlauf am Trommeleintritt und -austritt der beiden optimierten Betriebsstrategien eines thermoelektrischen Wäschetrockners.....	69
Abbildung 45: Treibhauspotential der untersuchten Wäschetrocknersysteme ohne und mit Gerätenutzung (1300 Trockenzyklen).....	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitliche Durchschnittsleistung der thermoelektrischen Module bei unterschiedlichen Stromstärken.....	29
Tabelle 2: Beispielhafte Exergieströme im thermoelektrischen Wärmeübertrager während der Haupttrocknungsphase.....	37
Tabelle 3: Anteile der Exergieverluste im thermoelektrischen Wärmeübertrager.	37
Tabelle 4: Möglichkeiten der fluidseitigen Anordnung von 12 thermoelektrischen Modulen.	44
Tabelle 5: Vergleich der Trocknerkenndaten zwischen Messung und Simulation.....	49
Tabelle 6: Parameter des Validierungsmodells eines thermoelektrischen Wäschetrockners.....	51
Tabelle 7: Charakteristische Werte des thermoelektrischen Wäschetrockners.	51
Tabelle 8: Modellparameter für Parameterstudie.....	55
Tabelle 9: Charakteristische Werte bei maximaler Kälteleistung unterschiedlicher Volumenströme. .	56
Tabelle 10: Charakteristische Werte bei maximaler Kälteleistung unterschiedlicher thermischer Widerstände der Kaltseite des Wärmeübertragers.....	57
Tabelle 11: Charakteristische Werte des TE-Wäschetrockners bei unterschiedlicher Modulanzahl bei einem warmseitigen thermischen Widerstand von $1e-2$ K/W.....	63
Tabelle 12: Charakteristische Werte des TE-Wäschetrockners bei unterschiedlichen Volumenströmen bei thermischen Widerständen von jeweils $1e-3$ K/W.....	65
Tabelle 13: Energieverbrauch und Trockendauer der Optima der Parameterstudie und der optimierten Betriebsführung mit 12 TE-Modulen.	68
Tabelle 14: Vergleich charakteristischer Werte des thermoelektrischen Wäschetrockners mit Referenzgeräten. Die Ergebnisse sind mit konstruktiv umsetzbaren Parametereinstellungen angegeben.....	68
Tabelle 15: Abgeschätzte Kosten der Hauptkomponenten eines thermoelektrischen Wärmeübertragers.	70
Tabelle 16: Angenommener Stromverbrauch der betrachteten Wäschetrockner.	73

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	m ²	(Querschnitts-) Fläche
C	J/(kg K)	Wärmekapazität
\dot{E}	W	Exergiestrom
h	J/kg	Spezifische Enthalpie
\dot{H}	W	Enthalpiestrom
I	A	Stromstärke
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
p	bar/Pa	Druck
\dot{Q}	W	Wärmestrom
R	K/W	Thermischer Widerstand
T	°C/K	Temperatur
U	V	Spannung
\dot{V}	m ³ /h	Volumenstrom

Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
α	V K ⁻¹	Seebeck-Koeffizient
Δ	-	Differenz
χ	[-]	Wäscheuchte

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
COP	Coefficient of Performance
TE	Thermoelektrik
TEWÜ	Thermoelektrischer Wärmeübertrager

Indizes

Index	Bezeichnung
1+x	Luft + Wasser
Abw	Abwärme
k	Kalt/kühl-
kondens	Kondensations-
max	Maximal
el	elektrisch
TE	thermoelektrisch
th	thermisch
v	Verlust-
w	Warm/heiz-

1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurden erstmals unter Verwendung eines ganzheitlichen Ansatzes grundlegende theoretische und experimentelle Untersuchungen zu einem thermoelektrischen (TE) Wäschetrockner durchgeführt.

Durch die Realisierung eines Prototyps für einen TE-Wäschetrockner mit einer thermoelektrischen Wärmepumpe konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, um eine ganzheitliche Systemanalyse durchzuführen. Bei den Messungen wurden zusätzlich zum transienten Verhalten des TE-Wärmeübertragers die gegenseitigen Wechselwirkungen der Komponenten des Trocknungssystems untersucht. Es konnten neue Erkenntnisse besonders im Bereich der Konstruktion thermoelektrischer Wärmeübertrager für Luftanwendungen gewonnen werden. Hierbei stellte sich heraus, dass die thermische Anbindung der Module an die Geometrie der Wärmeübertrager von besonderer Relevanz ist.

Parallel zu den experimentellen Arbeiten wurde ein Simulationsmodell eines TE-Wäschetrockners basierend auf der Simulationssoftware TIL-Suite unter Modelica/Dymola erstellt und anhand von Messdaten am aufgebauten Prototypen validiert. In umfangreichen Systemsimulationen wurden sowohl luftseitige als auch elektrische Verschaltungen sowie Geometrievariationen untersucht und für das Gesamtsystem vorteilhafte Betriebsbedingungen ermittelt. Auf Basis der erzielten Simulationsergebnisse konnte weiterhin ein Wärmeübertrager in Gegenstromanordnung als optimale Verschaltung hinsichtlich Kälteleistung und COP identifiziert werden. Unter Variation charakteristischer Systemeinflussgrößen wurden Parameterstudien durchgeführt, aus denen wichtige Einflussgrößen auf das Systemverhalten identifiziert wurden. Weiterhin wurden zwei Betriebsarten definiert. Eine Betriebsart hat die Minimierung des Energieverbrauchs zum Ziel. Mit der zweiten Betriebsart wird eine minimale Trockendauer angestrebt.

Die Trockendauer des TE-Wäschetrockners ist für die Betriebsart minimaler Trockendauer 40 % geringer als die eines herkömmlichen Kondensationstrockners. Mit der Betriebsart eines minimalen Energieverbrauchs benötigt der TE-Wäschetrockner rund 26 % weniger Energie als ein herkömmlicher Kondensationstrockner. Er kann somit sowohl im Hinblick auf den Energieverbrauch als auch auf die Trockendauer mit handelsüblichen Kondensationstrocknern konkurrieren.

Im Vergleich mit einem Wärmepumpenwäschetrockner kann der im Rahmen des Projekts konzipierte TE-Wäschetrockner zwar deutlich schneller als ein handelsübliches Seriengerät trocknen, verbraucht dabei aber auch mehr Energie. Der TE-Wäschetrockner benötigt bei optimalen Einstellungen etwa 46 % weniger Zeit bei doppeltem Energieverbrauch. Bei energieoptimaler Betriebsart benötigt der TE-Wäschetrockner knapp 58 % mehr Energie und trocknet die Wäsche etwa 32 % langsamer. Vorteile gegenüber dem Wärmepumpentrockner kann jedoch die flexible Steuerung der Modulstromstärke bieten. Diese ermöglicht die einfache Umsetzung verschiedener Betriebsarten, die vom Nutzer eingestellt werden könnten, wie bspw. eine besonders geringe Trockendauer.

Entwicklungen in der Materialwissenschaft lassen eine weitere Steigerung der Effizienz thermoelektrischer Module zu. Die Güte thermoelektrischer Module hängt von drei Materialparametern ab. Eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit um zum Beispiel um 50 % bewirkt

einen Energieverbrauch, der nur noch etwa 30 % höher als der eines handelsüblichen Wärmepumpentrockners ist. Dabei ist die Trockendauer rund 20 % geringer.

Der TE-Wäschetrockner ist in der Lage, Wäsche fast doppelt so schnell wie handelsübliche Geräte mit geschlossenem Prozessluftkreislauf zu trocknen. Für Waschsalons und andere Nutzer, bei denen die Zeit - bspw. über Personalkosten - den größten Kostenfaktor bildet, stellt der TE-Trockner eine Alternative zu am Markt verfügbaren Wäschetrocknern dar. Er bietet damit ein hohes Potential zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes zukünftiger Trocknergenerationen. Geht man davon aus, dass die Hälfte der momentan verwendeten Kondensationswäschetrockner durch thermoelektrische Wäschetrockner ausgetauscht werden (ca. 6,75 Mio. Geräte), könnte der CO₂-Ausstoß um 4,81 bis 9,51 Mio. Tonnen reduziert werden.

2 Einleitung

2.1 Ausgangssituation

Bei den heute existierenden Trocknern erfolgt die Wäschetrocknung konvektiv in Form eines Verdunstungsprozesses, d.h. das Wasser in der Wäsche verdampft auf Partialdruckniveau bei einer Temperatur $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hierzu wird warme und trockene Luft in die Wäschetrommel geleitet. Beim Vorbeiströmen der Luft an der Oberfläche der Wäsche findet ein gleichzeitiger Wärme- und Stofftransport statt, bei dem die Luft Wasser aufnimmt und sich dabei bis maximal auf die Feuchtkugeltemperatur abkühlt. Bei konventionellen Systemen ohne Wärmepumpe wird die feuchte Luft entweder an die Umgebung abgeführt (Ablufttrockner), oder mit Umgebungsluft gekühlt, sodass der Taupunkt unterschritten wird und das aufgenommene Wasser wieder auskondensiert (luftgekühlter Kondensationstrockner). In beiden Fällen geht Wärmeenergie verloren, die auf einem für die Trocknung nicht mehr nutzbaren Temperaturniveau vorliegt. Um die Temperatur und somit das Trocknungspotenzial der Luft wieder zu erhöhen, wird dann i.d.R. ein elektrischer Heizer verwendet. Bei einem Wärmepumpentrockner ist ein Verdampfer im Abluftstrom und ein Verflüssiger im Zuluftstrom installiert. Dabei wird die feuchte Luft am Austritt der Trommel im Verdampfer abgekühlt und entfeuchtet. Sie gibt sensible und latente Wärme an die Wärmepumpe ab und nimmt diese Wärme zusammen mit der Verdichterleistung im Verflüssiger bei einem höheren Temperaturniveau wieder auf. Die trockene und wieder erwärmte Luft wird danach zurück in die Trommel geführt. Die Verwendung eines elektrischen Heizers entfällt.

Durch die Integration einer thermoelektrischen Wärmepumpe in einen herkömmlichen Kondensationstrockner wird ein nennenswerter Teil der latenten Wärme auf der kalten Seite des thermoelektrischen Wärmeübertragers der feuchten Luft entzogen. Wie beim Wärmepumpentrockner wird kein elektrischer Heizer zum erneuten Aufheizen des Zuluftstroms benötigt. Dies geschieht durch die Wärmeabgabe auf der warmen Seite des thermoelektrischen Wärmeübertragers.

2.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Gegenstand des vorliegenden Projekts ist es, erstmalig, die komplexen Wechselwirkungen zwischen der Wäschetrocknung als solcher und einem thermoelektrischen (TE) Wärmepumpenprozess im transienten Prozessverlauf grundlegend zu untersuchen. Ziel ist es, anhand der gewonnenen Erkenntnisse, ein zukunftsfähiges thermoelektrisches Wäschetrocknersystem zu entwickeln, dessen Effizienz mit marktverfügbaren Systemen vergleichbar ist. Die neuartigen Lösungsansätze zur Verwirklichung dieser Zielsetzung bestehen zunächst in der Untersuchung verschiedener fluidseitiger und elektrischer Verschaltungen der Module, um aufzuklären, welche Konfiguration für den thermoelektrischen Wärmeübertrager am besten geeignet ist. Für einen geringen Energieverbrauch pro Normtrocknungsgang müssen neue Betriebsstrategien entwickelt werden, die sowohl auf die Systemkonfiguration als auch auf die Besonderheiten der transienten Prozessführung abgestimmt sein müssen. Hierfür kommen neuartige Optimierungsmethoden basierend auf transienten Systemmodellen zum Einsatz. Damit soll der optimale zeitliche Verlauf verschiedener Stellgrößen wie z.B. Drehzahl von Prozessluft- und Kühlergebläse ermittelt werden.

Die Ergebnisse detaillierter transienter Systemsimulationen werden mit erhaltenen Messergebnissen eines im Rahmen des Projekts aufgestellten Prototyps eines thermoelektrischen Wäschetrockners verglichen. Somit wird ein ganzheitliches Konzept eines thermoelektrischen Wäschetrockners zur Verfügung gestellt. Dieses soll als Grundlage für die Entwicklung zukünftiger nachhaltiger thermoelektrischer Wäschetrocknersysteme dienen.

Zunächst werden die auftretenden Verlustmechanismen beim Trocknungsprozess mittels thermoelektrischer Wärmepumpe aufgezeigt und analysiert. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf den stets transienten Gesamtprozess mit den Wechselwirkungen zwischen der luftseitigen Wäschetrocknung einerseits und dem Peltier-System andererseits gelegt.

Als Grundlage für die Untersuchungen dient ein Kondensationstrockner gemäß aktuellem Stand der Technik. Davon ausgehend wird ein vielversprechendes Anlagenschema für einen Trockner mit einer thermoelektrischen Wärmepumpe erarbeitet und ein entsprechender Prototyp aufgebaut. Der Prototyp wird wiederum im Detail analysiert und Optimierungspotenziale hinsichtlich des Energieverbrauchs werden abgeleitet. Es werden Simulationsmodelle entwickelt, mit denen Sensitivitätsanalysen und Parameterstudien durchgeführt und unterschiedliche Geometrien und Verschaltungen bewertet werden. Zusätzlich werden durch die transiente Abbildung der physikalischen Effekte, Betriebsstrategien entwickelt. Diese sollen entweder einen minimalen Energieverbrauch oder eine minimale Trockendauer ermöglichen. Das Einsparpotenzial wird schließlich validiert und der Energieverbrauch wird im Detail mit den im Rahmen des Projekts zu definierenden Referenzsystemen eines Kondensationstrockners und eines Wärmepumpentrockners verglichen. Hierbei soll ein Vergleich zu den kommerziell erhältlichen Anlagen eines Kondensationstrockners und eines Wärmepumpentrockners vorgenommen werden.

Aus den Zielsetzungen ergeben sich somit folgende Aufgabenstellungen:

- Entwicklung eines Prototyps für einen thermoelektrischen Wäschetrockner
- Erstellung von validierten transienten physikalischen Modellen für Komponenten und Gesamtsysteme eines thermoelektrischen Wäschetrockners
- Analyse des Gesamtprozesses, der sowohl den Trocknungs-, als auch den thermoelektrischen Wärmepumpenprozess beinhaltet
- Untersuchung verschiedener luftseitiger und elektrischer Verschaltungen, sowie Geometrievariationen
- Entwicklung einer optimalen Betriebsstrategie für den TE-Wäschetrockner mithilfe der Modelle
- Ökologische Bewertung der verglichenen Wäschetrocknersysteme

Am Ende des Projekts liegt ein Prototyp eines thermoelektrischen Wäschetrockners für den Haushaltsbereich als optimiertes System vor, welches das Potenzial besitzt, mit derzeit marktverfügbaren Geräten zu konkurrieren.

3 Prototypenauslegung eines thermoelektrischen Wäschetrockners

In einer ersten Konzeptionierungsphase werden günstige Prozess- und Geometrieparameter und Verschaltungen von Komponenten identifiziert, welche ein möglichst hohes Potenzial für einen energieeffizienten Trocknungsprozess besitzen. Ziel dieser Untersuchungen ist es, insbesondere eine geeignete Systemkonfiguration für den TE-Prototyp zu finden und eine Basis für eine entsprechende Systemauslegung zu schaffen. Bei der Wahl der Module kann auf Erkenntnisse aus dem Projekt AZ 28528 zurückgegriffen werden [Som14]. Die Ein- und Ausgangstemperaturen am Wärmeübertrager geben in Verbindung mit einer gewählten Modulgeometrie Rückschlüsse auf Wärmestromdichten, die im festgelegten elektrischen Arbeitsbereich erreicht werden können. Aus heutiger Sicht muss dabei zusätzlich auf den verfügbaren Bauraum auf kalter und warmer Seite der Module geachtet werden.

3.1 Bestehende Wäschetrocknerkonzepte

Im Kondensationstrockner wird die in einem geschlossenen Kreislauf zirkulierende Luft durch einen elektrischen Heizer erwärmt und daraufhin zur Wäschetrommel geleitet. (1) In der Trommel wird die Wäsche durch eine kontinuierlich langsam rotierende Trommel bewegt und aufgelockert. Damit wird sichergestellt, dass ein trockener, warmer Luftstrom möglichst gleichmäßig an allen Kleidungsstücken entlang strömt. Hierbei wird Feuchtigkeit von den Textilien an die zirkulierende Luft in Form von Dampf abgegeben. (2) Im folgenden Prozessschritt wird die nun feuchte Luft in einen Wärmeübertrager geführt, durch den quer zur Prozessluft ein Luftstrom mit Umgebungsluft strömt. Aufgrund der Wärmeübertragung an den Umgebungsluftstrom kühlt die Prozessluft ab und Wasser kondensiert aus und wird abgeführt. (3) Nachfolgend wird die entfeuchtete Luft wieder am elektrischen Heizer vorbei strömen und der Trommel zugeführt. Die im Wärmeübertrager (Luftkühler) erwärmte Umgebungsluft wird wieder der Umgebung zugeführt, ohne dass diese Feuchtigkeit aufgenommen hat. Das Fließschema eines Kondensationstrockners ist in Abbildung 1 dargestellt.

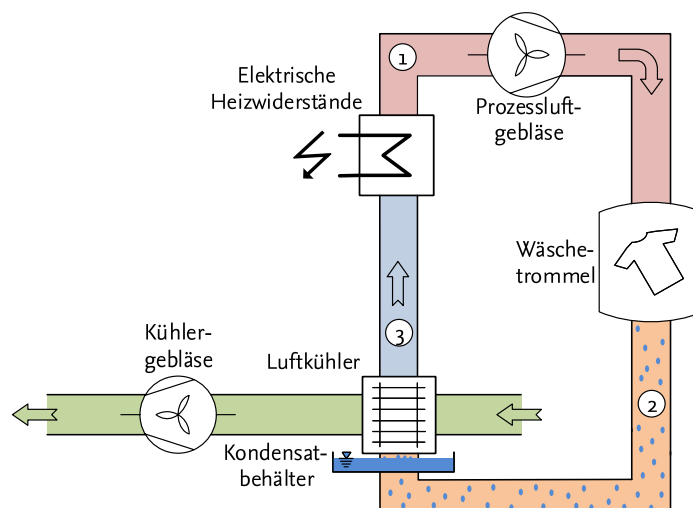


Abbildung 1: Fließschema eines Kondensationstrockners

Ein Wärmepumpentrockner ist eine Art des Kondensationstrockners, bei dem jedoch anstatt mit Umgebungsluft zu kühlen und elektrisch zu heizen ein Wärmepumpenkreislauf verwendet wird. Dieser besteht aus einem Verdichter, einem (Kältemittel-) Verflüssiger, einem Expansionsorgan und einem (Kältemittel-) Verdampfer. In diesem Kreislauf wird ein Kältemittel verwendet (üblicherweise R-134a und neuerdings auch R-290 [Uba17b]), welches im Verdampfer erwärmt wird um die Prozessluft zu entfeuchten und im Kondensator gekühlt wird um die Luft zu erwärmen. Wie beim Kondensationstrockner befindet sich die Prozessluft folglich in einem geschlossenen Kreislauf und die Wärme, die der Prozessluft im Kondensator entzogen wird, bleibt größtenteils im Prozess erhalten. Um eine Überhitzung des Kältemittelkreislaufs zu vermeiden, ist häufig ein Enthitzer vorhanden, der Wärme an die Umgebung abführen kann. Die trockene und wieder erwärmte Luft wird danach zurück in die Trommel geführt. Das Fließschema in Abbildung 2 zeigt die Prozessschritte von Prozessluftkreislauf und Kältemittelkreislauf.

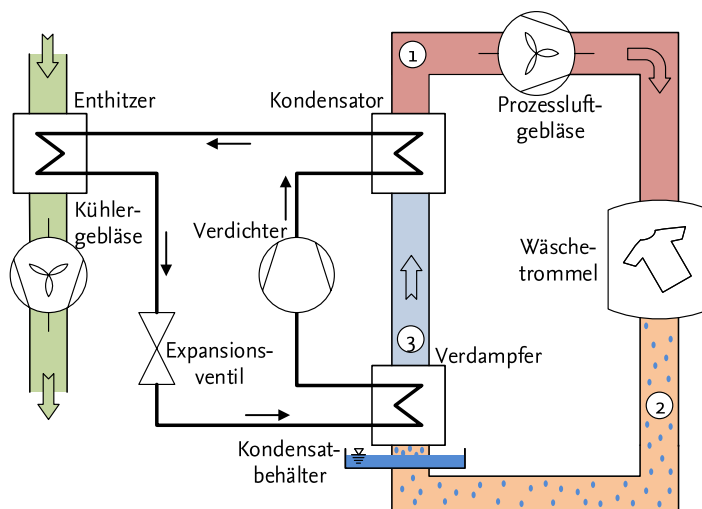


Abbildung 2: Fließschema eines Wärmepumpentrockners

Die Wäsche durchläuft während der Trocknung verschiedene charakteristische Abschnitte, die in Abbildung 3 schematisch für konstante Parameter (Temperatur, Luftfeuchte) der Trocknungsluft dargestellt sind. Zunächst erwärmt die in die Trommel einströmende heiße Luft das Trocknungsgut. Der Verdunstungseffekt ist dabei relativ gering. Der Erwärmungsvorgang ist beendet, wenn die eingebrachte Wärme nur noch zum Verdunsten des Wassers benutzt wird. Es beginnt der Trocknungsabschnitt, der durch eine konstante Trocknungsgeschwindigkeit gekennzeichnet ist. Dabei kann aus den inneren Zonen des Gutes stets genügend Wasser an die Oberfläche befördert werden. Dieser Transport wird durch Kapillarkräfte bewirkt. Ab einem gewissen Feuchtegrad reichen die Kapillarkräfte nicht mehr aus, um eine Oberflächenverdunstung zu gewährleisten und der Trocknungsspiegel weicht in das Gutsinnere zurück. Dann muss die zur Verdunstung des Wassers notwendige Wärme über immer weitere Strecken geleitet werden. Entsprechend muss auch der am Trocknungsspiegel gebildete Wasserdampf durch eine immer dicker werdende Gutsschicht diffundieren. Demzufolge verringert sich in diesem Abschnitt auch die Trocknungsgeschwindigkeit. Die Lufttemperatur am Austritt der Trommel steigt an und die relative Feuchte sinkt. Der Trocknungsvorgang ist beendet, wenn der Wassergehalt des Gutes im Bereich der Gleichgewichtsfeuchte bei Umgebungsbedingungen liegt.

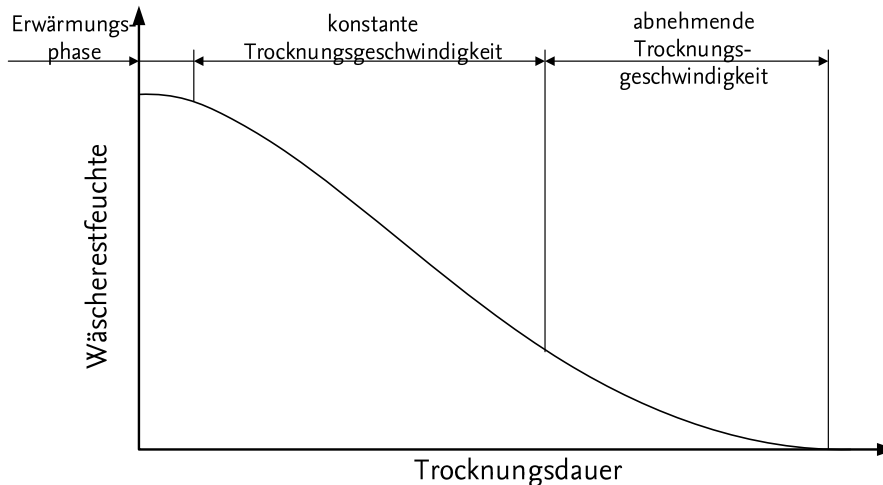


Abbildung 3: Typische Trocknungskurve für Textilien.

3.2 Das thermoelektrische Wäschetrocknerkonzept

Ein thermoelektrischer Wäschetrockner ist wie auch der Wärmepumpentrockner eine Art des Kondensationstrockners. Anstelle des Heizregisters wird die Luft mithilfe eines thermoelektrischen Wärmeübertragers aufgeheizt (1). Nach der Trommel (2) wird die Luft zum einen durch einen wie im Kondensationstrockner vorhandenen Luftkühler gekühlt und Wasser auskondensiert (3). Zum anderen wird die Prozessluft an der kalten Seite des thermoelektrischen Wärmeübertragers vorbeigeführt um dieser weitere Wärme und damit auch Wasser zu entziehen (4). Nachfolgend wird die Luft wieder an der heißen Wärmeübertragerseite des thermoelektrischen Wärmeübertragers entlanggeführt.

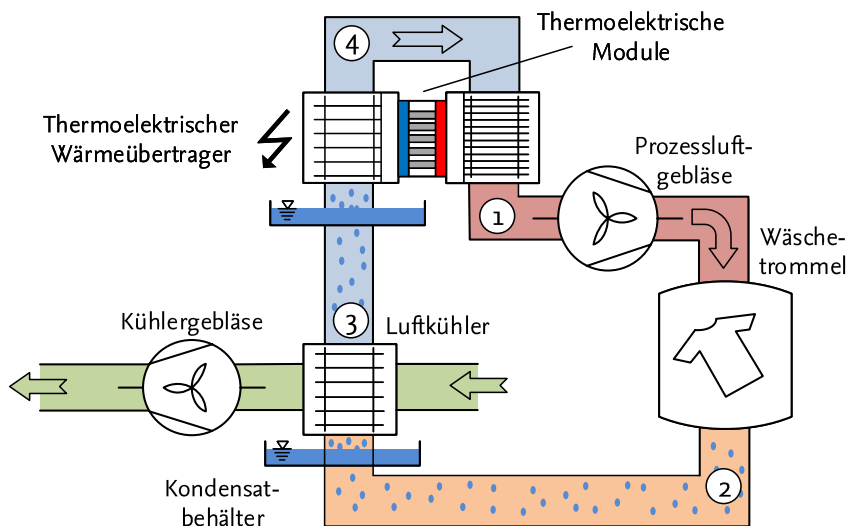


Abbildung 4: Fließschema des neuen Konzepts eines Thermoelektrischen Wäschetrockners. Die Kombination des Wärmepumpenkonzepts mit einem Luftkühler ermöglicht eine flexible Nutzung der thermoelektrischen Module.

Durch die Integration eines thermoelektrischen Wärmeübertragers in einen herkömmlichen Kondensationstrockner wird der feuchten Luft ein nennenswerter Teil der latenten Wärme auf der kalten Seite des thermoelektrischen Wärmeübertragers entzogen. Wie beim Wärmepumpentrockner

wird kein elektrischer Heizer zum erneuten Aufheizen des Luftstroms benötigt. Dies geschieht durch die Wärmeabgabe auf der warmen Seite des thermoelektrischen Wärmeübertragers.

Durch die Integration von zwei Wärmeübertragern zum Kühlen der Prozessluft wird zudem die Möglichkeit eröffnet, die Prozessführung flexibel zu gestalten. Die Nutzung von sowohl zugeführter als auch abgeführter Wärme der thermoelektrischen Module innerhalb des Prozesses erhöht die Effizienz der Module. In herkömmlichen Anwendungen thermoelektrischer Module wird nur eine Seite zum Heizen oder Kühlen verwendet und auf der anderen Seite Wärme mit der Umgebung ausgetauscht. Durch die Erhöhung der Moduleffizienz wird auch die Effizienz des Gesamtsystems verbessert und das System eines thermoelektrischen Wäschetrockners besitzt das Potential mit den eingangs vorgestellten Systemen in Bezug auf den Energieverbrauch zu konkurrieren.

Bei vorgegebenen thermischen Randbedingungen kann für ein thermoelektrisches Modul ein individueller Betriebsbereich definiert werden. Durch Variieren der elektrischen Leistung der TE-Module kann somit ohne mechanische Einflussnahme direkt auf die Prozessführung Einfluss genommen werden. Eine Steuerung oder Regelung ist hierdurch direkt umsetzbar und besitzt eine kurze Reaktionszeit im Vergleich zur thermischen Trägheit eines Wärmepumpenkreislaufs. In Abbildung 5 sind zwei beispielhafte Trocknungsdreiecke eines thermoelektrischen Wäschetrockners bei konstanter Trocknungsgeschwindigkeit dargestellt. Zur besseren Einordnung ist jeweils ein Trocknungsdreieck eines Wärmepumpentrockners und eines Kondensationstrockners beigelegt.

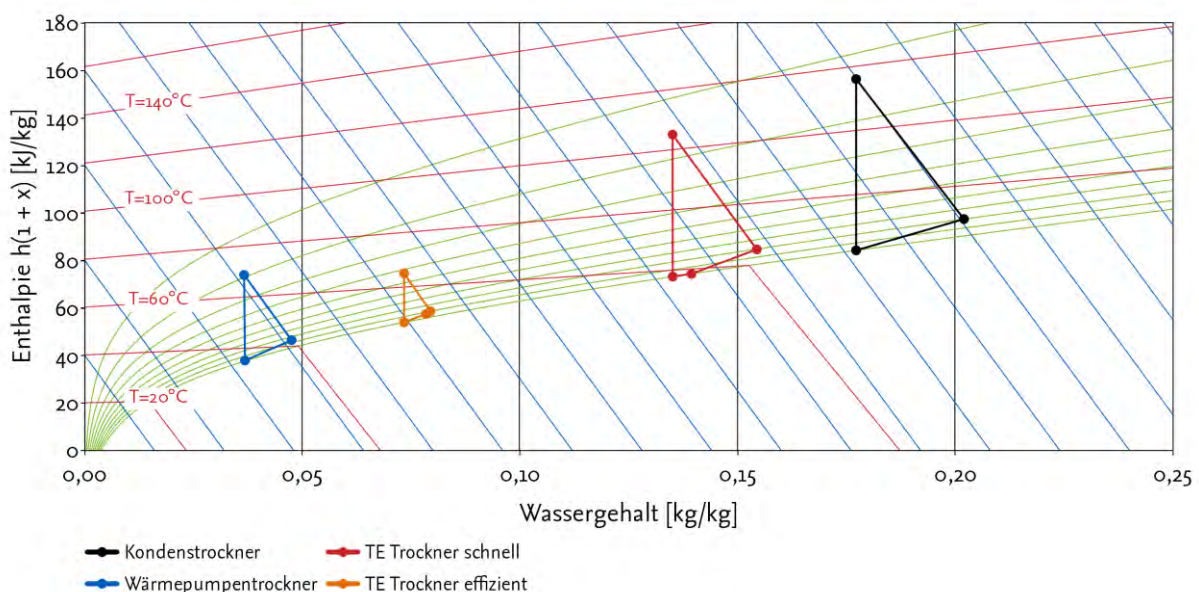


Abbildung 5: Typische Trocknungsdreiecke bei konstanter Trocknungsgeschwindigkeit. Die Prozessführung eines TE-Wäschetrockners kann direkt über die Modulleistung beeinflusst werden.

Die von einem TE-Modul aufnehmbare Kälteleistung ist von drei Effekten abhängig. Neben der Peltier-Wärme und der durch elektrische Verluste hervorgerufenen Jouleschen Wärme beeinflusst die Wärmeleitung von der warmen zur kalten TE-Modulseite die Leistung. Da die Wärmepumpenwirkung eines TE-Moduls mit steigendem Temperaturgradienten abnimmt und der damit verbundenen Wärmeleitung entgegenwirkt, ist für eine hohe Kälteleistung eine möglichst geringe

Temperaturdifferenz am Modul notwendig. Es sollte also eine geringe Temperaturdifferenz zwischen Warm- und Kaltseite der Module im thermoelektrischen Wärmeübertrager angestrebt werden, um eine möglichst hohe Kälteleistung und damit auch Effizienz zu gewährleisten.

Wird im Prozessluftkreislauf die Reihenfolge der Wärmeübertrager zum Abkühlen der Luft getauscht, durchströmt die Luft zuerst die Kaltseite des thermoelektrischen Wärmeübertragers und danach den Luftkühler. Für diese Komponentenverschaltung tritt ungesättigte Luft in den thermoelektrischen Wärmeübertrager ein und es wird mehr sensible Wärme übertragen als bei der eingangs beschriebenen Anordnung. Die Luft würde im thermoelektrischen Wärmeübertrager stärker abkühlen und es würde eine geringere Temperaturdifferenz zwischen Warm- und Kaltseite der Module vorherrschen. Diese Anordnung besitzt damit ein höheres Energieeinsparpotential. Für die weiteren Untersuchungen steht jedoch die strukturierte Analyse des thermoelektrischen Wäschetrockners im Vordergrund. Die Anordnung eines Kondensationstrockners wie in Abbildung 1 kann ohne größere konstruktive Veränderungen des bestehenden Trockners zu einem thermoelektrischen Wäschetrockner wie in Abbildung 4 erweitert werden. In dieser Anordnung liegt eine nahezu konstante Lufttemperatur auf der Kaltseite des thermoelektrischen Wärmeübertragers vor und die Eigenschaften der Module können leicht mit Herstellerangaben verglichen werden. Dadurch ist eine Energiebilanz des Wärmeübertragers mit der oben vorgestellten Anordnung besser über die Moduleigenschaften überprüfbar. In der Dissertation von Somdalen wird die alternative Anordnung detailliert untersucht und mit der oben vorgestellten Anordnung verglichen [Som17].

Um eine Vergleichbarkeit der Modulkälteleistungen bei verschiedenen am Modul anliegenden Temperaturdifferenzen mit Herstellerangaben zu gewährleisten, ist es notwendig eine Referenztemperatur für die Gegenüberstellung zu definieren. Da auf der Kaltseite des thermoelektrischen Wärmeübertragers die Prozesslufttemperatur eine hohe Luftfeuchtigkeit besitzt, wird sich bei weiterer Wärmeabfuhr die Temperatur der Luft nur um wenige Kelvin ändern. Aus diesem Grund wird als Referenztemperatur die kalte Seite der thermoelektrischen Module $T_{k,TE}$ gewählt.

Der Verlauf von Kälteleistung und COP für unterschiedliche Modultemperaturdifferenzen ist in Abbildung 6 exemplarisch anhand des Moduls TM-241-1.6-28.0MM der Firma Ferrotec-Nord Corporation [Fer17] skizziert. In den Abbildungen liegt die Referenztemperatur bei 50 °C.

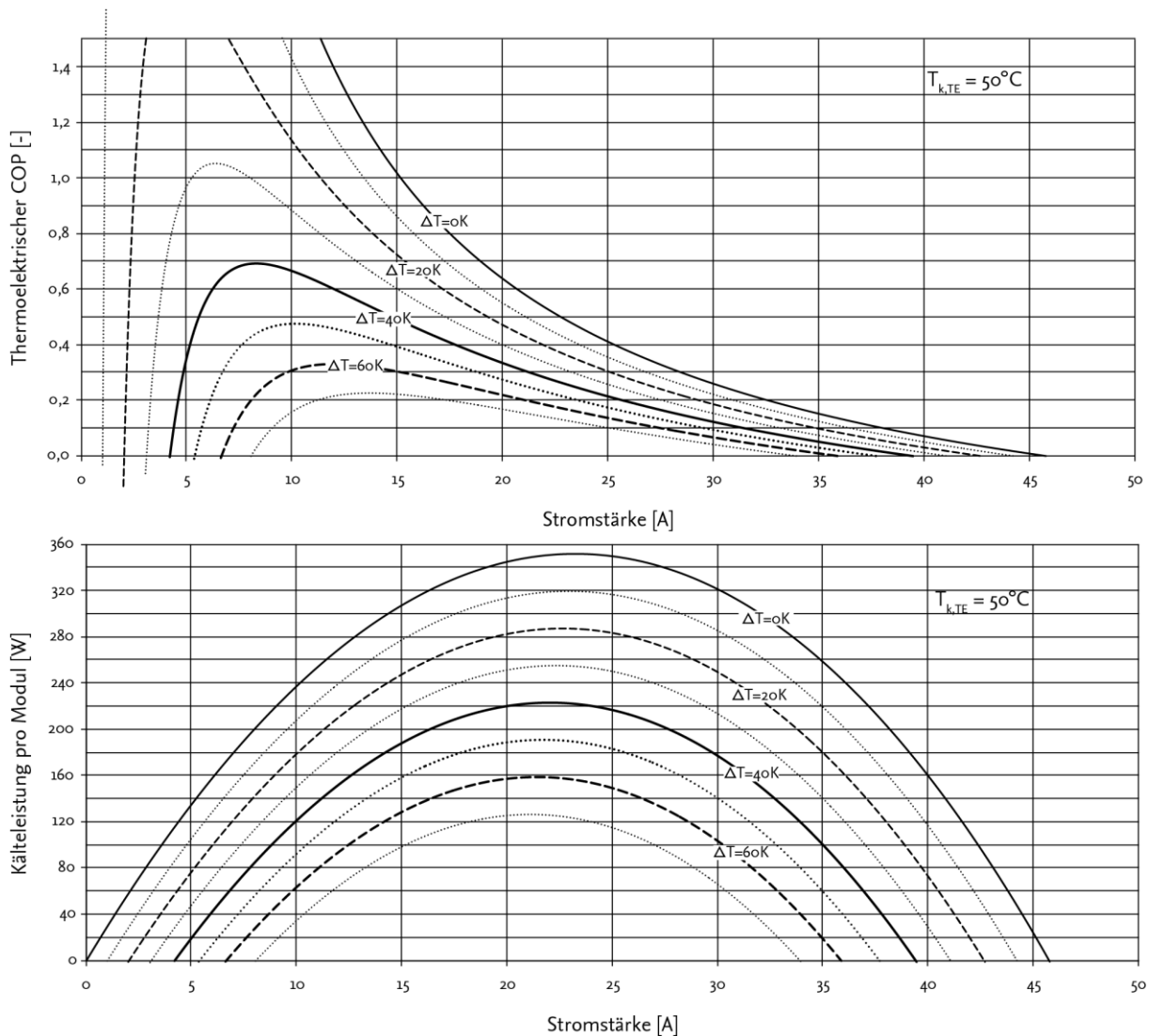


Abbildung 6: Verlauf von COP und Kälteleistung über der Stromstärke eines Hochleistungsmoduls TM-241-1.6-28.0MM der Firma Ferrotec-Nord Corporation für unterschiedliche Modultemperaturdifferenzen.

In diesem Bericht ist der thermoelektrische COP definiert als Verhältnis von thermoelektrischer Kälteleistung \dot{Q}_{TE_k} zur eingestellten elektrischen Leistung der TE-Module P_{el} .

$$COP = \frac{\dot{Q}_{TE_k}}{P_{el}} \quad (1)$$

Die Diagramme sind unter Verwendung der temperaturabhängigen Materialdaten der Firma Ferrotec-Nord mit dem Komponentenmodell eines thermoelektrischen Moduls in Modelica erstellt. Dieses Modell wurde im Detail in Projekt AZ 28528 beschrieben [Som14].

3.3 Identifizierung charakteristischer Größen bei Haushaltswäschetrocknern

Zum besseren Verständnis eines Wäschetrocknersystems sind in Abbildung 7 typische Verläufe der Trommeleintritts- und Trommelaustrittstemperatur eines Kondensations- und Wärmepumpentrockners über der Zeit qualitativ aufgetragen. Die verwendeten Daten sind selbst gewonnene Messdaten an handelsüblichen Geräten. Diese sind zu Anschauungszwecken vereinfacht dargestellt.

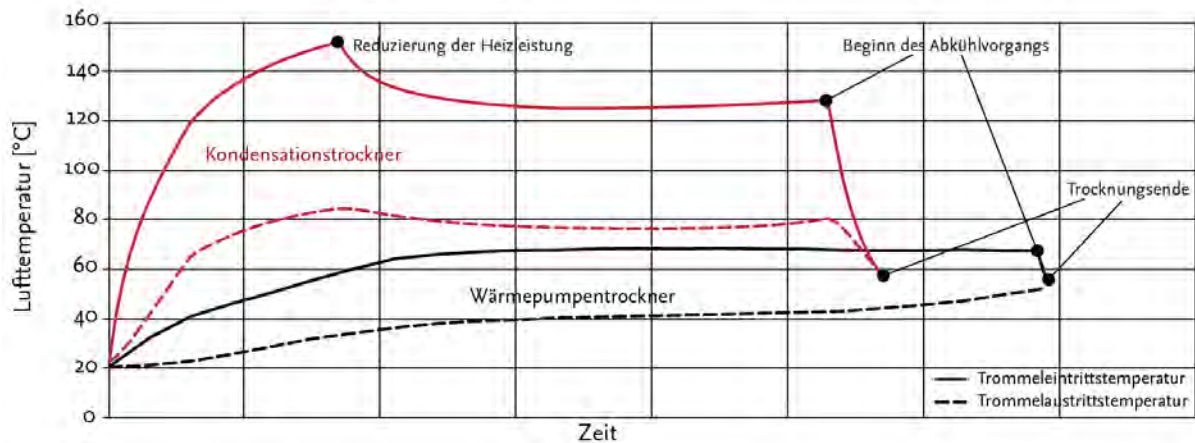


Abbildung 7: Exemplarischer Temperaturverlauf der Trommeleintritts- und Trommelaustrittstemperatur der vorgestellten Trocknersysteme.

Es ist erkennbar, dass das Temperaturniveau im Kondensationstrockner deutlich höher ist als im Wärmepumpentrockner. Zusätzlich ist die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt größer, was einen erhöhten Stofftransport in der Wäschetrommel begünstigt. Im Vergleich zum Wärmepumpentrockner wird deshalb ein geringerer Volumenstrom benötigt, um eine vergleichbare Wassermenge aus der Wäsche abzuführen.

Im Wärmepumpentrockner wird ein etwa doppelt so hoher Volumenstrom eingestellt, um eine hohe Wärmeübertragung im Kältemittelverdampfer und -kondensator bei geringen Temperaturdifferenzen zu gewährleisten. Somit können möglichst hohe Verdampfungstemperaturen und niedrige Kondensationstemperaturen des Kältemittels erzielt werden und ein hoher COP des Kältemittelkreislaufs realisiert werden.

Der eingesetzte thermoelektrische Wärmeübertrager wird in Gegenstrombauweise ausgeführt, um geringe Temperaturdifferenzen an den Modulen zu erreichen. Im weiteren Verlauf wird häufig auf die Temperaturdifferenz zwischen Kalt- und Warmseite der TE-Module eingegangen. Zur besseren Verständlichkeit wird im Folgenden stets eine Mitteltemperatur auf der TE-Warmseite und der TE-Kaltseite berechnet und ihre Temperaturdifferenz verwendet. Ihre Definition ist in Abbildung 8 illustriert.

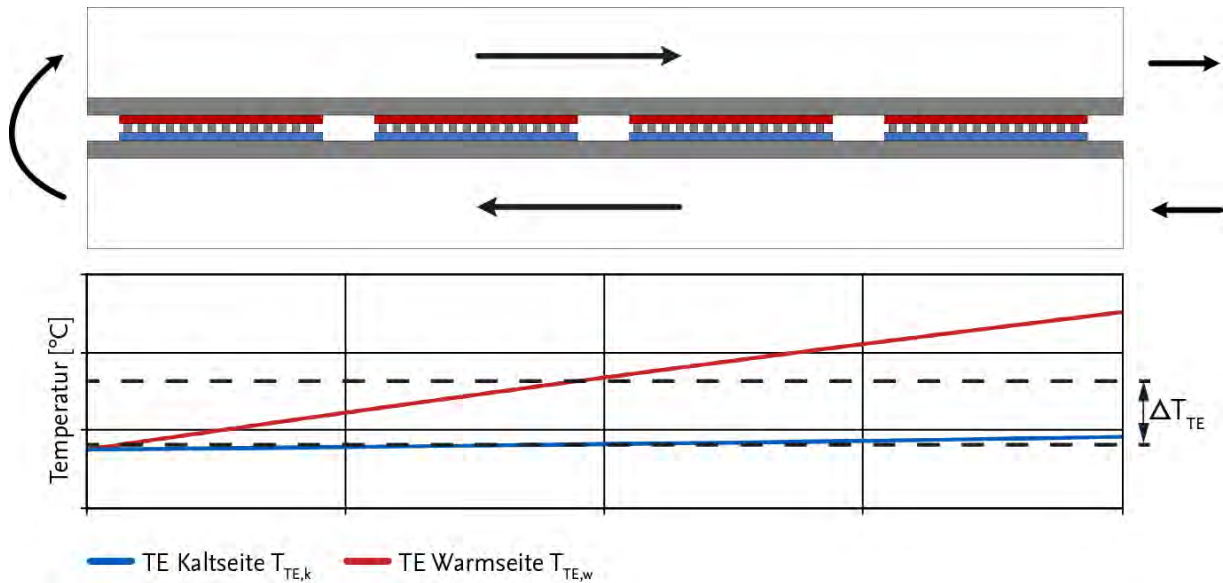


Abbildung 8: Definition der mittleren Modultemperaturdifferenz im thermoelektrischen Wärmeübertrager. Die am jeweiligen Modul vorliegende Temperaturdifferenz ist positionsabhängig.

Wie bereits erwähnt, sind bei kleineren Temperaturdifferenzen zwischen Heiß- und Kaltseite des Moduls höhere Kälteleistungen möglich (siehe Abbildung 6). Der im TE-Trockner geförderte Normvolumenstrom wird deshalb für die weitere Auslegung wie in einem Wärmepumpentrockner angenommen. Der Bezugspunkt zur Berechnung des Volumenstroms wird auf den Trommelaustritt gelegt. Durch den hohen Luftmassenstrom können bei vergleichbarer Heizleistung geringere Temperaturdifferenzen an den thermoelektrischen Modulen erzielt werden. Da sich die Temperatur der TE-Kaltseite über der Weglänge kaum verändert (vergleiche Abbildung 8), führt folglich eine Erhöhung des Luftmassenstroms zu einem geringeren Anstieg der TE-Warmseitentemperatur. Die Berechnung der vorliegenden Temperaturdifferenz an den thermoelektrischen Modulen ist damit über die Temperaturerhöhung von Ein- zu Austritt der Warmseite des Wärmeübertragers möglich.

$$\Delta T_{TE} = \frac{T_{TEw,aus} + T_{TEw,ein}}{2} - \frac{T_{TEk,ein} + T_{TEk,aus}}{2} \quad (2)$$

$$\approx \frac{T_{TEw,aus} + T_{TEw,ein}}{2} - T_{TEw,ein} = \frac{T_{TEw,aus} - T_{TEw,ein}}{2} \quad (3)$$

mit $T_{TEw,ein} = T_{TEk,aus} \quad (4)$

und $\frac{T_{TEk,ein} + T_{TEk,aus}}{2} \approx T_{TEk,ein} \approx T_{TEk,aus} \quad (5)$

Unter Zuhilfenahme der erstellten stationären Modelle werden die für die geplanten Messungen nötigen Komponenten des Prototyps ausgewählt und ausgelegt. Bei der Planung und Auswahl muss besonders darauf geachtet werden, dass die geplante Messtechnik eine flexible Systemverschaltung zulässt und das System nicht zu stark beeinflusst. Bei der Planung der Wärmeübertrager gilt es, neben den geometrischen Abmessungen und einer möglichst hohen Wärmeübertragerfläche eine günstige Anzahl an zu verwendenden kommerziell verfügbaren thermoelektrischen Modulen zu bestimmen.

Bei Ausfall einzelner TE-Module muss gewährleistet sein, dass der Trockner weiterhin funktionsfähig ist.

Haushaltswäschetrockner können je nach Modell eine gewisse Wäschemenge aufnehmen. Die übliche maximale Wäschebelastung liegt zwischen 7 und 9 kg trockener Wäsche. In diesem Projekt standen zwei handelsübliche Kondensationstrockner für Messungen zur Verfügung, die eine maximale Wäschebelastung von 7 kg besitzen. Hiervon dient eines der Geräte als Messobjekt für Messungen des Kondensationstrockners. Das andere wird derart modifiziert, dass der thermoelektrische Wärmeübertrager in den Prozessluftkreislauf integriert wird.

Wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt, unterscheiden sich die am Markt verfügbaren Trocknertypen Kondensationstrockner und Wärmepumpentrockner im Temperaturniveau und im Normvolumenstrom der Prozessluft. Weitere charakteristische Werte sind die während einer Trocknung im Mittel auftretenden Wärmeströme zum Abkühlen und wieder Aufheizen der Luft. Ist die Heizleistung im Prozess deutlich größer als die Kälteleistung zuzüglich des Verlustwärmestroms an die Umgebung, wird sich der Prozess kontinuierlich aufheizen und es besteht die Gefahr der Überhitzung. Um eine Überhitzung des Trocknungskreislaufs zu verhindern, wird in der Auslegung eine maximale Heizleistung vorgegeben. Die mittlere Heizleistung eines Kondensationstrockners beträgt rund 2000 W und ist die maximal über den Luftkühler abführbare Leistung bei noch zulässigen Temperaturdifferenzen. Sie wird deshalb hier als obere Grenze gewählt. Da sich die Prozessführung des thermoelektrischen Wäschetrockners an einem Wärmepumpentrockner orientiert, soll die gesamte Kälteleistung in dem Bereich eines Wärmepumpentrockners liegen. Diese beträgt während der Trocknung größtenteils zwischen 1000 W und 1500 W. Je höher die Kälteleistung im thermoelektrischen Wärmeübertrager, desto weniger Kondensationswärme geht an die Umgebung verloren und desto effizienter ist der Gesamtprozess.

Aufgrund des vom Wärmepumpentrockner übernommenen Werte für den Normluftvolumenstrom und einem auch damit ähnlichen Temperaturverlauf der Prozessluft im Kreislauf, wird davon ausgegangen, dass beim Design der TE-Wärmeübertragerseiten an die Ausführungen von Kältemittelverdampfer und -kondensator des Wärmepumpentrockners angelehnt werden kann. Aus einem handelsüblichen Wärmepumpenwäschetrockner werden deshalb die luftseitigen Wärmeübertragerflächen vermessen und als Referenzwerte genommen.

3.4 Entwurf des thermoelektrischen Wärmeübertragers für die Wäschetrocknung

In einem thermoelektrischen Wärmeübertrager für die Wäschetrocknung wird Wärme von einem Luftstrom an planar angeordnete Module und von diesen wiederum an einen anderen Luftstrom übertragen (vergleiche Abbildung 8). Wie in Abbildung 8 angedeutet, wird die Prozessluft nach dem Austritt an der kalten Seite des thermoelektrischen Wärmeübertragers um 180° umgelenkt, um die Luft an der warmen Seite thermoelektrischen Wärmeübertragers vorbeizuführen. Wie im vorigen Abschnitt erwähnt, ist die Effizienz thermoelektrischer Module stark von der anliegenden Temperaturdifferenz abhängig. Je geringer diese Temperaturdifferenz ist, desto höher ist der

thermoelektrische COP und damit die Gesamteffizienz des Systems. Die thermischen Widerstände im Wärmeübertrager müssen also möglichst gering gehalten werden.

Die Innenflächen im Wärmeübertrager, die mit den thermoelektrischen Modulen kontaktiert sind, betragen jeweils rund 400 cm². Die gewählte Fläche ist ähnlich groß ist wie die Einströmfläche von Verflüssiger bzw. Verdampfer. Damit können Wärmeübertragerstrukturen umgesetzt werden, die ähnliche Wärmeübertragungsflächen besitzen wie Verdampfer und Verflüssiger eines Wärmepumpentrockners. Bei Verwendung von thermoelektrischen Modulen mit einer Grundfläche von 25cm² können also unter Berücksichtigung des Platzbedarfs für Kabel und Verschraubung ungefähr sechs Module gleichmäßig verteilt werden. Zur besseren Verteilung der Wärme werden zwei Schichten mit thermoelektrischen Modulen verbaut. Somit kann eine maximale Anzahl von 12 thermoelektrischen Modulen realisiert werden.

Geht man davon aus, dass ein ähnlicher Temperaturverlauf im Prozessluftkreislauf wie beim Wärmepumpentrockner realisierbar ist, liegt der maximale Temperaturhub im Kreislauf luftseitig bei etwa 30 K. Dieser maximale Temperaturhub liegt im thermoelektrischen Wärmeübertrager am kaltseitigen Eintritt bzw. am warmseitigen Austritt vor (vergleiche Abbildung 8). Aufgrund einer Reihenschaltung von Kontaktwiderstand, Wärmeleitung und konvektivem Widerstand werden je Seite 5 K Temperaturunterschied zwischen Luft und Oberfläche der Module angenommen. Somit liegt eine maximal an den Modulen anliegende Temperaturdifferenz von etwa 40 K vor. Bei dieser Temperaturdifferenz soll nun eine möglichst hohe Kälteleistung gewährleistet werden. Der Rest der abzuführenden Wärme wird über den Luftkühler abgegeben. Um eine Überhitzung des Trocknungskreislaufs zu verhindern, wird als weitere Vorgabe eine maximale Heizleistung \dot{Q}_{TEw} von rund 2000 W gegeben (vergleiche Abschnitt 3.3). Am Markt verfügbare thermoelektrische Module haben in technischen Betriebspunkten einen thermoelektrischen COP zwischen 0,25 und 1. Für die Auslegung wird deshalb ein mittlerer COP pro Modul von rund 0,5 festgelegt. Für den Fall, dass der COP im Prozess größer als 0,5 ist, sinkt die vom Luftkühler abgeführte Kälteleistung. Über die Heizleistung und den COP kann somit die von den thermoelektrischen Modulen erzeugbare Kälteleistung berechnet werden. Es gilt

$$COP = \frac{\dot{Q}_{TEk}}{P_{el,TE}} = \frac{\dot{Q}_{TEk}}{\dot{Q}_{TEw} - \dot{Q}_{TEk}} \quad (6)$$

Durch Umstellen der Gleichung nach \dot{Q}_{TEk} ergibt sich

$$\dot{Q}_{TEk} = \frac{COP \cdot \dot{Q}_{TEw}}{1 + COP} \quad (7)$$

Mit den gesetzten Vorgaben ist somit eine maximale Kälteleistung über die thermoelektrischen Module von etwa 660 W möglich. Der Rest der Kälteleistung wird über den Luftkühler bereitgestellt. Es muss also ein Modul ausgewählt werden, welches bei einer anliegenden Temperaturdifferenz von 40 K eine Kälteleistung von $660 \text{ W} / 12 \approx 55 \text{ W}$ bereitstellt und einen thermoelektrischen COP hat, der größer als 0,5 ist.

Ein Modul, bei dem diese Vorgaben eingehalten werden, ist das in Abschnitt 3.2 vorgestellte thermoelektrische Modul der Firma Ferrotec-Nord TM-241-1.6-28.oMM. Bei diesem Modul besteht die Möglichkeit eine Kälteleistung auch bei einer dynamischen Prozessführung zur Verfügung zu stellen. Die Stromstärke pro Modul kann bei 40 K Modultemperaturdifferenz nach Abbildung 6 oben zwischen 6 A und 14 A liegen. Auch bei ggf. 10 K höheren Modultemperaturdifferenzen liegt der maximal erreichbare thermoelektrische COP bei ca. 0,5.

Zusammenfassend sind folgende Größen für den thermoelektrischen Wärmeübertrager festgelegt:

Wärmeübertragerfläche kaltseitig $A_{k,TE}$	4,05	m ²
Wärmeübertragerfläche warmseitig $A_{w,TE}$	7,32	m ²
Anzahl Module	12	
Ausgelegte Kälteleistung der TE-Module	660	W
Einsatz findendes TE-Modul	TM-241-1.6-28.oMM	

4 Messtechnische Untersuchungen

Mit dem Prototyp eines thermoelektrischen Wäschetrockners werden relevante Betriebsbedingungen, wie bspw. übliche Wäschebeladungen und Trocknungszeiten, messtechnisch untersucht. Die hierdurch gewonnenen Ergebnisse werden detailliert aufbereitet und analysiert. Hierbei ist eine sorgfältige Abstimmung mit den Ausgabewerten der Simulationen vorzunehmen um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Bevor auf die Messung des thermoelektrischen Wäschetrockners näher eingegangen wird, werden zunächst Messdaten eines handelsüblichen Kondensationstrockners vorgestellt, die im Folgekapitel zur Validierung der Grundkomponenten dienen. Außerdem werden diese Messdaten für einen späteren Vergleich mit dem neuartigen thermoelektrischen Wäschetrockner herangezogen.

Anschließend wird der Messaufbau des neuartigen Trocknungssystems inklusive der Messstellen im Detail beschrieben. Der Messvorgang wird geschildert und es wird auf potentielle Schwierigkeiten eingegangen. Abschließend wird eine Übersicht über gewonnene Messdaten gegeben.

Charakteristische Werte der gewonnenen Messdaten werden in Kapitel 6 mit denen der Referenzsysteme verglichen. Hierfür werden zum einen die gewonnenen Daten des Kondensationstrockners verwendet. Zum anderen liegen zusätzlich Messdaten eines handelsüblichen Wärmepumpentrockners aus vorigen Untersuchungen vor.

4.1 Vermessung des Referenzsystems eines Kondensationstrockners

In Abbildung 9 ist der Aufbau des Referenzprüfstands inklusive Messstellen dargestellt.

Als Referenzrockner wird ein im Handel verfügbarer Kondensationstrockner eingesetzt. Der Nennverbrauch bei einer Wäschebeladung von 7 kg zzgl. 4,2 l gebundenem Wasser beträgt 4,14 kWh in einer Trocknungszeit von 109 Minuten. Luftkühler, Heizregister, Wäschetrommel und Prozessluftgebläse sind Komponenten des Kondensationstrockners. Der Luftkühler ist ein Flachrohr-Lamellenwärmeübertrager, wobei die Flachrohre von der Prozessluft durchströmt werden und das Kondensat gut abfließen kann. Die Wärmeübertragerfläche beträgt prozesseitig rund 0,4 m² und zur Umgebung über die Lamellen rund 1,7 m².

Das Heizregister ist ein elektrischer Widerstandsheizkörper und kann in zwei Stufen geschaltet werden. In der Aufwärmphase wird es auf hoher Stufe betrieben. Erst während der letzten Minuten des Trockengangs wird es komplett ausgeschaltet, um die Wäsche vor der Entnahme abzukühlen.

Die Nennkapazität der Trommel liegt bei 7 kg Wäsche. Die Restfeuchte der Wäsche wird über eine Widerstandsmessung zwischen einem Kontakt in einem der Umwerfer und einem Kontakt an der Trommelaußenwand bestimmt. Die Leitfähigkeit der Wäsche gibt damit eine Aussage über ihre Restfeuchte. Das Prozessluftgebläse fördert einen Volumenstrom zwischen 50 und 100 m³/h. Es ist direkt hinter der Trommel positioniert und fördert damit den Luftstrom mit der höchsten Dichte.

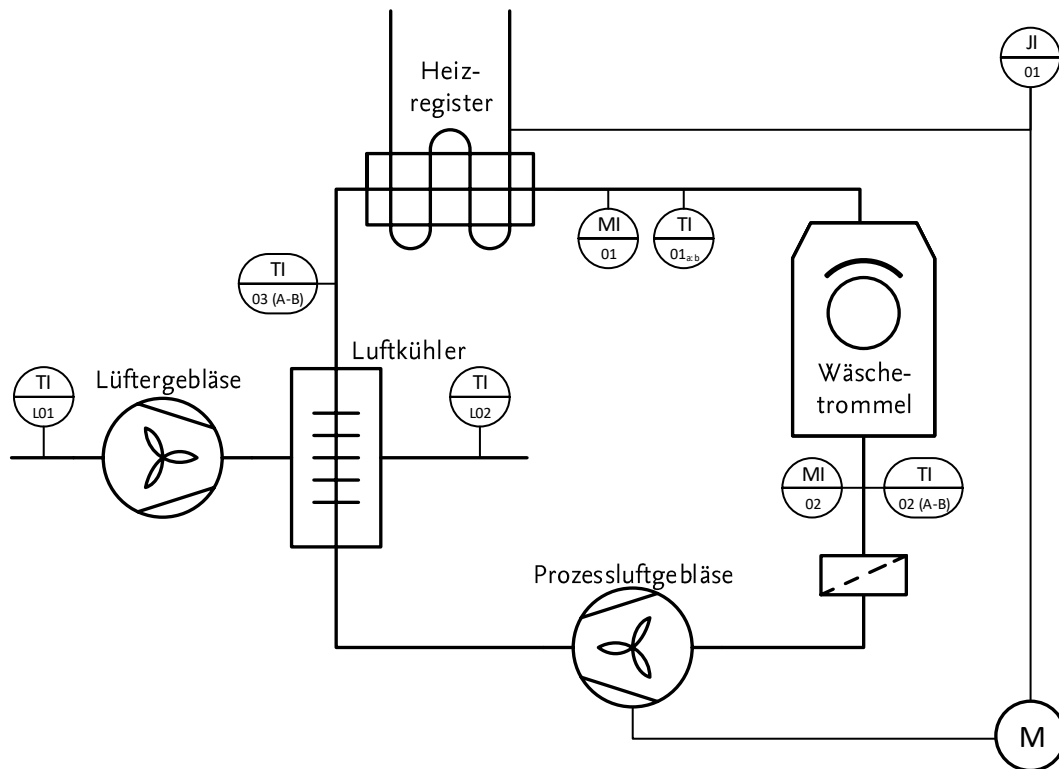


Abbildung 9: Messaufbau des Referenzrockners

Vor der Messung wird die Wäsche homogen in einer Waschmaschine befeuchtet und auf einen Wassergehalt von rund 60% gebracht (umgerechnet 4,2 l in der Wäsche gebundenes Wasser). Es wird das Verhalten eines „Kaltstarts“ untersucht, also ohne eine vorige Erwärmung von Komponenten durch einen vorher stattfindenden Trockengang. Bei der Ermittlung von Energieaufnahme und Trockendauer werden die gewonnenen Werte um die Abweichung der Anfangsfeuchte χ_a und Endfeuchte χ_e der Wäsche bereinigt. Die Differenz der Trockenmasse der verwendeten Wäsche zum Sollwert von 7 kg wird zudem berücksichtigt. Die gemessene Trockendauer und Energieverbrauch werden mit dem folgenden Betrag multipliziert:

$$\frac{m_{soll} \cdot (\chi_{soll,a} - \chi_{soll,e})}{m_{ist} \cdot (\chi_{ist,a} - \chi_{ist,e})}$$

Die Mittelwerte der durchgeführten Messungen eines Kondensationstrockners sind in folgender Tabelle dargestellt.

Abbildung 10: Gemittelte Werte der Messungen eines Kondensationstrockners mit 7 kg Wäschebelastung

Energieverbrauch	4,13 kWh
Trockendauer	124 Minuten

Auf weitere Messwerte des Kondensationstrockners wird im Abschnitt Modellvalidierung eingegangen.

4.2 Messaufbau des thermoelektrischen Wäschetrockners

Zur Aufstellung des Prüfstands eines thermoelektrischen Wäschetrockners wird ein baugleiches Gerät des Referenzrockners verwendet. Das Heizregister wird entfernt und die Luftführung wird nach Durchlaufen des Luftkühlers zum außerhalb des Trockners liegenden thermoelektrischen Wärmeübertrager geführt. Der Messaufbau inklusive Messstellen ist in Abbildung 11 dargestellt.

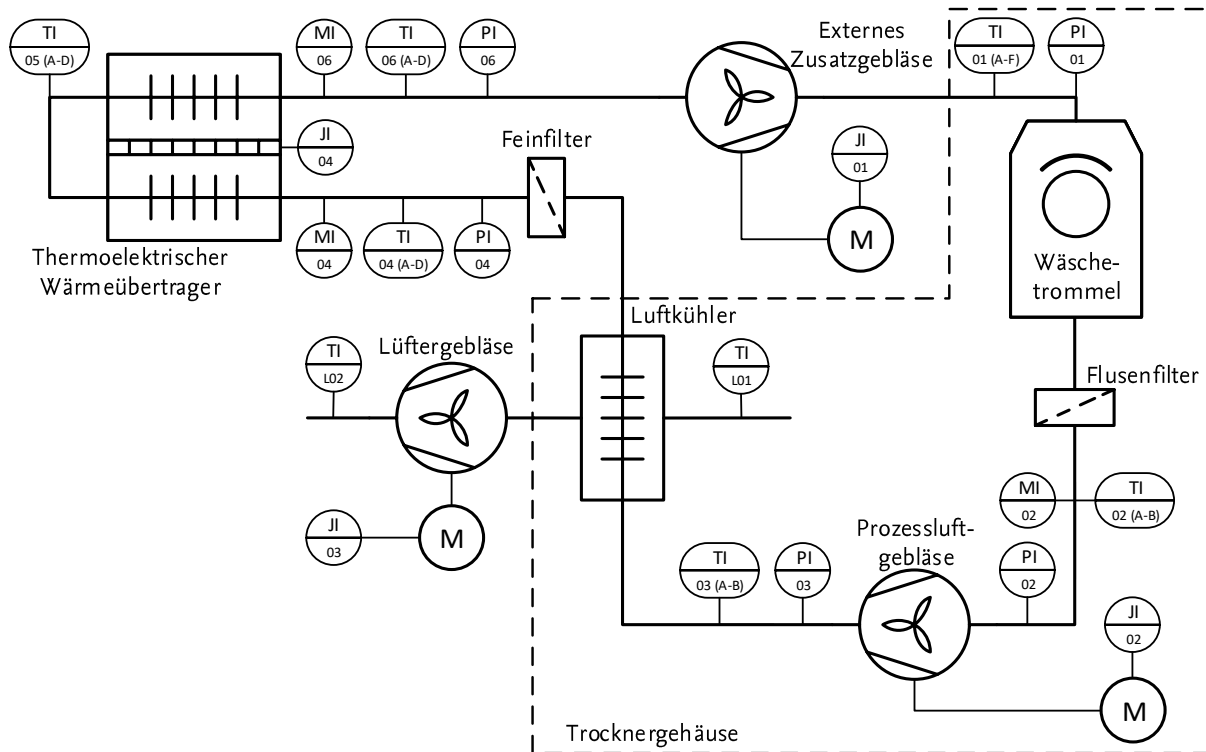


Abbildung 11: Messaufbau des thermoelektrischen Wäschetrockners.

Der thermoelektrische Wärmeübertrager ist ein selbst gefertigter Prototyp. Eine Skizze des thermoelektrischen Wärmeübertragers ist in Abbildung 12 zu sehen. Zur besseren Übersicht sind Schnitte durch den Wärmeübertrager gelegt. Die Kaltseite der TE-Module ist mit den Kupferplatten kontaktiert und ist zur besseren Orientierung blau eingefärbt. Die Warmseite der Module ist mit den warmseitigen Lamellenkörpern kontaktiert und rot eingefärbt.

Die Luft tritt im Bild links oben in den Wärmeübertrager ein, wird unten um 180° umgelenkt und tritt in die zwei Kühlkörper ein, wird dort erwärmt und verlässt das Bild oben rechts.

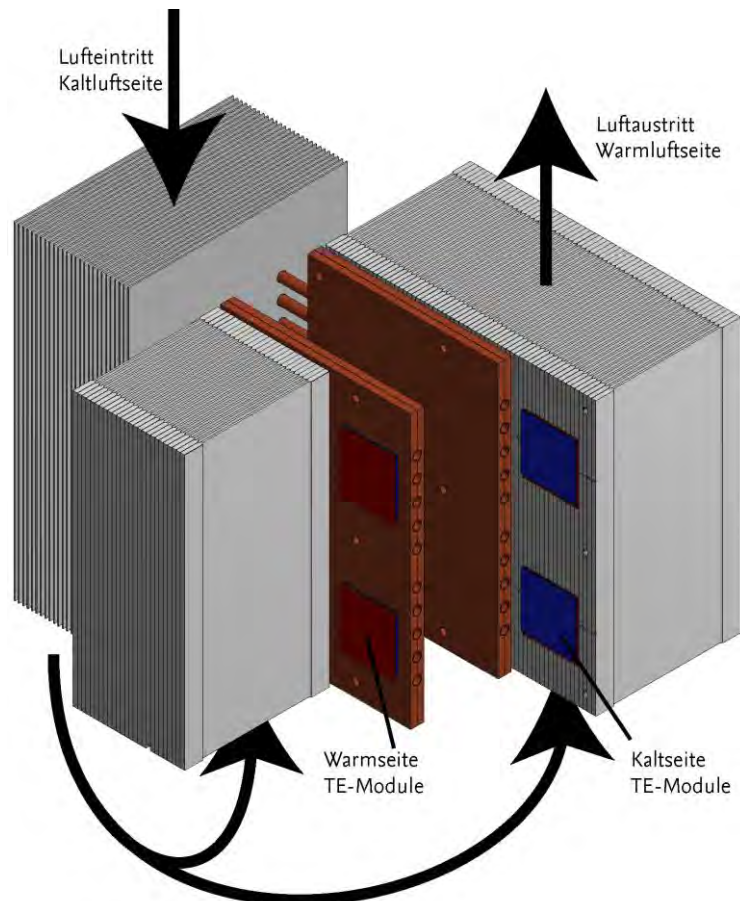


Abbildung 12: Prototypenzeichnung des thermoelektrischen Wärmeübertragers zur Wäschetrocknung. Die Kaltseite der Module ist blau, die Warmseite ist rot eingefärbt. Durch Aufteilung der Module auf zwei Schichten können die Wärmeübertragerflächen größer gestaltet werden.

Es sind in zwei Schichten mit jeweils 6 thermoelektrische Module des Typs TM-241-1.6-28.0MM der Firma Ferrotec Nord Corporation verbaut. Die elektrische Verschaltung wird als Parallelschaltung ausgeführt. Hierdurch kann bei einem Moduldefekt die Verschaltung einfach angepasst werden. Die thermische Anbindung auf der Warmseite erfolgt mittels zweier Hochleistungskühlkörper der Firma CTX Thermal Solutions. Auf der Kaltseite kommt ein selbst gefertigter Wärmeübertrager basierend auf Heat Pipes zum Einsatz. Die Heatpipes der Firma Quick Ohm haben eine Länge von 40 cm und einen Durchmesser von 8 mm. Sie sind befüllt mit Wasser und haben eine Sinterstruktur auf der Innenseite. Die thermische Anbindung an die thermoelektrischen Module erfolgt über 25x25 cm² Kupferplatten, in die Nuten für die insgesamt 20 Heatpipes gefräst sind. Die Heatpipes werden dünn mit Wärmeleitpaste der Firma Kerafol Typ KP99 bestrichen und dann über Verschraubungen verpresst. Die thermische Anbindung zur Luft wird durch 0,8 mm dicke Lamellen aus Aluminium mit Aussparungen für die Heatpipes realisiert. Diese werden in einem Abstand von 2-3 mm zueinander auf die Heatpipes geschoben. Durch die Klemmspannung besteht somit ein Kontakt zwischen den Heatpipes und den Lamellen, der maximal die Breite der Lamellendicke besitzt. Die Wärmeübertragerfläche beträgt auf der Kaltseite 4,05 m² und auf der Warmseite insgesamt 7,32 m² und orientiert sich dabei an der Wärmeübertragerfläche von Verdampfer und Verflüssiger eines typischen Wärmepumpentrockners.

Für einen eventuellen industriellen Produktionsprozess kann durch ein automatisiertes Aufziehen der Lamellen auf die Heatpipes eine deutliche Verbesserung der Wärmeübertragung erzielt werden.

Die Wärmeleitung zwischen den beiden Wärmeübertragern und den thermoelektrischen Modulen erfolgt über die Kontaktflächen der einzelnen Bauteile. Zur Gewährleistung eines geringen thermischen Widerstands sind Luftspalte in dieser Verbindung zu vermeiden. Die Oberflächengüte der Wärmeübertrageranbindung muss eine vergleichbare Oberflächengüte wie die Keramik der thermoelektrischen Module haben, um ein geringe Welligkeit und Rautiefe der Kontaktflächen zu gewährleisten. Weiterhin ist eine hohe Steifigkeit der Materialien notwendig damit die Kontaktflächen parallel zueinander bleiben und nicht verbiegen. Zur Sicherstellung dieser Eigenschaften werden die Kontaktkörper, zwischen denen die thermoelektrischen Module liegen, mit Schrauben verbunden und eine gleichmäßige Klemmkraft aufgebracht. Diese soll nach Herstellerangaben zwischen 130 und 150 N/cm² betragen. [QO17]

Um eine Erhöhung des Luftvolumenstroms zu realisieren, wird am Austritt des thermoelektrischen Wärmeübertragers für den Hauptteil Messungen ein zusätzliches Gebläse der Firma Systemair Typ KBT 250 eingebaut (vergleiche Abbildung 11: Externes Zusatzgebläse).

Alle zusätzlich in den Prozessluftkreislauf integrierten Komponenten sind mit flexiblem Isolationsrohr miteinander verbunden. Damit soll der zwischen den Komponenten auftretende Wärmeverlust gering gehalten werden.

4.3 Durchführung der Messung

Bei der Messung des thermoelektrischen Wäschetrockners werden die Werkeinstellungen der Elektronik des Verwendung findenden Kondensationstrockners beibehalten. Die Steuerung der Elektronik des Wäschetrockners ist maßgeblich vom Feuchtegrad der Wäsche abhängig. Dieser wird durch eine Widerstandsmessung der Wäsche zwischen einem der Aufnehmer und dem Trommelkörper gemessen.

Um besser auf den thermischen Verlauf des Gesamtprozesses Einfluss nehmen zu können, wird das verbaute Lüftergebläse entfernt und durch einen extern angesteuerten Lüfter ersetzt. Da dieser am Lufteinlass an der Trocknerrückwand besser angebaut werden kann, kehrt sich die Strömungsrichtung der Kühlluft im Luftkühler um.

Zur Erhöhung des Prozessluftvolumenstroms ist ein zusätzliches Gebläse in den Luftkreislauf integriert. Dieses Gebläse ermöglicht einen deutlich höheren Volumenstrom als es in am Markt verfügbaren Trocknern üblich ist. Die damit einhergehende höhere Leistungsaufnahme erhöht überdurchschnittlich den Energieverbrauch des Trockners. Zur Ermittlung der Leistungsaufnahme eines potentiellen thermoelektrischen Serientrockners wird deshalb der Energieverbrauch mit und ohne das zusätzliche Gebläse angegeben. Mittels eines Hitzdrahtanemometers wird die Luftgeschwindigkeit der Prozessluft für den gesamten Trockengang aufgezeichnet.

Die thermoelektrischen Module sind für die vorgestellten Messungen alle elektrisch parallel geschaltet. Zur Einstellung der Leistung der Module werden über die zwei Netzteile die Stromstärke

der Module eingestellt. Ein Netzteil versorgt die 6 Module, welche in Luftstromrichtung örtlich näher am Ein- bzw Austritt des Wärmeübertragers liegen und damit Wärme über eine größere Temperaturdifferenz transportieren müssen (vergleiche Abbildung 8 rechte Seite). Das andere Netzteil versorgt folglich die anderen 6 Module welche örtlich näher am Kondensatbehälter des thermoelektrischen Wärmeübertragers liegen (vergleiche Abbildung 8 linke Seite). Bei den meisten Messungen wird die gleiche Stromstärke in den Netzteilen eingestellt und über den Trocknungsprozess konstant gehalten.

Sobald der Wäschetrockner eingeschaltet ist, werden sowohl das externe Prozessluftgebläse als auch das Lüftergebläse direkt zugeschaltet. Die Elektronik des Kondensationstrockners sendet nach ca. 60 Sekunden ein Signal zum Anschalten des Heizregisters. Sobald dieses Signal gesendet wird, werden die thermoelektrischen Module mit Leistung versorgt. Gegen Ende des Trockengangs fällt die Wäscherestfeuchte unter einen gewissen Wert und ein Signal zum Abschalten des Heizregisters wird gesendet. Die restliche Zeit bevor das Endsignal ertönt und der Trockner abschaltet dient der Abkühlung der Wäsche.

4.4 Ergebnisse der Messung

Mit Hilfe einer Stromquelle werden Messungen mit drei unterschiedlichen Modulstromstärken 6 A, 7 A und 8 A durchgeführt. Somit können drei unterschiedlich hohe Leistungsniveaus während der Wäschetrocknung untersucht werden. Ein durchschnittlicher Wert der Modulleistung bei der jeweiligen Stromstärke ist in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Zeitliche Durchschnittsleistung der thermoelektrischen Module bei unterschiedlichen Stromstärken.

Modulstromstärke [A]	Durchschnittliche Gesamtleistung der thermoelektrischen Module [W]
6	800
7	1150
8	1500

Zunächst werden die auftretenden Verlustmechanismen beim Trocknungsprozess mittels thermoelektrischer Wärmepumpe aufgezeigt und analysiert.

Der im Luftkreislauf vorhandene Druckverlauf gibt Auskunft über potentiellen Leckagestellen und die Druckverluste einzelner Komponenten. Mit diesen Informationen kann ein vom Gebläse aufzubringender Druckhub abgeschätzt werden.

Im der folgenden Abbildung ist der Druckverlauf bei einem Volumenstrom von etwa 180 m³/h in der Haupttrocknungsphase (bei konstanter Trocknungsgeschwindigkeit) dargestellt. Der Volumenstrom wird dabei mithilfe des genannten Hitzdrahtanemometers ermittelt.

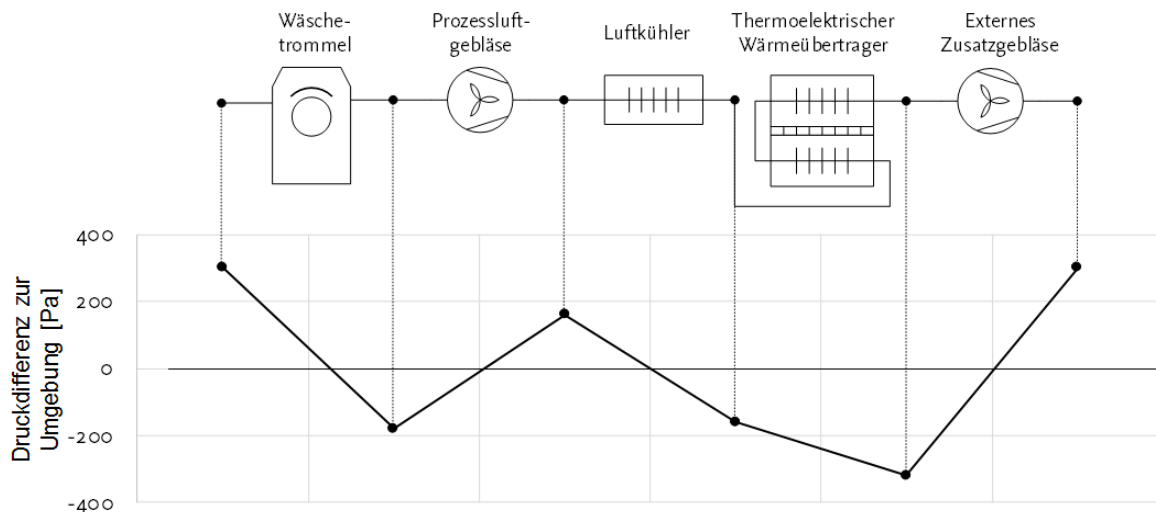


Abbildung 13: Repräsentativer Druckverlauf im Prozessluftkreislauf des thermoelektrischen Wäschetrockners.

Aus der Trommel wird die Luft von dem im Trockner verbauten Gebläse angesaugt und es liegt ein Unterdruck vor. Bei leichtem Überdruck verlässt die Luft das Gebläse und passiert den in den Trockner integrierten Luftkühler. Beim Eintritt in den thermoelektrischen Wärmeübertrager (TEWÜ) liegt ein Unterdruck von rund 100 Pa vor. Der bis hierhin auftretende Druckverlauf ergibt sich durch die im Trockner verbauten Komponenten. Es kommt lediglich das Verbindungsrohr zum TEWÜ hinzu. Die Luft verlässt den TEWÜ mit einem Unterdruck von etwa 350 Pa und wird vom zusätzlich in den Kreislauf integrierten externen Prozessluftgebläse angesaugt. Mit einem Überdruck von rund 350 Pa tritt es schließlich in das Trocknergehäuse ein.

Im Referenzrockner beträgt der Druckhub des Gebläses etwa 300 bis 400 Pa. Aufgrund des höheren Volumenstroms ist ein Druckhub zu erwarten, der bei einem typischen Wärmepumpentrockner mit vergleichbarem Volumenstrom auftritt. In einem am Markt verfügbaren Wärmepumpentrockner beträgt der Druckhub des Gebläses etwa 500 bis 600 Pa. Da jedoch Wäschtrommel und Luftkühler nicht für den höheren Volumenstrom ausgelegt sind, steigt der Druckverlust aller Komponenten des Kreislaufs an.

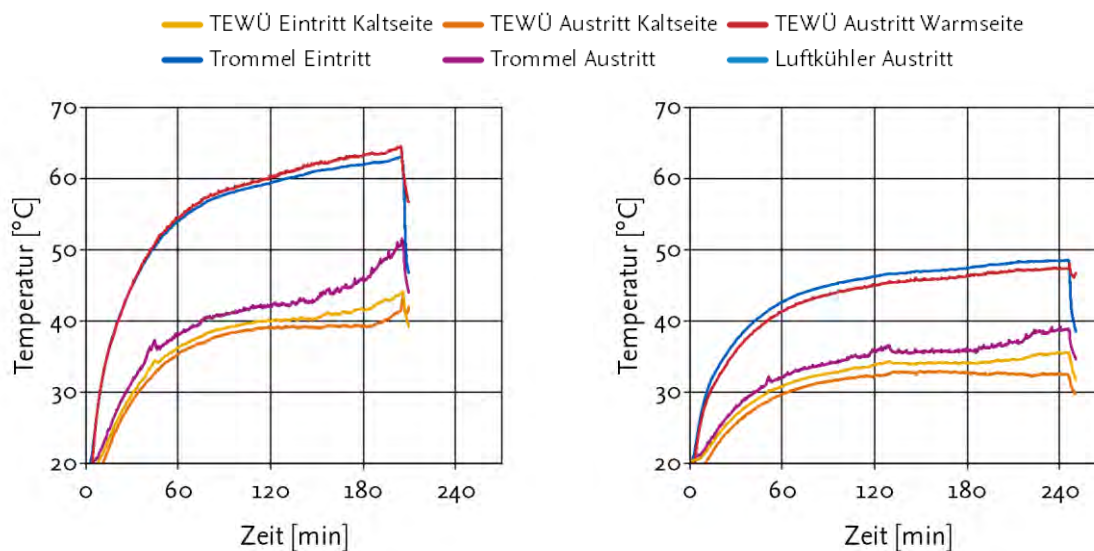
Eine weitere Erklärung für den hohen Druckabfall über die Trommel ist eine Luftleckage. Da im Referenzrockner das Gebläse nach der Trommel angeordnet ist, sind die Trommeldichtungen auf einen Unterdruck ausgelegt. Durch die Integration eines zweiten Prozessluftgebläses ist der vorherrschende Druckverlauf grundsätzlich verschieden zum Referenzrockner. Das Gebläse muss eine hohe Druckdifferenz aufbauen, um den gewünschten Volumenstrom zu erreichen. Durch den starken Überdruck am Trommeleintritt tritt eine Leckage im System auf, die einen Feuchtigkeitsverlust bei den Messungen von über 50 % zur Folge hat.

Es ist davon auszugehen, dass in einem potentiellen thermoelektrischen Serientrockner nur ein Prozessluftgebläse eingebaut wird. Je nach Positionierung des Gebläses wird sich der Druckverlauf gestalten. Das Gebläse wird jedoch stets so ausgelegt sein, dass bei einem mit dem gemessenen

Volumenstrom vergleichbaren Wert entweder Über- oder Unterdruck an der Trommel vorliegt. Damit können die Trommeldichtungen eine überdurchschnittliche Leckage am Trommelkörper verhindern.

Eine derart veränderte Prozessführung hätte zur Folge, dass bei einem thermoelektrischen Serientrockner mit geringer Leckage am Trommelkörper der insgesamt auftretende Druckabfall bei gleichbleibendem Volumenstrom absinken würde. Für die Auslegung von künftigen Serientrocknern kann also der Druckhub vom Austritt des TEWÜs bis zum Umgebungsdruck angenommen werden. Somit ergibt sich für einen thermoelektrischen Serientrockner ein vom Gebläse aufzubringender Druckhub von etwa 700 Pa. Im Vergleich zum Kondensationstrockner muss also ein ungefähr doppelt so hoher Druckhub aufgebracht werden.

Zunächst wird zum besseren Verständnis des Gesamtprozesses der zeitliche Temperaturverlauf der Temperaturmessstellen im Prozessluftkreislauf vorgestellt. Die Position der Messstellen kann mit Hilfe von Abbildung 11 nachvollzogen werden. Es werden zwei beispielhafte Messungen ausgewählt, die den Leistungsbereich umfassen, der in den Messungen eingestellt werden kann. In Abbildung 14a sind die TE-Module mit jeweils 8 A und in Abbildung 14b mit 6 A durchflossen.



a) Hohe Leistungsaufnahme der Module: Jedes Modul wird von 8 A durchflossen.

b) Geringe Leistungsaufnahme der Module: Jedes Modul wird von 6 A durchflossen.

Abbildung 14: Prozesslufttemperaturen des thermoelektrischen Wäschetrockners bei unterschiedlicher Leistungsaufnahme der Module.

Aufgrund der geringeren Leistungsaufnahme der Module (vergleiche Tabelle 1 & Abbildung 17) liegt bei 6 A pro Modul das gesamte Temperaturniveau tiefer als bei 8 A pro Modul. Bei 120 Minuten liegt die Trommeleintrittstemperatur bei 6 A pro Modul bei rund 45 °C und bei 8 A pro Modul bei etwa 60 °C. Die Austrittstemperatur an der Kaltseite des thermoelektrischen Wärmeübertragers liegt bei knapp 35 °C bzw. 40 °C. Durch das externe Zusatzgebläse wird zwischen thermoelektrischem Wärmeübertrager und Trommeleintritt Wärme an die Prozessluft übertragen. Bei geringer Leistungsaufnahme ist dieser Einfluss sichtbar (Abbildung 14b). Bei hoher Leistungsaufnahme wird dieser Einfluss stärker von einem Abwärmestrom an die Umgebung überlagert.

Wird um den thermoelektrischen Wärmeübertrager ein Bilanzraum gezogen, treten die in Abbildung 15 dargestellten Energieströme über die Bilanzgrenzen auf. Die spezifischen Enthalpien der Zustandspunkte sind im Folgenden stets auf einen Referenzpunkt bezogen, der die Enthalpieströme in die Größenordnung der auftretenden Wärmeströme bringt. Die Energieströme sind für einen typischen Zustand bei konstanter Trocknungsgeschwindigkeit dargestellt.

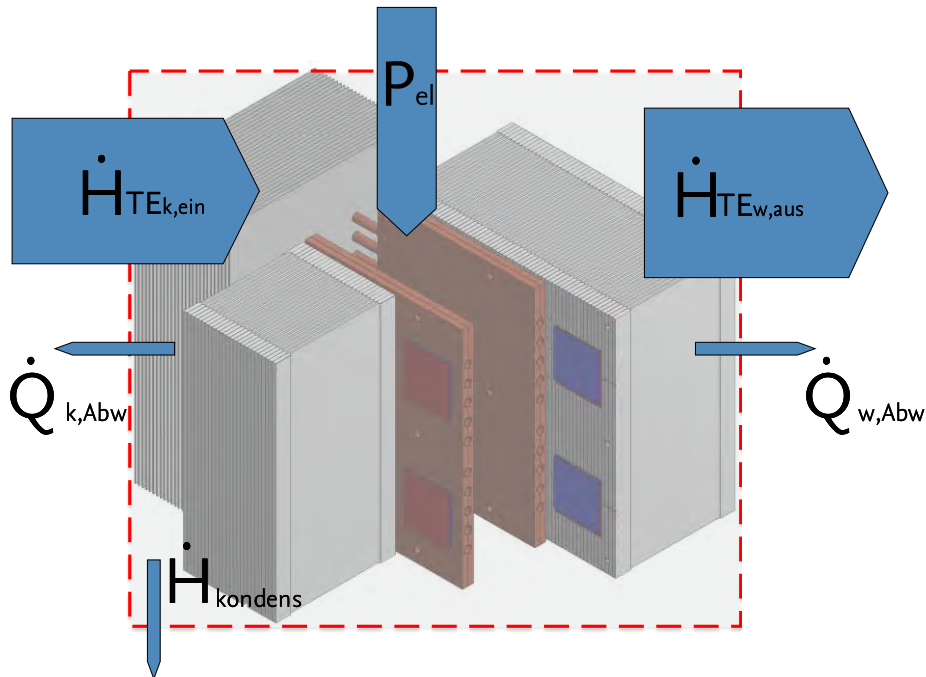


Abbildung 15: Ein- und austretende Energieflüsse des thermoelektrischen Wärmeübertragers.

Trotz einer durchgehenden Isolierschicht rund um den Wärmeübertrager tritt auf beiden Seiten des Wärmeübertragers ein Wärmestrom an die Umgebung auf. Der Wärmeleitwert des jeweiligen Wärmeübertragers an die Umgebung ist über einen Dauerversuch mit konstanter Eintrittstemperatur bestimmt. Die Erhöhung des Enthalpiestroms berechnet sich folglich zu

$$\dot{H}_{TEw,aus} - \dot{H}_{TEk,ein} = P_{el} - \dot{Q}_{k,Abw} - \dot{H}_{kondens} - \dot{Q}_{w,Abw} \quad (8)$$

$\dot{H}_{kondens}$ stellt dabei den Enthalpiestrom des abfließenden Kondenswassers dar.

Die Spannung der thermoelektrischen Module wird über eine Spannungsmesskarte gemessen und an das Datenerfassungssystem gesendet. Die elektrische Leistung der Module ergibt sich aus eingestellter Stromstärke multipliziert mit der gemessenen Spannung. Der jeweilige Enthalpiestrom berechnet sich aus dem Luftmassenstrom der trockenen Luft und der spezifischen Enthalpie der Luft in Abhängigkeit der vorliegenden Temperatur und Dichte.

$$\dot{H} = \dot{m} \cdot h_{1+x} \quad (9)$$

Zur Erfassung der jeweiligen Temperatur sind Thermoelemente vom Typ K verwendet worden. Die Luftfeuchte am Eintritt und Austritt des thermoelektrischen Wärmeübertragers wird jeweils mit einem Feuchtesensor vom Typ HMT337 der Firma Vaisala gemessen. Zusätzlich zur Feuchtemessung werden die Ein- und Austrittstemperatur des Wärmeübertragers mit PT100-Sensoren erfasst. Die

Temperaturdifferenz auf der Kaltluftseite des Wärmeübertragers wird zudem mit einem Differenzthermoelement gemessen.

Zur detaillierten Betrachtung wird der thermoelektrische Wärmeübertrager in drei Bilanzräume aufgeteilt: Kaltluftseite, Thermoelektrische Module und Warmluftseite. Die Kaltluftseite beinhaltet die Wärmeübertragerstruktur der Kaltseite ohne Heatpipes, Kupferplatten und die Kontaktierung zu den thermoelektrischen Modulen. Der Bilanzraum der thermoelektrischen Module umfasst neben den thermoelektrischen Modulen noch die Kontaktflächen beider Seiten.

Basierend auf Abbildung 12 und Abbildung 15 sind in der folgenden Abbildung 16 die drei Bilanzräume skizziert. Zusätzlich ist ein Energieflussdiagramm in die Abbildung integriert, welches einen qualitativen Überblick über die vorliegenden Energieströme geben soll. Die Energieströme sind für einen typischen Zustand bei konstanter Trocknungsgeschwindigkeit dargestellt.

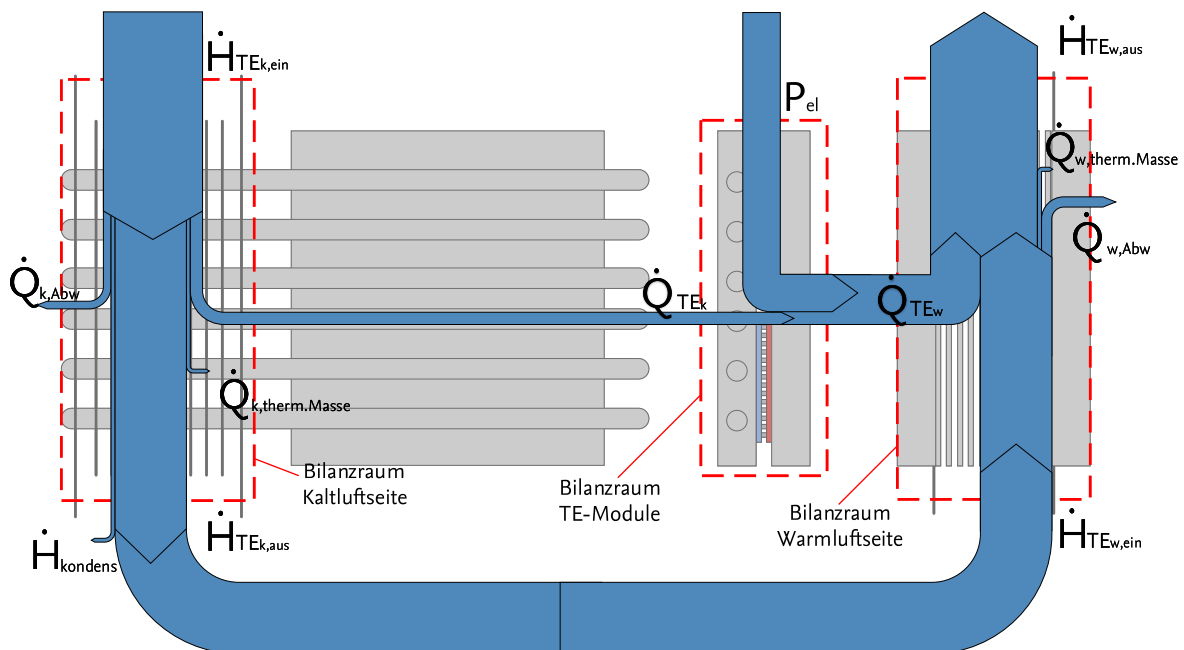


Abbildung 16: Energieflussdiagramm des thermoelektrischen Wärmeübertragers für einen typischen Zustand konstanter Trocknungsgeschwindigkeit. Durch die Aufteilung in drei Bilanzräume wird der thermoelektrische Wärmepumpeneffekt verdeutlicht.

Für den Bilanzraum der Kaltluftseite gilt folgende Gleichung:

$$\dot{Q}_{TEk} = \dot{H}_{TEk,ein} - \dot{H}_{TEk,aus} - \dot{Q}_{k,Abw} - \dot{Q}_{k,therm.Masse} - \dot{H}_{kondens} \quad (10)$$

Zur Erwärmung des Wärmeübertragers muss ein Teil der zugeführten Leistung aufgewendet werden. Dieser Wärmestrom $\dot{Q}_{k,therm.Masse}$ ist über den Trocknungsverlauf abnehmend und spielt deshalb insbesondere zu Beginn des Trockengangs eine Rolle. Der Wärmestrom an die thermoelektrischen Module ergibt sich aus der Differenz des ein- und austretenden Enthalpiestroms abzüglich verschiedener Verlustterme. Zusätzlich zum Wärmestrom an die Umgebung wird ein Enthalpiestrom

des Kondenswassers abgeführt, sowie ein Wärmestrom zur Erwärmung der thermischen Massen berücksichtigt.

Die Bilanzgleichung der Warmluftseite kann analog zur Kaltluftseite aufgestellt werden:

$$\dot{Q}_{TE_w} = \dot{H}_{TE_w,aus} - \dot{H}_{TE_w,ein} + \dot{Q}_{w,Abw} + \dot{Q}_{w,therm.Masse} \quad (11)$$

Wie auf der Kaltseite ist auch auf der Warmseite der Wärmeleitwert an die Umgebung mithilfe des Dauerversuchs bestimmt worden. Der von den thermoelektrischen Modulen abgegebene Wärmestrom berechnet sich aus der Differenz der Enthalpieströme zuzüglich des Abwärmestroms und des Wärmestroms zur Erwärmung der thermischen Masse.

Die Bilanzgleichung für die thermoelektrischen Module lautet

$$P_{el} = \dot{Q}_{TE_w} - \dot{Q}_{TE_k} \quad (12)$$

Die eingehenden und ausgehenden Wärmeströme können nicht direkt aus Messgrößen berechnet werden. Ihre Differenz kann mittels Gleichung 12 jedoch mit der elektrischen Leistungsaufnahme verglichen werden.

In den folgenden Abbildungen sind die aus den Gleichungen 10 und 11 berechneten Wärmeströme und die elektrische Leistung der thermoelektrischen Module für die drei eingestellten Leistungsniveaus der Module aufgetragen. Zur Überprüfung der Wärmeströme wird zusätzlich die Summe von elektrischer Leistung und Wärmestrom der Kaltseite als *Heizleistung Summe* eingetragen und mit dem Wärmestrom der Warmseite verglichen.

Die Summe aus Kälteleistung und elektrischer Leistung weicht über den Trockengang in großen Teilen weniger als 10 % von der Heizleistung ab und befindet sich damit im Bereich der Messunsicherheit, die sich aus der gekoppelten Messunsicherheit der verwendeten Sensoren ergibt.

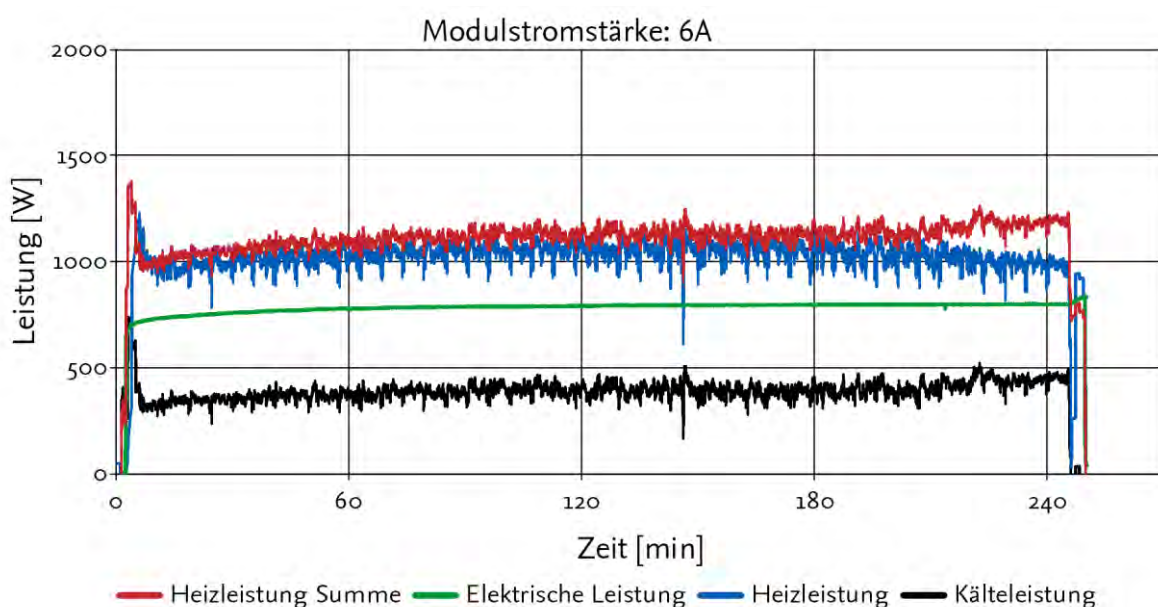


Abbildung 17: An thermoelektrischen Modulen vorliegende Gesamtleistung bei einer Modulstromstärke von 6 A.

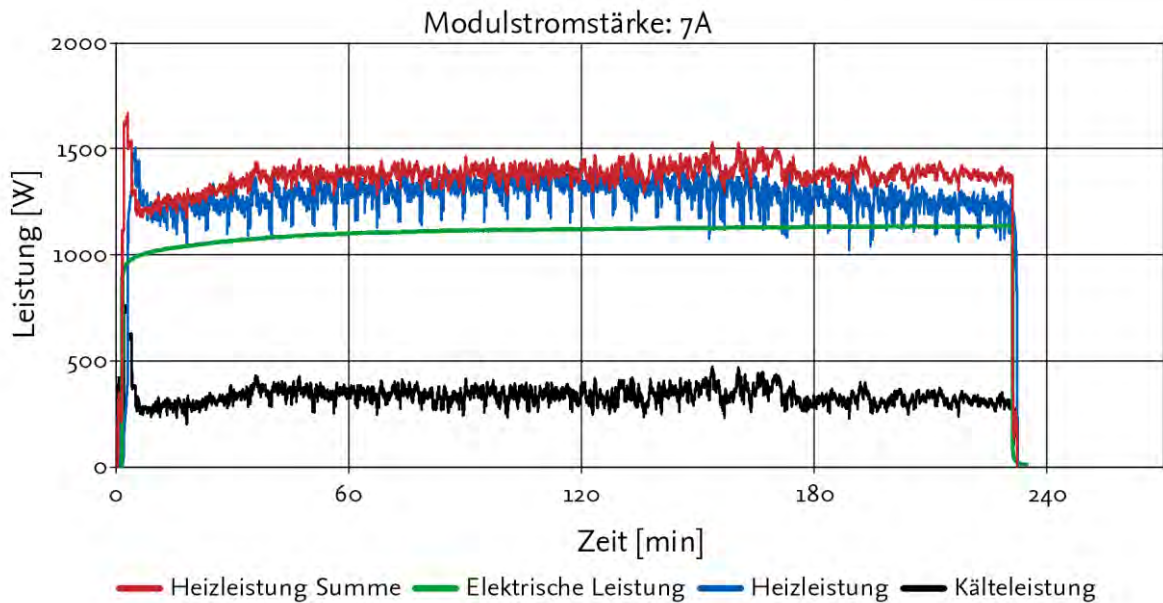


Abbildung 18: An thermoelektrischen Modulen vorliegende Gesamtleistung bei einer Modulstromstärke von 7 A.

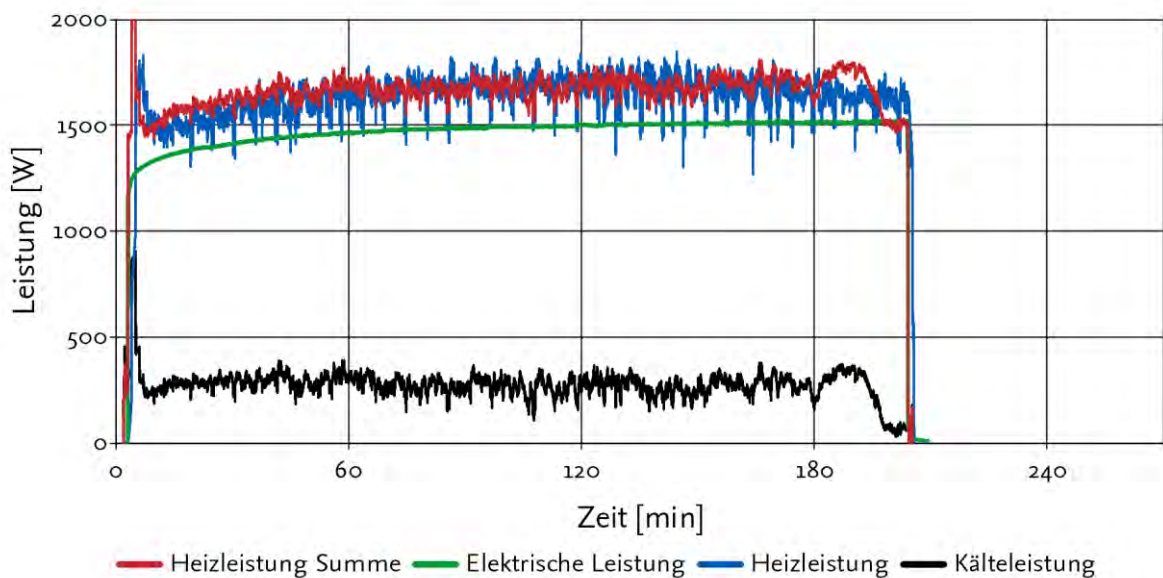


Abbildung 19: An thermoelektrischen Modulen vorliegende Gesamtleistung bei einer Modulstromstärke von 8 A.

Aus dieser Gegenüberstellung kann gezeigt werden, dass die Energiebilanzen der drei Kontrollvolumen im Bereich der Messunsicherheit erfüllt werden. Somit konnte die Funktion thermoelektrischer Module zur Luftentfeuchtung in einem Wäschetrockner experimentell bestätigt werden.

Zur Identifizierung potentieller Verlustmechanismen wird eine Exergiebetachtung durchgeführt. Hierzu wird in Anlehnung an Abbildung 16 ein Exergieflussdiagramm des Wärmeübertragers in Abbildung 20 dargestellt. Der thermoelektrische Wärmeübertrager wird wieder in drei Bilanzräume aufgeteilt: Kaltluftseite, Thermoelektrische Module und Warmluftseite.

Die ein- und austretenden Exergieströme sind qualitativ für einen Zeitpunkt während der Haupttrocknungsphase eingezeichnet. Die Bilanzgrenzen sind in wie in Abbildung 16 mit rot gestrichelte Linien gekennzeichnet.

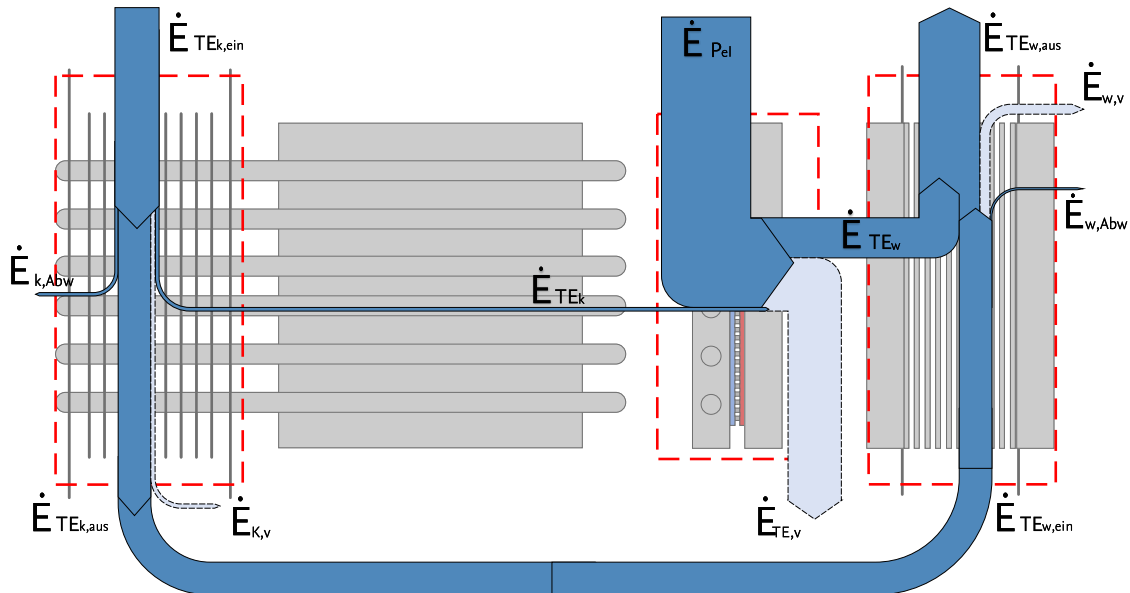


Abbildung 20: Exergiestromdiagramm des thermoelektrischen Wärmeübertragers. Der im jeweiligen Kontrollvolumen vorliegende Exergieverlust ist als gestrichelter hellblauer Pfeil eingezeichnet.

Die Bilanz der Kaltluftseite berechnet sich zu

$$\dot{E}_{k, v} = \dot{E}_{TEk, ein} - \dot{E}_{TEk} - \dot{E}_{TEk, aus} - \dot{E}_{k, Abw} \quad (13)$$

$\dot{E}_{k, v}$ stellt dabei den Exergieverlust der Kaltseite dar. Dieser ergibt sich aus der Summe der ein- und austretenden Exergieströme der Luft $\dot{E}_{TEk, ein/aus}$ abzüglich der Exergieströme durch Abwärme an die Umgebung $\dot{E}_{k, Abw}$ und Wärme, die zu den thermoelektrischen Modulen geleitet wird \dot{E}_{TEk} .

Analog zur Kaltseite ist die Bilanz der Warmseite aufgestellt.

$$\dot{E}_{w, v} = \dot{E}_{TEw, ein} + \dot{E}_{TEw} - \dot{E}_{TEw, aus} - \dot{E}_{w, Abw} \quad (14)$$

Die Exergiebilanz der thermoelektrischen Module

$$\dot{E}_{TE, v} = \dot{E}_{TEk} - \dot{E}_{TEw} + \dot{E}_{PEl} \quad (15)$$

umfasst die zugeführte elektrische Leistung, die reine Exergie ist.

Die Terme auf der linken Seite der drei Bilanzgleichungen stellen den jeweiligen Exergieverlust im Kontrollvolumen dar. Die Exergiebilanzen werden für einen repräsentativen Zeitpunkt während der Haupttrocknungsphase bei Anliegen von 6 und 8 A berechnet und die Ergebnisse in Tabelle 2 gegenübergestellt.

Tabelle 2: Beispielhafte Exergieströme im thermoelektrischen Wärmeübertrager während der Haupttrocknungsphase.

Modulstromstärke		6 A	8 A
Bilanzraum Kaltseite		Exergiestrom [W]	
Eintretender Luftstrom	$\dot{E}_{TE_k, ein}$	111,6	253,7
Austretender Luftstrom	$\dot{E}_{TE_k, aus}$	93,5	232,2
Exergiestrom Abwärme	$\dot{E}_{k, Abw}$	0,4	1,7
Exergiestrom an TE-Kaltseite	\dot{E}_{TE_k}	5,3	14,0
Exergieverlust	$\dot{E}_{k, v}$	12,5	5,8
Bilanzraum Warmseite		Exergiestrom [W]	
Eintretender Luftstrom	$\dot{E}_{TE_w, ein}$	93,5	232,2
Austretender Luftstrom	$\dot{E}_{TE_w, aus}$	135,3	351,7
Exergiestrom Abwärme	$\dot{E}_{w, Abw}$	3,0	8,1
Exergiestrom von TE-Warmseite	\dot{E}_{TE_w}	100,4	262,8
Exergieverlust	$\dot{E}_{w, v}$	55,5	135,3
Bilanzraum TE-Modul		Exergiestrom [W]	
Elektrische Leistung	$\dot{E}_{P_{el}}$	735	1422
Exergieverlust	$\dot{E}_{TE, v}$	639,9	1173,2

Zur Einordnung des Einflusses der einzelnen Exergieverlustströme auf das Wärmeübertragerverhalten werden die Größen auf den insgesamt im Wärmeübertrager auftretenden Exergieverlust $\dot{E}_{ges, v}$ normiert.

$$\dot{E}_{ges, v} = \dot{E}_{k, v} + \dot{E}_{w, v} + \dot{E}_{TE, v} \quad (16)$$

Die Anteile am insgesamt im thermoelektrischen Wärmeübertrager auftretenden Exergieverluste sind in Tabelle 3 aufgetragen.

Tabelle 3: Anteile der Exergieverluste im thermoelektrischen Wärmeübertrager.

Modulstromstärke	6 A	8 A
Anteil an Gesamtexergieverlust		
Kaltseite	0,018	0,004
Warmseite	0,078	0,103
TE-Modul	0,904	0,893

Der Anteil des Exergieverlustes, der auf der Kaltseite auftritt, ist mit unter 2 % am geringsten. Hierdurch kann abgeleitet werden, dass die Wärmeübertragung mittels Heatpipes auf der Kaltseite des Wärmeübertragers hinreichend gut funktioniert. Die Warmseite des Wärmeübertragers bietet mit einem Anteil von bis zu 10 % hingegen noch Potential zur Verbesserung der Wärmeübertragung an die Luft.

Der größte Exergieverlust tritt mit rund 90 % in den thermoelektrischen Modulen auf. Diese Bauteile besitzen somit ein hohes Potential zur Effizienzsteigerung eines thermoelektrischen Wärmeübertragers zur Wäschetrocknung. Dies beinhaltet zum einen die Materialeigenschaften der Halbleiterelemente, deren Verbesserung den thermoelektrischen Wärmepumpeneffekt direkt steigern würde. Ein weiterer potentieller Einfluss stellt die thermische Anbindung der thermoelektrischen Module dar. Ein hoher Kontaktwiderstand zwischen Modul und Wärmeübertrager reduziert den übertragbaren Wärmestrom und damit den exergetischen Wirkungsgrad der thermoelektrischen Module. Aus den berechneten Anteilen der Exergieverluste kann abgeleitet werden, dass die Kontaktierung der TE-Module zur Warmseite des Wärmeübertragers noch Verbesserungspotential bietet.

5 Modellerstellung für einen thermoelektrischen Wäschetrockner

Parallel zu Planung, Aufbau und Vermessung des Prototyps wird ein detailliertes transientes Modell für den thermoelektrischen Wäschetrockner erstellt. Die in den laufenden Messungen generierten Daten fließen dabei in die Modellierung mit ein. Zu entwickelnde Komponentenmodelle dienen als Basis für die Modellierung des thermoelektrischen Wäschetrocknersystems. Als Werkzeug kommt die Modelica-Bibliothek TIL zum Einsatz. [Teg99] Neben Wäschetrockner-spezifischen Komponenten wie z.B. ein physikalisch aussagekräftiges Modell der Wäschetrommel samt Inhalt, werden zusätzlich die Wärmeübertrager detailliert modelliert, um dynamische Effekte realistisch abzubilden. Wie aus Voruntersuchungen deutlich wurde, sind diese Komponenten maßgeblich für eine hohe energetische Effizienz. Schließlich wird das Systemmodell anhand von Messergebnissen eines vorhandenen Referenzrockners und des Prototyps validiert und ggf. fehlende Parameter angepasst. Die Modelle werden u.a. dazu verwendet, Sensitivitätsanalysen und Parameterstudien durchzuführen.

5.1 Modellierung der bestehenden Systemkomponenten

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Komponentenmodelle des thermoelektrischen Wäschetrocknersystems näher beschrieben. In Abbildung 21 ist zur Übersicht eine Systemskizze dargestellt, die nur diese Komponenten beinhaltet.

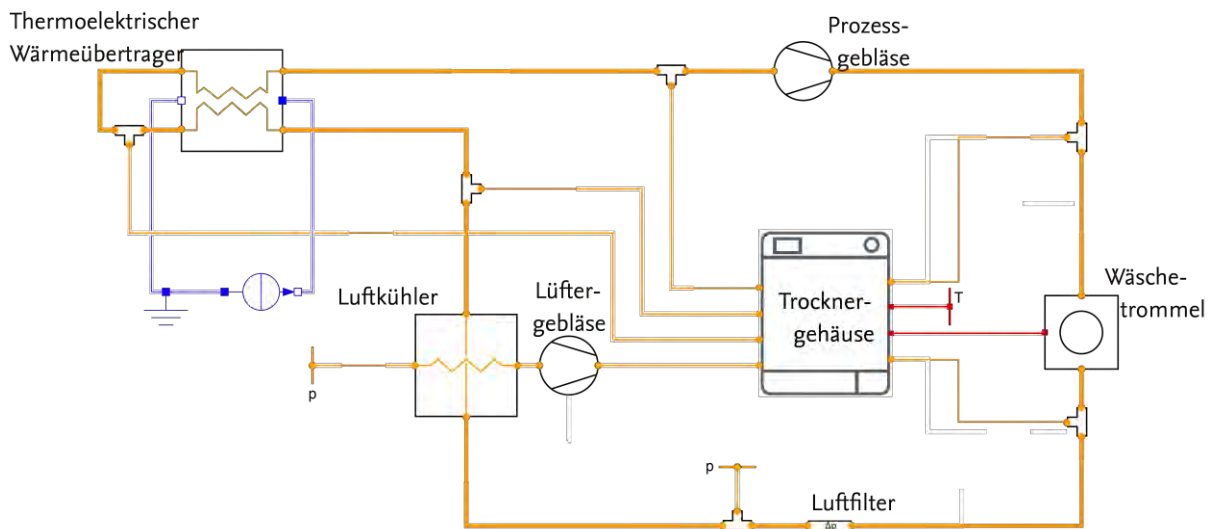


Abbildung 21: Skizze des Simulationsmodells eines thermoelektrischen Wäschetrockners in Modelica.

Die Komponente Wäschetrommel beinhaltet den Trommelkörper, die darin enthaltene wasserbeladene Wäsche und die vorliegende Luft. Zwischen den letzteren beiden findet gleichzeitig ein Wärme- und Stofftransport statt. Ein Wärmestrom fließt von der Luft zur Wäsche. Der Stofftransport erfolgt durch einen Wassermassenstrom des aus der Wäsche verdampften Wassers. Das Wäschetrommelmodell basiert auf der Arbeit von Deans und wurde im Rahmen Projekts AZ 31753 als Modelica-Modell erstellt [Alp17].

Der Luftfilter stellt einen zusätzlich im System auftretenden Druckverlust dar. Über den Trocknungsverlauf setzt sich der Filter langsam mit Flusen zu und der Druckverlust steigt an.

Im Modell sind zwei Gebläse modelliert. Das eine stellt das Prozessluftgebläse dar und sorgt für einen kontinuierlichen Luftstrom im Kreislauf. Dabei muss das Gebläse die auftretenden Druckverluste in den Komponenten überwinden. Der ansteigende Druckverlust im Filter verursacht eine Abnahme des Prozessluftvolumenstroms im Verlauf des Trockenvorgangs. Die Gebläsekennlinie des Prozessluftgebläses ist hierbei angelehnt an eine Gebläsekennlinie eines zum Vergleich herangezogenen Wärmepumpentrockners. Sie wird leicht angepasst, um bei vergleichbarem Luftvolumenstrom den zusätzlichen Druckhub über den thermoelektrischen Wärmeübertrager zu gewährleisten. Dadurch ergibt sich auch eine leicht erhöhte Leistungsaufnahme. Das andere im Gesamtmodell vorhandene Gebläse ist das Lüftergebläse, was den Luftkühler je nach eingestellter Drehzahl mit einem Luftstrom versorgt.

Der Luftkühler ist ein im Rahmen des Projekts erstellter Wärmeübertrager. Dieser ist in Kreuzstrombauweise modelliert, da er in dieser Bauform auch im Kondensationstrockner Einsatz findet. Die Hauptbestandteile sind zwei Fluidzellen und eine Wandzelle, welche die beiden Luftströme voneinander trennt. In den Fluidzellen wird ein Kondensieren bzw. Verdampfen von Feuchtigkeit aus der Luft berücksichtigt. Zur Berechnung aller Werte werden ähnlich wie in der Wäschetrommel zwei Bilanzräume aufgestellt. Ein Bilanzraum umfasst dabei die vorhandene Luft. Der zweite Bilanzraum beinhaltet die Wand und den bei der Kondensation entstehenden Flüssigkeitsfilm.

Die Komponente Trocknergehäuse beinhaltet das Gehäusematerial und das Luftvolumen im Gehäuse und stellt die Verbindung zwischen Prozessluftkreislauf und der Umgebung dar. Im Laufe des Trocknungsprozesses erwärmt sich das Gehäuse infolge einer Erwärmung der Prozessluft und einer Wärmeabgabe der Motoren. Zeitgleich findet ein Wärme- und Luftaustausch mit der Umgebung statt. Im Trocknergehäuse werden somit einzelne thermische Widerstände und thermische Massen in einem thermischen Netzwerk dargestellt. Des Weiteren werden verschiedene mit dem System in Wechselwirkung stehende Luftströme zusammengefasst und damit ein Feuchteverlust im System abgebildet.

5.2 Modellerstellung des TE-Wärmeübertragermodells

Um das Verhalten thermoelektrischer Wärmepumpen auf dem Gebiet der Wäschetrockneranwendung abbilden zu können, wurde ein Simulationsmodell eines thermoelektrischen Moduls auf Basis der Simulationssoftware Modelica/Dymola erstellt, in die Modellbibliothek integriert, validiert und untersucht. [JRT08], [JLK09]

Da dieses Modell in der Ursprungsversion jedoch nur die an den Kontaktflächen zwischen thermoelektrischem Modul und Wärmeübertrager auftretenden Wärmeströme und Temperaturen berücksichtigte, wurde der Detaillierungsgrad bereits im abgeschlossenen Projekt AZ 285258 gesteigert [Som14]. Dieses ganzheitliche Modell des thermoelektrischen Elements ist im Rahmen dieses Projekts weiter verbessert worden und anhand von Messungen an einem dafür erstellten Prüfstand validiert worden. Eine Veröffentlichung des Modells wird momentan zusammen mit F. Ahrendts erarbeitet. Im Folgenden wird die in diesem Projekt verbesserte Struktur des Modells eines thermoelektrischen Moduls im Detail vorgestellt.

Das thermoelektrische Modul besteht aus sechs Elementen, nämlich dem n-dotierten Halbleiter und dem p-dotierten Halbleiter, zwei Kupferschichten und zwei Keramikschichten. Jedes Element hat seinen eigenen Bilanzraum um eine Übersichtlichkeit zu gewährleisten. Für die Materialparameter der einzelnen Schichten werden überwiegend konstante Werte verwendet. Bei der Kupfer- und Keramikschicht sind diese temperaturunabhängig. Bei der Halbleiterschicht bestimmt sich der Wert aus dem Mittelwert der Segmenttemperatur, welcher in temperaturabhängige Materialparameterfunktionen eingesetzt wird. Die zwei Halbleitermodelle unterscheiden sich nur durch die Materialeigenschaften voneinander und werden deshalb gemeinsam vorgestellt. Eine Skizze aller thermischen Quellen, Senken und Widerstände des thermoelektrischen Moduls ist in Abbildung 22 zu sehen.

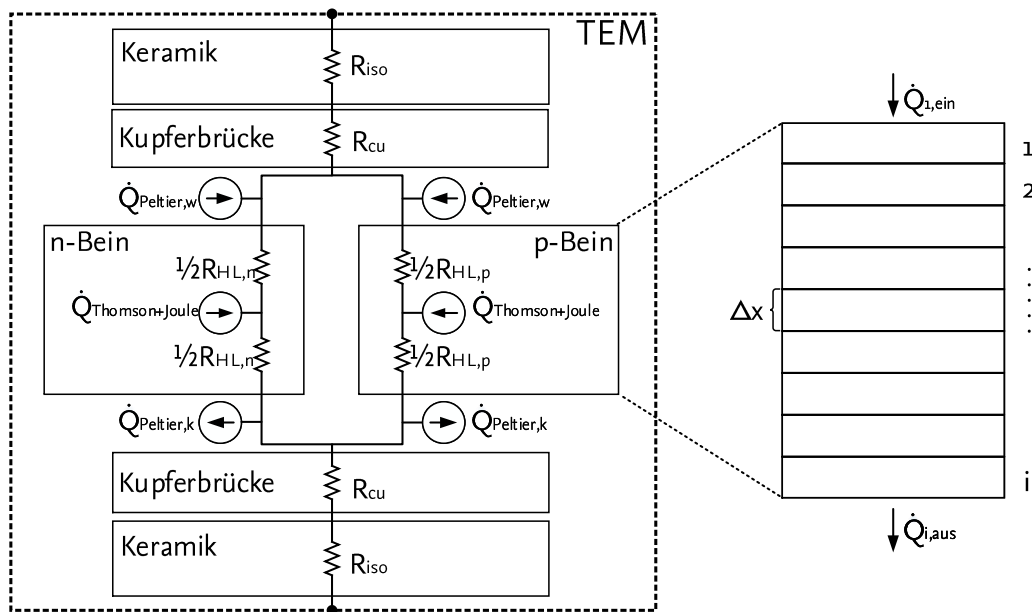


Abbildung 22: Skizze der thermischen Widerstände innerhalb des Wärmeübertragers. Durch eine Diskretisierung in Stromflussrichtung wird der Detailgrad der Modellierung deutlich gesteigert.

Das Halbleitermodell wird in Stromflussrichtung diskretisiert und enthält einen thermischen und einen elektrischen Bilanzraum, die miteinander wechselwirken. Die partielle Differentialgleichung der Leistungsbilanz ist aufgrund der Diskretisierung in ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen überführt. Die in ein Diskretisierungselement ein- und ausfließenden Wärmeströme ergeben sich aus der Fourrierschen Wärmeleitung zwischen den unterschiedlich warmen Segmenten.

$$\rho_{\text{Halbleiter}} \cdot c \cdot A \cdot \Delta x \frac{d\bar{T}_i}{dt} = \dot{Q}_{i,\text{Thomson}} + \dot{Q}_{i,\text{Joule}} + \dot{Q}_{i,\text{ein}} - \dot{Q}_{i,\text{aus}} \quad (17)$$

$$= -(\Delta\alpha)_i \cdot \bar{T}_i \cdot I + \frac{I^2}{A \cdot \sigma(\bar{T}_i)} \cdot \Delta x + \dot{Q}_{i,\text{ein}} - \dot{Q}_{i,\text{aus}} \quad (18)$$

Dabei stellt \bar{T}_i die Mitteltemperatur des jeweiligen Segments i der Länge Δx in Stromflussrichtung und der Fläche A dar.

$$\bar{T}_i = \frac{T_{i,\text{ein}} + T_{i,\text{aus}}}{2} \quad (19)$$

Für den Leiterabschnitt zwischen den beiden Diskretisierungsgrenzen ergibt sich Spannungsänderung durch die elektrischen Verluste und den Seebeck-Effekt. Multipliziert mit der Stromstärke ergibt sich aus der Spannungsgleichung eine elektrische Leistungsbilanz.

$$\Delta U_i \cdot I = \Delta U_{i,Seebeck} \cdot I - \Delta U_{i,Widerstand} \cdot I \quad (20)$$

$$= -\alpha \cdot I \cdot (\Delta T)_i - I^2 \cdot \frac{1}{A \cdot \sigma(\bar{T}_i)} \cdot \Delta x \quad (21)$$

Der Peltier-Effekt tritt an den Kontaktstellen zwischen Halbleiter und Kupfer auf. Er bestimmt sich aus der Differenz der Seebeck-Koeffizienten von Halbleiter und Kupfer und der Stromrichtung und wird innerhalb der Kupfermodelle berücksichtigt. Somit unterscheiden sich die beiden Kupfermodelle lediglich in der Richtung der auftretenden Peltier-Wärmen. Dies ist in Abbildung 22 durch die Richtung der Pfeile angedeutet.

$$m_{Kupfer} \cdot c_{Kupfer} \cdot \frac{d\bar{T}}{dt} = \pm \dot{Q}_{Peltier} + \dot{Q}_{Joule} + \dot{Q}_{ein} - \dot{Q}_{aus} \quad (22)$$

$$= \pm \alpha \cdot T \cdot I + \frac{I^2}{A_{quer} \cdot \sigma(\bar{T})} \cdot L_{Kupfer} + \dot{Q}_{ein} - \dot{Q}_{aus} \quad (23)$$

Dabei ist L_{Kupfer} die Länge der Kupferplatten und \bar{T} ist wie im Halbleitermodell definiert als mittlere Temperatur in der Schicht. Mit A_{quer} ist die Fläche quer zum Wärmestrom definiert. Aufgrund des geringen Seebeckkoeffizienten können die Thomson-Wärme und die Seebeck-Spannung in der thermischen Leistungsbilanz bzw. der nachstehenden elektrischen Leistungsbilanz vernachlässigt werden. Die Spannungsänderung im Kupfermodell ergibt sich aus den ohmschen Verlusten entlang des Leiterpfads.

$$(U_{ein} - U_{aus}) \cdot I = U_{Widerstand} \cdot I = -I^2 \cdot \frac{L_{Kupfer}}{A_{quer} \cdot \sigma} \quad (24)$$

Die Keramikschichten sind elektrische Isolatoren und besitzen deshalb nur thermische Anschlüsse. In dieser Schicht wird lediglich der thermischer Widerstand der Keramik modelliert.

$$m_{Keramik} \cdot c_{Keramik} \cdot \frac{d\bar{T}}{dt} = \dot{Q}_{ein} - \dot{Q}_{aus} \quad (25)$$

Das im vorigen Text beschriebene Modelica-Modell eines thermoelektrischen Moduls wird nun genutzt um unterschiedliche Arten von thermoelektrischen Wärmeübertragern zu modellieren. Diese werden unter Verwendung von Objekten der TIL-Bibliothek erweitert und miteinander kombiniert. Das Ziel bestand darin, für verschiedene Varianten von fluidseitigen Verschaltungen passende, vielseitige Wärmeübertragermodelle aufzustellen. Die grundsätzliche Verschaltung ist in Abbildung 23 skizziert.

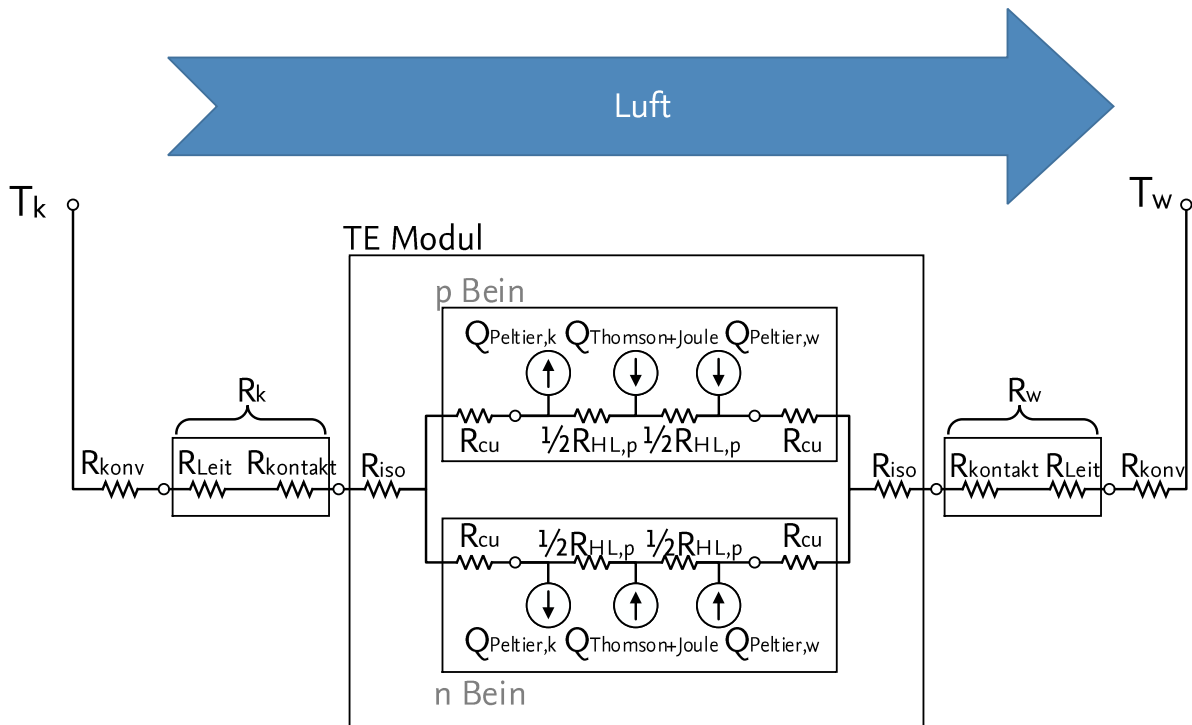


Abbildung 23: Skizze der thermischen Verschaltung des thermoelektrischen Wärmeübertragers

Es wurden Wärmeübertrager für die Wärmeübertragung zwischen zwei Gasen in Kreuzstrombauweise und Gegenstrombauweise aufgestellt. Die zwei Varianten sind in Abbildung 24 gegenübergestellt.

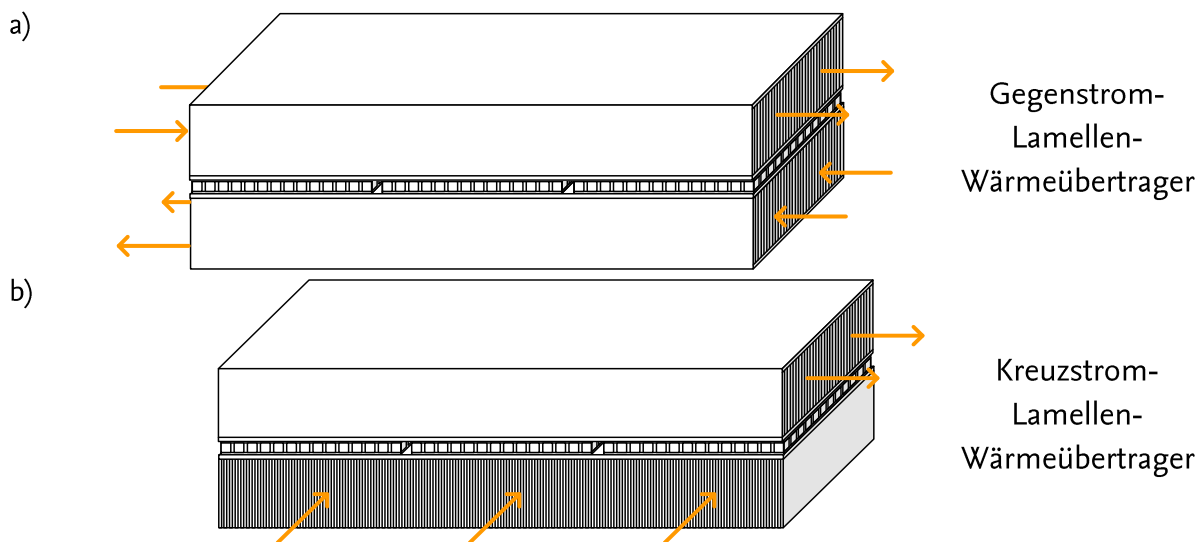


Abbildung 24: Modellierte TE-Wärmeübertragergeometrien.

Diese Art von Wärmeübertrager mit den benötigten flachen Geometrien war in der Modellbibliothek TIL nicht vorhanden und wurde deshalb im Rahmen dieses Projekts erstellt. Außerdem musste das Untermodell eines thermoelektrischen Moduls in diese Wärmeübertrager integriert werden, sowohl geometrisch als auch rechnerisch. Durch die Integration der TE-Module wurde also eine Art interne Wärmepumpe im Wärmeübertragermodell implementiert.

Mit einer Wärmeübertragergeometrie in Gegenstromanordnung kann eine geringere Temperaturdifferenz an jedem Modul als in Kreuzstromanordnung erzielt werden, da bei der Gegenstromanordnung die Steigung der Temperaturverläufe auf Warm- und Kaltseite der Module über der Geometrie in die gleiche Richtung weist (vergleiche Abbildung 8).

Zur Bestimmung der geometrischen Anordnung des thermoelektrischen Wärmeübertragers wurde eine Parameterstudie mit möglichen fluidseitigen Verschaltungen des Wärmeübertragers in Gegenstromanordnung untersucht. Bei 12 Einsatz findenden Module (siehe Abschnitt 4.2) werden die folgenden fluidseitigen Anordnungen betrachtet. Der Unterschied ist in Abbildung 25 skizziert.

Tabelle 4: Möglichkeiten der fluidseitigen Anordnung von 12 thermoelektrischen Modulen.

1 Reihe	à 12 Module
2 Reihen	à 6 Module
3 Reihen	à 4 Module
4 Reihen	à 3 Module
6 Reihen	à 2 Module
12 Reihen	à 1 Modul

Eine Reihe wird als eine Modulanreihung in Strömungsrichtung definiert. Anstelle von Reihen, kann eine Anordnung auch in mehreren Schichten erfolgen. Dabei stellt eine Schicht eine Ebene von thermoelektrischen Modulen und Wärmeübertragern dar. Der Unterschied besteht lediglich im Platzbedarf und kann unabhängig vom thermischen Verhalten gewählt werden.

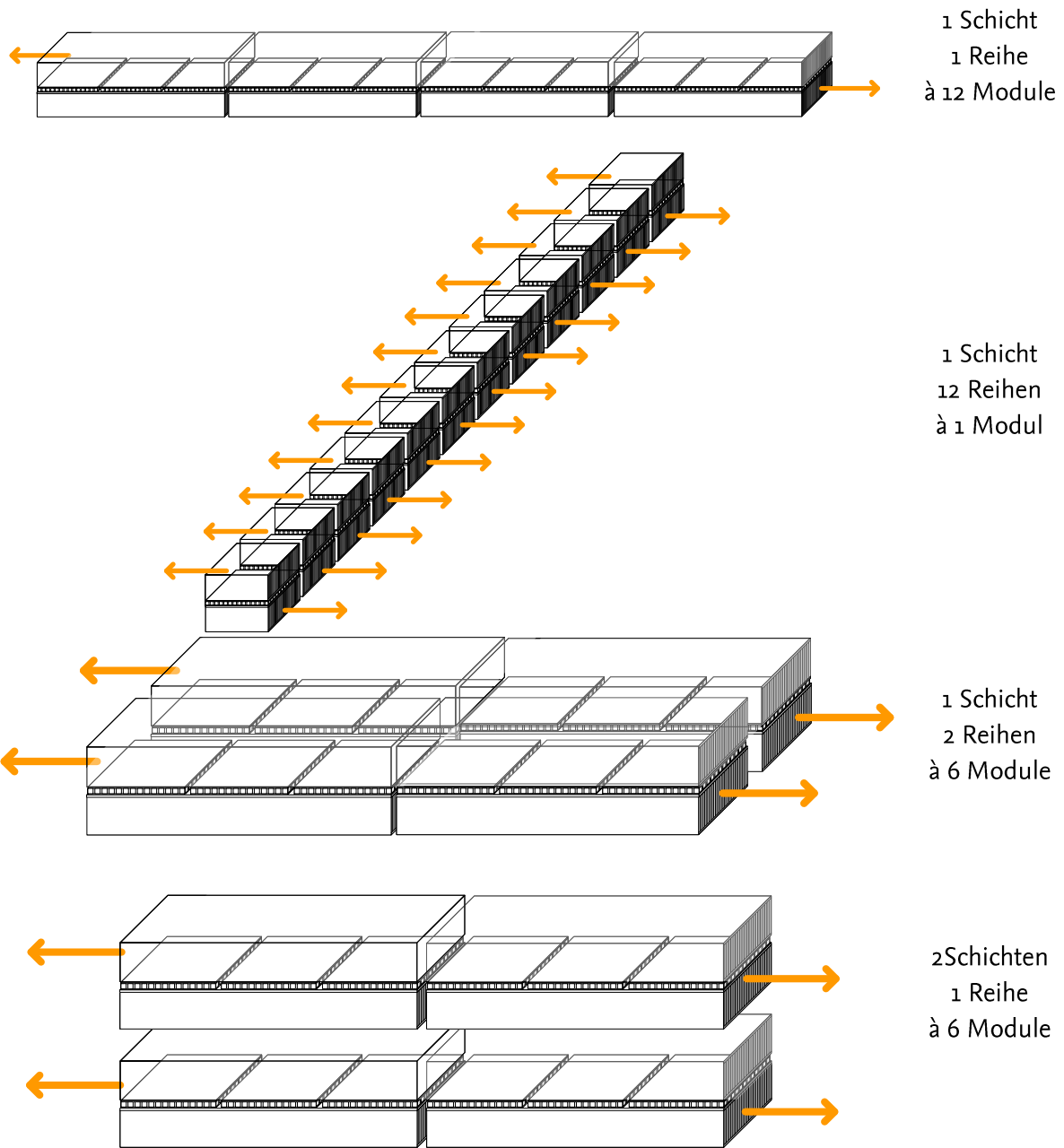


Abbildung 25: Skizze möglicher Anordnungen der thermoelektrischen Module im Wärmeübertrager.

Für die Parameterstudien des thermoelektrischen Wärmeübertragers wurde ein Simulationsmodell erstellt, welches den Wärmeübertrager mit gegebenen Eintrittsbedingungen umfasst. Dieses ist in Abbildung 26 dargestellt.

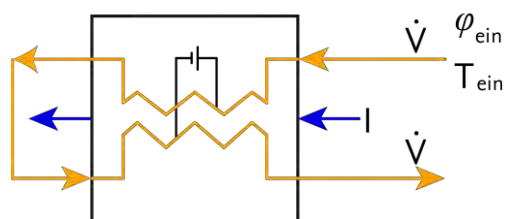


Abbildung 26: Skizze des Simulationsmodells für die vorgenommenen Parameterstudien am thermoelektrischen Wärmeübertrager.

Die Prozessluft wird nach Durchlaufen der kalten Wärmeübertragerseite umgelenkt und strömt an der warmen Wärmeübertragerseite entlang. Die Eintrittsbedingungen der Luft sind $T_{\text{ein}}=50\text{ °C}$ und $\varphi_{\text{ein}}=100\text{ \%}$ Luftfeuchtigkeit. Es wird ein Luftvolumenstrom von $200\text{ m}^3/\text{h}$ eingestellt, der sich auf die Anzahl Reihen aufteilt.

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse der in Tabelle 4 aufgelisteten Möglichkeiten der geometrischen Anordnung der TE-Module miteinander verglichen. In den Wärmeübertragermodellen ist jedem thermoelektrischen Modul die gleiche Wärmeübertragerfläche zugeordnet worden.

In Abbildung 27 sind die Kälteleistung und der thermoelektrische COP für die in Tabelle 4 aufgelisteten Anordnungen aufgetragen. Durch die thermische Parallelschaltung aller 12 Module (12 Reihen à 1 Modul) ist im Vergleich zu den restlichen Anordnungen eine deutlich geringere Kälteleistung erreichbar. Die Anordnungen mit 2, 3 und 4 Reihen liefern mit weniger als 1 % Abweichung zueinander die höchsten Kälteleistungen. Eine Reihenschaltung aller 12 Module und 6 Reihen à 2 Module liefern eine um etwa 2 bis 3 % vom Maximum abweichende Kälteleistung

So lange folglich nicht alle Module thermisch parallel (12 Reihen à 1 Modul) angeordnet werden, ist eine ähnliche Kälteleistung erreichbar und damit ein gleichartiges Verhalten des Wärmeübertragers zu erwarten. Dies kann mit der Temperaturverteilung über der Wärmeübertragergeometrie in Strömungsrichtung begründet werden (vergleiche Abbildung 8). Die mittlere Modultemperatur ändert sich umso stärker, je mehr Module thermisch in Reihe geschaltet sind. Je höher die an einem Modul anliegende Temperaturdifferenz ist, desto geringer ist der thermoelektrische COP.

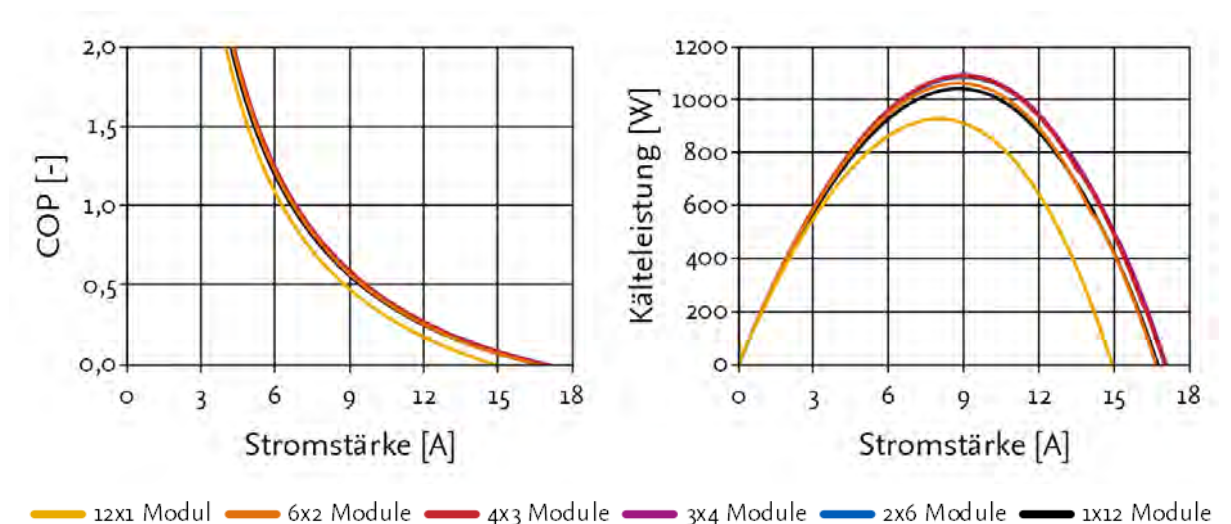


Abbildung 27: Variation der Anordnung der thermoelektrischen Module im Wärmeübertrager.

Für die elektrische Verschaltung von TE-Modulen gibt es verschiedene Möglichkeiten, von denen die wichtigsten in Abbildung 28 dargestellt sind. Die einfachste von allen ist eine Reihenschaltung aller TE-Module (Abbildung 28, Nr. 1). Vorteilhaft an dieser Verschaltung ist die resultierende geringe

Stromstärke, welche in der elektrischen Verkabelung fließen muss. Dieses ist aus Sicherheitsaspekten günstig, gleichzeitig aber auch von Nachteil, da die Ausgangsspannung sehr hoch sein muss. Andererseits wird die am Ausgang gegenüber der Erde anliegende Spannungsdifferenz groß. Ungleichmäßige Spannungsänderungen über den einzelnen Modulen wirken sich nicht weiter aus, allerdings kann bereits ein defektes Modul zum Ausfall des gesamten Wärmeübertragers führen.

Die zweite typische Verschaltungsart ist die Parallelschaltung aller TE-Module (Abbildung 28, Nr. 2). Von Nachteil können dabei die auftretenden höheren Stromstärken sein. Vorteil ist die niedrige Ausgangsspannung am Netzteil. Ungleichförmige Spannungsverteilung über den Modulen sind im Gegensatz zur Reihenschaltung problematisch, da es zu Rückflüssen in einzelnen Ästen der Verschaltung führen kann. Vorteilhaft an der Parallelschaltung ist deren Zuverlässigkeit. Fällt eine Reihe Module aus, bleiben die anderen Reihen davon unberührt, ohne dass diese Gefahr laufen, von einem höheren Strom durchflossen zu werden. Ein zu hoher Strom kann zum Leistungsabfall oder im schlimmsten Fall zur Zerstörung des Moduls führen.

Nr. 3 und 4 in Abbildung 28 stellen Möglichkeiten dar, wie eine mögliche Leistungssteuerung der thermoelektrischen Module im Wärmeübertrager aussehen kann, bei der man einzelne oder mehrere Reihen zu- oder abschaltbar gestaltet.

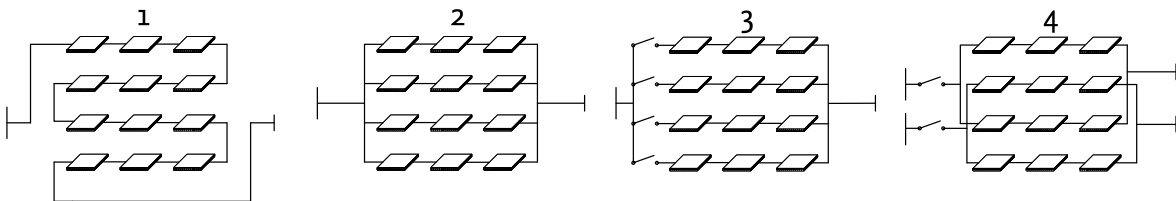


Abbildung 28: Elektrische Verschaltungsvarianten von TE-Modulen eines TE-Wärmeübertragers

Die günstigsten Varianten sind die in Abbildung 28 dargestellten Parallelschaltungen mehrerer Reihen (Nr. 2 und 3), mit oder ohne Schalter für die einzelnen Reihen. Sie stellen einen guten Kompromiss zwischen Redundanz und Betriebssicherheit dar.

In den weiteren Untersuchungen wird jedoch eine reine Parallelschaltung zu Grunde gelegt. Für die durchgeführten Messungen war die Redundanz gegenüber der Betriebssicherheit von überragender Bedeutung. Die Leistungsanpassung der Module erfolgte durch das Haushaltsnetz gespeiste Netzteile, in denen der Leistungsfluss durch eine gesteuerte Gleichrichterschaltung stufenlos anpasst wurde [KSW13].

5.3 Modellvalidierung

5.3.1 Kondensationstrockner

In Abbildung 29 ist das Simulationsmodell eines Kondensationstrockners dargestellt.

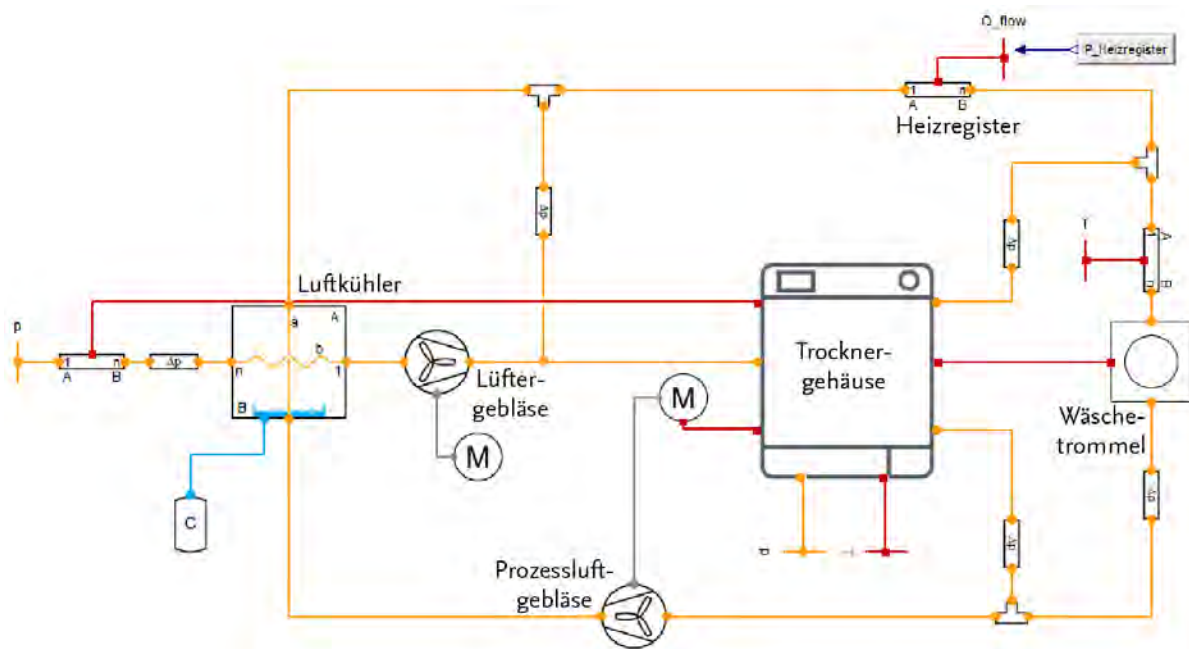


Abbildung 29: Simulationsmodell eines Kondensationstrockners.

Die Leistung des Motors, welcher das Prozessluftgebläse, das Lüftergebläse und die Trommel antreibt, verändert sich über die Trockendauer um etwa 5 %. Sie wird deshalb im Modell als konstant behandelt und der Mittelwert von 170 W verwendet. Die Heizleistung wird aus einer typischen Messung zur Verfügung gestellt. Da keine detaillierten Informationen zum Prozessluftgebläse und zum Lüftergebläse vorhanden sind, wird für beide Gebläse ein Modell ausgewählt, das bei gemessenem Druckhub zwischen 300 und 400 Pa einen Volumenstrom zwischen 50 und 100 m³/h bereitstellt.

Der auftretende Volumenstrom wurde dabei über den Massenstrom und die am Gebläseort vorliegende Dichte ρ berechnet. Diese Werte wurden wiederum aus Messdaten ermittelt. Der Massenstrom berechnet sich über den Quotienten aus Leistung des Heizregisters P_{HR} und der Enthalpiedifferenz vor und nach dem Heizregister.

$$\dot{V} = \dot{m} \cdot \rho = \frac{P_{HR}}{\Delta h(T, \varphi)} \cdot \rho(T, \varphi) \quad (26)$$

Die Enthalpien und die Dichte können über gemessene Feuchte und Temperatur bestimmt werden. Die im Modell verwendete Gebläsekennlinie ist mithilfe der Affinitätsgesetze aus den Kenndaten des Radialgebläses R2E120-AR77-05 der Firma ebm-papst erstellt.

In Tabelle 5 sind Trockendauer und Energieverbrauch von Messung und Simulation gegenübergestellt. Die Angaben der Messung sind dabei Mittelwerte der gemessenen Trocknungszyklen. Die Abweichung der Werte zwischen Simulation und Messung beträgt weniger als 2 %.

Tabelle 5: Vergleich der Trocknerkenndaten zwischen Messung und Simulation

	Messung	Simulation
Trockendauer [min]	124	125
Energieverbrauch [kWh]	4,13	4,18

Im Referenz Trockner hält der Trommelmotor in diskreten Zeitabständen an, um für wenige Sekunden entgegen der normalen Rotationsrichtung zu drehen. Das sogenannte „Reversieren“ bezweckt ein Auflockern der Wäsche und gewährleistet eine bessere Wäscheverteilung. Der thermische Einfluss des Reversierens auf den Gesamtprozess ist jedoch gering, weshalb das Reversieren im Simulationsmodell nicht berücksichtigt wird.

Abbildung 30 stellt die Lufttemperaturen vor und nach der Wäschetrommel von Messung und Simulation gegenüber. Da die Luft wenige Zentimeter hinter dem Heizregister in die Wäschetrommel geleitet wird, bildet sich keine homogene Luftströmung aus und kann je nach Messposition stark variieren. Um diesen Effekt auf die Temperaturmessung einzugrenzen, sind vor die Temperaturmessstellen Blenden gesetzt. Hierdurch kann es jedoch auch zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Temperatur kommen.

Während die Abweichung zwischen gemessener und modellierter Trommelaustrittstemperatur innerhalb der Messunsicherheit liegt, ist die Abweichung am Trommeleintritt größer als die Messunsicherheit. Diese kann mit den genannten Schwierigkeiten bei der Temperaturmessung erklärt werden. Der Einfluss der Heizleistung auf die Trommeleintrittstemperatur ist jedoch in beiden Verläufen klar erkennbar.

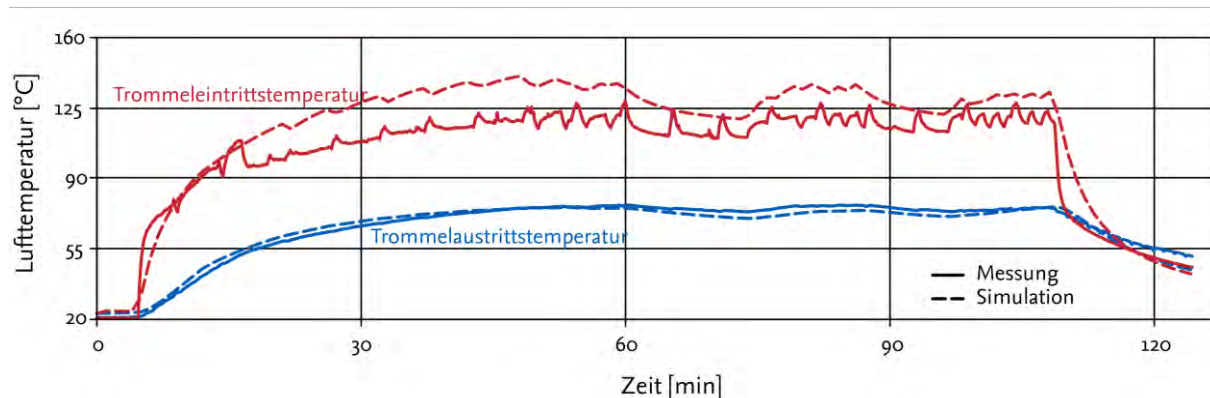


Abbildung 30: Validierung der Lufttemperatur am Trommeleintritt und -austritt. Die Trommeleintrittstemperatur ist aufgrund des inhomogenen Strömungsverhaltens stark abhängig von der genauen Messposition.

Neben dem Gebläsemodell findet auch der Luftkühler im thermoelektrischen Wäschetrockner Verwendung und wird deshalb im Folgenden genauer betrachtet. Die Umgebungsluft am Ein- und Austritt des Luftkühlers wird im Rahmen der Messunsicherheit durch das Simulationsmodell wiedergegeben. Die Verläufe sind in Abbildung 31 gegenübergestellt.

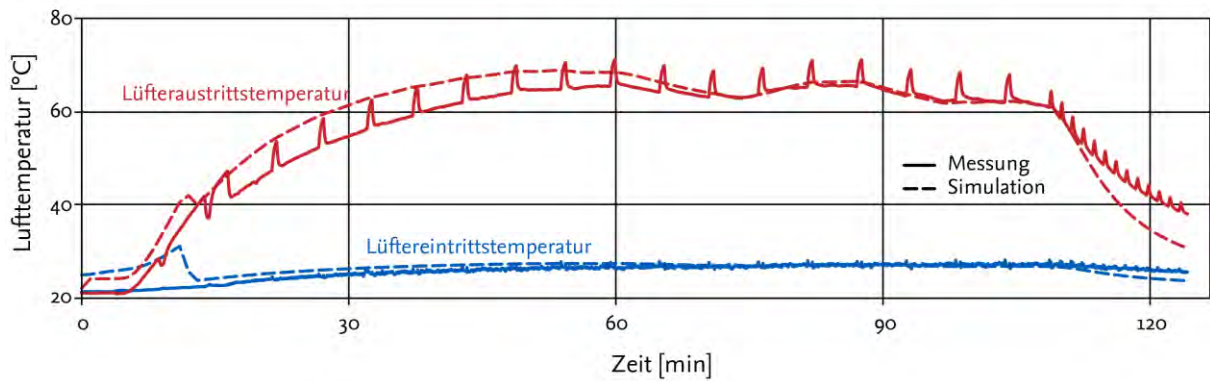


Abbildung 31: Validierung der Umgebungslufttemperatur am Lüftereintritt und -austritt. Der Einfluss des Reversierens wird im Simulationsmodell nicht berücksichtigt.

Die Ausschläge im Verlauf der Lüfteraustrittstemperatur sind bei der Messung auf das Reversieren der Trommel zurückzuführen.

5.3.2 Thermoelektrischer Wäschetrockner

In Abbildung 32 ist das Simulationsmodell des Prototypensystems dargestellt. Die Komponenten Wäschetrommel, Luftkühler und Prozessluftgebläse sind aus dem validierten Kondensationstrocknermodell übernommen.

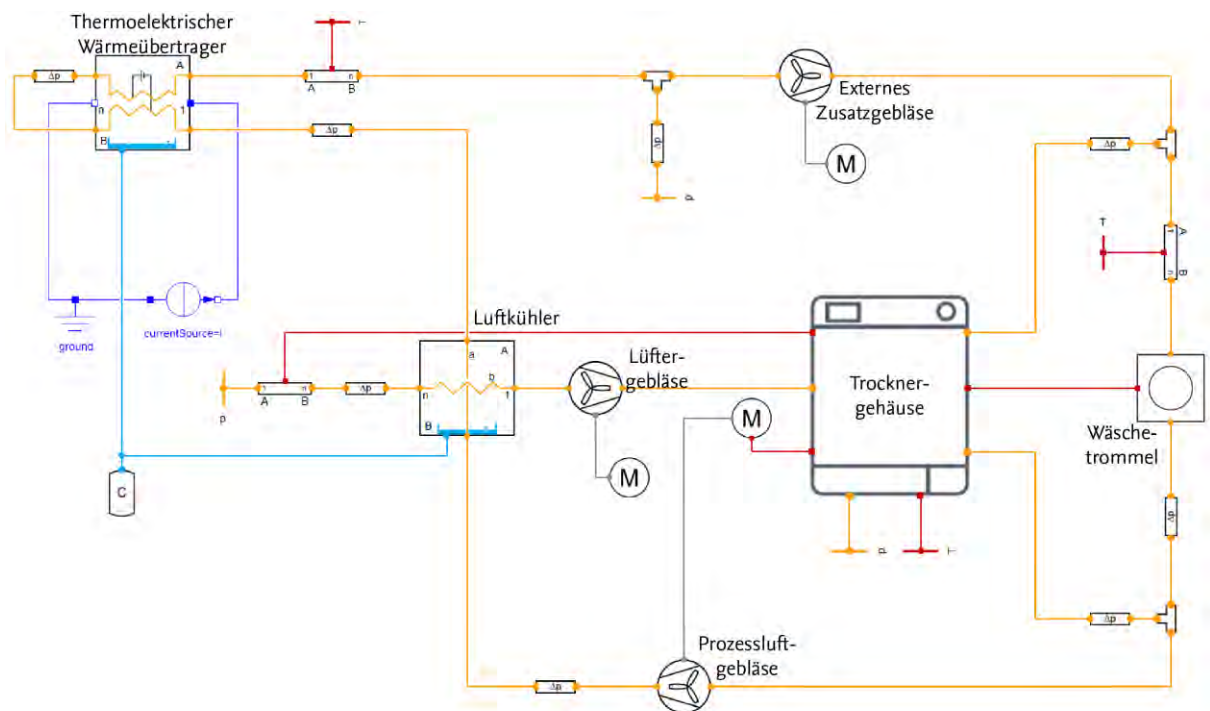


Abbildung 32: Simulationsmodell des Prototypenprüfstands eines thermoelektrischen Wäschetrockners.

Der thermoelektrische Wärmeübertrager wird so parametrisiert, dass die Wärmeübertragerflächen mit denen des gebauten Wärmeübertragers identisch sind. Die thermischen Massen von Warm- und Kaltseite des Wärmeübertragers werden über die Wandstärken eingestellt. Da die typischen Wärmeübertragungsbeziehungen auf anderen Geometrien basieren, werden für die Modellierung der Konvektion konstante Wärmeübergangszahlen verwendet. Die verwendeten Wärmeübergangszahlen

sind typische Werte für Wärmeübertragung bei erzwungener Konvektion [VDI13]. Die Wärmeabgabe an die Umgebung wird über eine zusätzliche thermische Verbindung zur Umgebung modelliert. Das zusätzliche Prozessluftgebläse wird mit dem gleichen Parametersatz wie das verbaute Gebläse modelliert. Die Drehzahl wird so angepasst, dass bei vorliegendem Druckverlust der gemessene Volumenstrom von etwa 180 bis 160 m³/h vorliegt. Die Erwärmung der Luft im Gebläse aufgrund der Dissipation wird berücksichtigt. Die Parameter des validierten Modells sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Die Luftleckagen und die Werte für die thermischen Widerstände R_k , R_h und die Werte der Wärmeübertragungskoeffizienten $\alpha_{TE,k}$, $\alpha_{TE,w}$ sind an die Messergebnisse angepasst.

Tabelle 6: Parameter des Validierungsmodells eines thermoelektrischen Wäschetrockners.

Trommel		
Wärmeübertragungskoeffizient der Wäsche	α_w	230 W/(m ² K)
Prozessluftgebläse		
Drehzahl internes Prozessluftgebläse	n _{IPL}	39 Hz
Drehzahl externes Prozessluftgebläse	n _{EPL}	51 Hz
Thermoelektrischer Wärmeübertrager		
Wärmeübertragerfläche Kaltseite	$A_{TE,k}$	3,5 m ²
Wärmeübertragerfläche Warmseite	$A_{TE,w}$	7,0 m ²
Wärmeübertragungskoeffizient Kaltseite	$\alpha_{TE,k}$	50 W/(m ² K)
Wärmeübertragungskoeffizient Warmseite	$\alpha_{TE,w}$	100 W/(m ² K)
Therm. Widerstand Wand und Kontakt (TE-Kaltseite)	R_k	1e-3 K/W
Therm. Widerstand Wand und Kontakt (TE-Warmseite)	R_h	1,15e-2 K/W
Anzahl TE-Module	n	12
Lamellenwirkungsgrad	$\eta_{fin,TE}$	0,5

In Tabelle 7 sind charakteristische Werte des angefitteten Simulationsmodells mit den über mehrere Trockengänge gemittelten Messdaten für die drei Betriebsweisen (vergleiche Tabelle 1) gegenübergestellt. Die Messabweichung bei der jeweiligen Betriebsweise zwischen den durchgeführten Trockengängen ist mit aufgeführt.

Tabelle 7: Charakteristische Werte des thermoelektrischen Wäschetrockners.

Modulstromstärke [A]	Messung			Angefittete Simulation		
	6	7	8	6	7	8
Trockendauer [min]	252,13±3,3	229,51±5,70	194,94±3,02	262	220	191
Energieverbrauch (inkl. Zusatzgebläse) [kWh]	5,931±0,082	6,466±0,161	6,570±0,128	6,15	6,28	6,49
Energieverbrauch (TE + Trommelmotor) [kWh]	3,993±0,061	4,719±0,122	5,115±0,128	4,05	4,52	5,00
Kondenswasser Luftkühler [kg]	0,93±0,08	1,14±0,07	1,31±0,12	0,98	1,11	1,22
Kondenswasser TEWÜ [kg]	0,87±0,14	0,65±0,05	0,52±0,10	0,88	0,69	0,44

Die Wassermasse, welche im Luftkühler bzw. im thermoelektrischen Wärmeübertrager während eines Trockengangs auskondensiert, wird mit der Simulation im Bereich der Messabweichung erreicht.

Zwar liegen die Abweichungen beim Energieverbrauch und Trockendauer höher als die gemessenen Abweichungen, sind jedoch stets geringer als 5 %.

Zur weiteren Validierung wird der zeitliche Verlauf der Lufttemperaturen an Trommeleintritt, Trommelaustritt und Austritt der Kaltseite des TE-Wärmeübertragers von Messung und Simulation der drei Betriebsweisen in Abbildung 33 auf der nächsten Seite aufgetragen. Es wird hierbei jeweils eine repräsentative Messung zu Grunde gelegt.

Gegen Ende der Messung nimmt die Prozesslufttemperatur im gesamten Kreislauf in allen drei Betriebsweisen stark ab, analog zum Kondensationstrockner. In diesem Abschnitt wird den thermoelektrischen Modulen keine Leistung mehr zugeführt. Somit wird lediglich Wärme über den Luftkühler an die Umgebung abgeführt. Dies dient der Abkühlung der Wäsche vor der Entnahme. Der Abschaltzeitpunkt der Module und das Ende des Trockengangs wird von der Trocknerelektronik signalisiert.

Die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Temperaturen liegen für alle drei Betriebsweisen fast immer unter 2,5 °C. Lediglich zu Beginn und kurz vor Ende des Trockengangs steigt die Abweichung über diesen Wert bis auf knapp 4 °C an.

Aus den dargestellten Daten kann somit festgestellt werden, dass das Simulationsmodell in der Lage ist, das physikalische Verhalten des Prototyps eines thermoelektrischen Wäschetrockners mit einer hinreichenden Genauigkeit wiederzugeben. Mithilfe des validierten Simulationsmodells eines thermoelektrischen Wäschetrockners können im Folgenden detaillierte Betriebsstrategien entwickelt und simuliert werden.

Während der Messung und der Kalibrierung des Modells an die Messdaten konnten einige wichtige Erkenntnisse gewonnen werden:

- Eine auf die Komponenten abgestimmte Auslegung des Druckverlaufs ist entscheidend für eine möglichst geringe Luftleckage während der Trocknung. Durch das Einbringen eines zusätzlichen Gebläses konnte zwar der Volumenstrom erhöht werden. Durch die Veränderung des Druckniveaus insbesondere über der Wäschetrommel ist jedoch auch die Luftleckage deutlich erhöht worden. Für die Auslegung von künftigen thermoelektrischen Serientrocknern ist folglich eine vom Druckverlauf abhängige Abdichtung der Komponenten zur Umgebung vorzusehen.
- In den Modellen wurde anfangs ein höherer Wärmestrom im thermoelektrischen Wärmeübertrager erzielt als er in Messauswertungen gewonnen wurde. Durch Modellieren eines thermischen Kurzschlusses im Wärmeübertrager konnte diese Differenz minimiert werden. Dieser thermische Kurzschluss entstand durch die Verschraubung der warmseitigen Kühlkörper mit den Kupferplatten. Mittels dieser Verschraubung wurden die thermoelektrischen Module zwischen den beiden Wärmeübertragerstrukturen verklemmt und eine thermische Verbindung gewährleistet (vergleiche Kapitel 4.2). Eine Reduzierung des thermischen Kurzschlusses kann durch die Verwendung von Unterlegscheiben aus einem schlechten Wärmeleiter wie bspw. Plastik erzielt werden.

- Zwischen dem Austritt des TE-Wärmeübertragers und Trommeleintritt wurde im Vergleich zum Referenzsystem eines Kondensationstrockners ein stärkerer Verlustwärmestrom gemessen. Trotz Verwendung von flexiblem Isolationsrohr zur Verbindung der zusätzlichen Komponenten im Prozessluftkreislauf trat ein erhöhter Wärmestrom an die Umgebung auf. In einer künftigen Serienfertigung ist jedoch von einer starken Reduzierung der Abwärme auszugehen, da die komplette Prozessführung im Trocknergehäuse untergebracht wird. Die Lufttemperatur im Gehäuse wird im Laufe des Prozesses ansteigen und potentielle Verlustwärmeströme verringern.

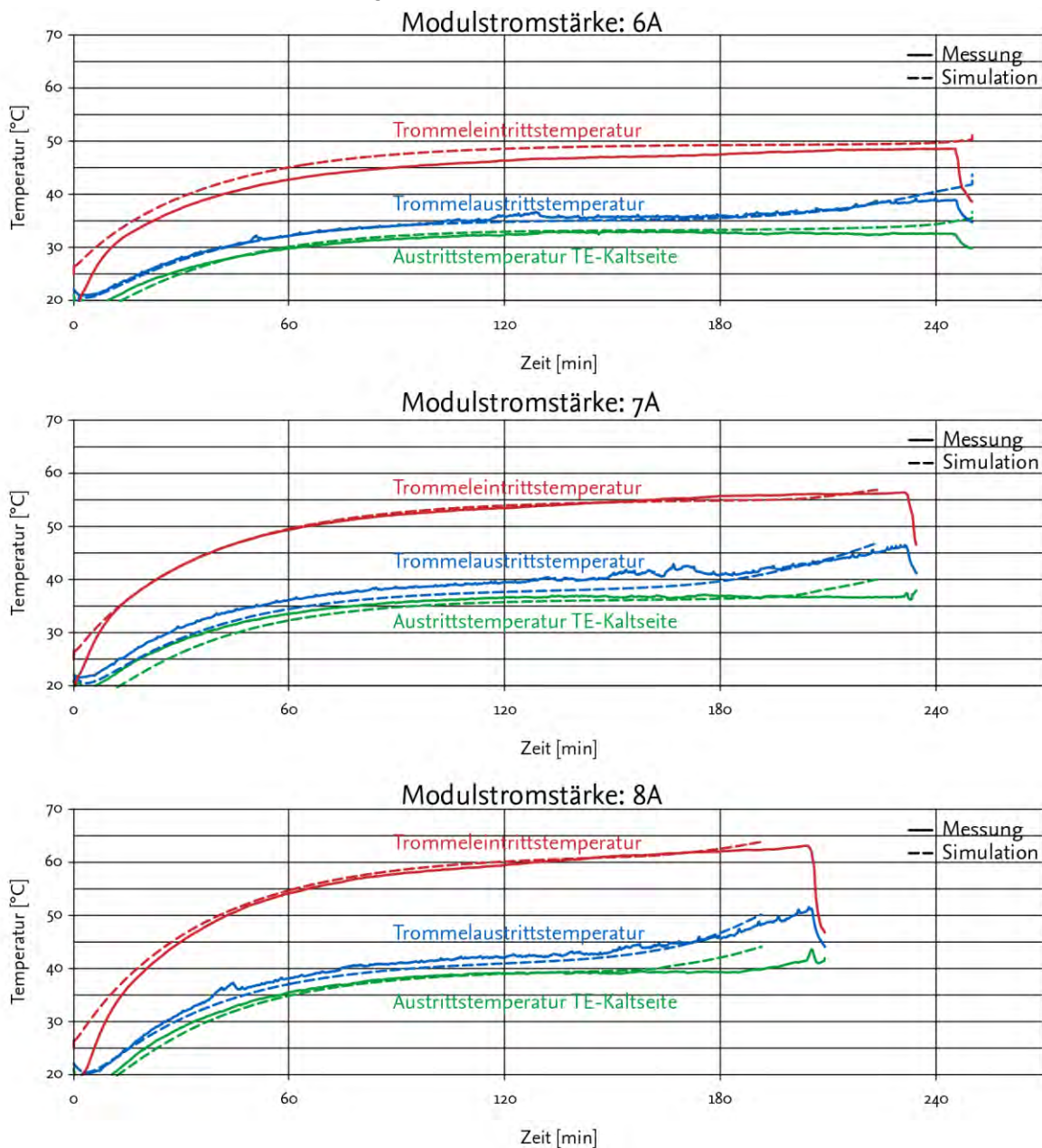


Abbildung 33: Gegenüberstellung von Prozesslufttemperaturen charakteristischer Zustandspunkte von Messung und Simulation über der Zeit.

6 Systemanalyse eines thermoelektrischen Wäschetrockners

Um eine hohe Trocknungseffizienz erreichen zu können, muss nicht nur das System optimal abgestimmt sein, es muss zudem auch eine optimale Betriebsweise gefunden werden, welche ein Minimum an Energieverbrauch pro Trocknungsgang ermöglicht. Zeitlich variable Stellgrößen, die den Prozess wesentlich beeinflussen sind beispielsweise die Drehzahl von Prozessluft- und Kühlergebläse und die elektrische Eingangsleistung der thermoelektrischen Module. Um dieses Potenzial abschätzen und nutzen zu können, werden transiente Optimierungsrechnungen durchgeführt, wobei validierte Komponentenmodelle für den thermoelektrischen Wäschetrockner verwendet werden. Verschiedene Betriebsstrategien werden analysiert, wobei als Randbedingungen unterschiedliche relevante Trocknungsprogramme zugrunde gelegt werden.

Auf mehreren Ebenen, wird die alternative Technologie mit den konventionellen Systemen Kondensationstrockner und Wärmepumpentrockner verglichen und die unterschiedlichen Merkmale und Potenziale bewertet. Neben der energetischen Effizienz sind vor allem die Wirtschaftlichkeit und die thermische Belastung der Wäsche Gegenstand der vergleichenden Betrachtungen.

Bevor jedoch für das thermoelektrische Wäschetrocknersystem Optimierungsrechnungen durchgeführt werden, ist es notwendig zunächst Einflussfaktoren auf das dynamische Trocknungsverhalten zu identifizieren.

6.1 Identifikation von Einflussfaktoren auf das dynamische Trocknungsverhalten

Bevor eine optimale Betriebsweise bezüglich gewisser Zielgrößen gewonnen werden kann, ist es notwendig die Einflussfaktoren auf das dynamische Trocknungsverhalten eines thermoelektrischen Wäschetrockners zu identifizieren.

Wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, beeinflusst die an den Modulen vorliegende Temperaturdifferenz maßgeblich das Betriebsverhalten. Diese Temperaturdifferenz kann zum einen mittels der Thermoelektrik über die Stromstärke und die Anzahl der Module verändert werden. Es kann jedoch auch über die Wärmeübertragung des Luftkühlers und des thermoelektrischen Wärmeübertragers Einfluss auf die Modultemperaturdifferenz genommen werden. Dies ist beispielsweise über den umlaufenden Volumenstrom, die Wärmeübertragungskoeffizienten oder die thermischen Kontaktwiderstände zwischen Modul und Kühlkörper möglich.

Ein weiterer Einflussfaktor ist der Temperaturverlauf der Luft im Kreislauf über die Zeit. Je höher die Temperatur ist, desto mehr Feuchtigkeit kann diese aufnehmen und desto höhere Trocknungsgeschwindigkeiten sind erreichbar.

6.2 Parameterstudien

6.2.1 Parameterstudie eines thermoelektrischen Wärmeübertragers

Im Folgenden wird die Sensitivität der Einflussfaktoren auf die Wärmeübertragung in einer Parameterstudie unter stationären Randbedingungen untersucht. Als Simulationsmodell wird das in

Abbildung 26 vorgestellte Modell mit gleichen Eintrittsbedingungen verwendet. Die weiteren Modellparameter sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Modellparameter für Parameterstudie.

Luftseitige Wärmeübertragerfläche zur TE-Kaltseite	$A_{PL,TE,k}$	3,5 m ²
Luftseitige Wärmeübertragerfläche zur TE-Warmseite	$A_{PL,TE,w}$	7 m ²
Wärmeübertragungskoeffizient zur TE-Kaltseite	$\alpha_{TE,k}$	50 W/(m ² K)
Wärmeübertragungskoeffizient zur TE-Warmseite	$\alpha_{TE,w}$	100 W/(m ² K)
Therm. Widerstand von Wand und Kontakt (TE-Kaltseite)	R_k	1e-3 K/W
Therm. Widerstand von Wand und Kontakt (TE-Warmseite)	R_w	1e-3 K/W
Anzahl TE-Module	n	12
Lamellenwirkungsgrad	$\eta_{fin,TE}$	0,5
Luftvolumenstrom	\dot{V}	200 m ³ /h

In Abbildung 34 werden die Wärmeübertragungskoeffizienten der Warm- und Kaltseite variiert.

— orange $\alpha_{TE,k}=50/\alpha_{TE,w}=100$ — gelb $\alpha_{TE,k}=25$ — rot $\alpha_{TE,k}=75$ — lila $\alpha_{TE,w}=80$ — blau $\alpha_{TE,w}=120$

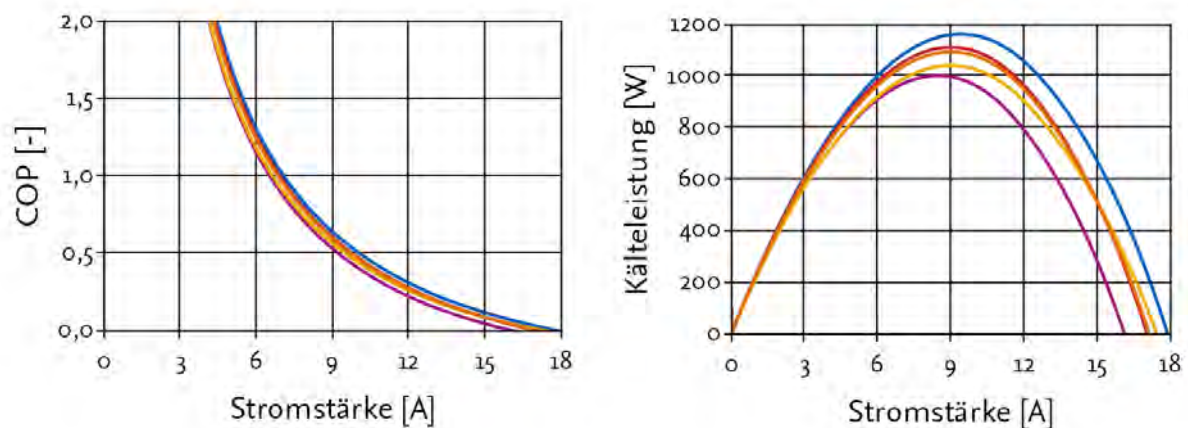


Abbildung 34: Variation der Wärmeübertragungskoeffizienten eines thermoelektrischen Wärmeübertragers.

Die orange Kurve stellt die Standardeinstellung dar. Die Verringerung des Wärmeübertragungskoeffizienten der Kaltseite um 50 % reduziert die Kälteleistung weniger als 5 % im Vergleich zur Grundeinstellung. Die Erhöhung dieses Wertes um 50 % ergibt eine Steigerung der Kälteleistung von weniger als 2 %. Die Variation des Wärmeübertragungskoeffizienten der Warmseite hat einen etwas größeren Einfluss auf die Kälteleistung. Wird dieser um 20 % verringert, nimmt die Kälteleistung um maximal 10 % ab. Wird diese um 20 % erhöht, nimmt die Kälteleistung um bis zu 6 % zu. Für beide Variationen verändert sich der thermoelektrische COP nur geringfügig. Somit kann der Einfluss beider Wärmeübertragungskoeffizienten in einem technisch realisierbaren Bereich auf das Verhalten des thermoelektrischen Wärmeübertragers als gering eingestuft werden. In folgenden Simulationen wird für die Wärmeübertragungskoeffizienten die in Tabelle 8 angegebene Grundeinstellung beibehalten.

In Abbildung 35 ist die Variation des Luftvolumenstroms dargestellt.

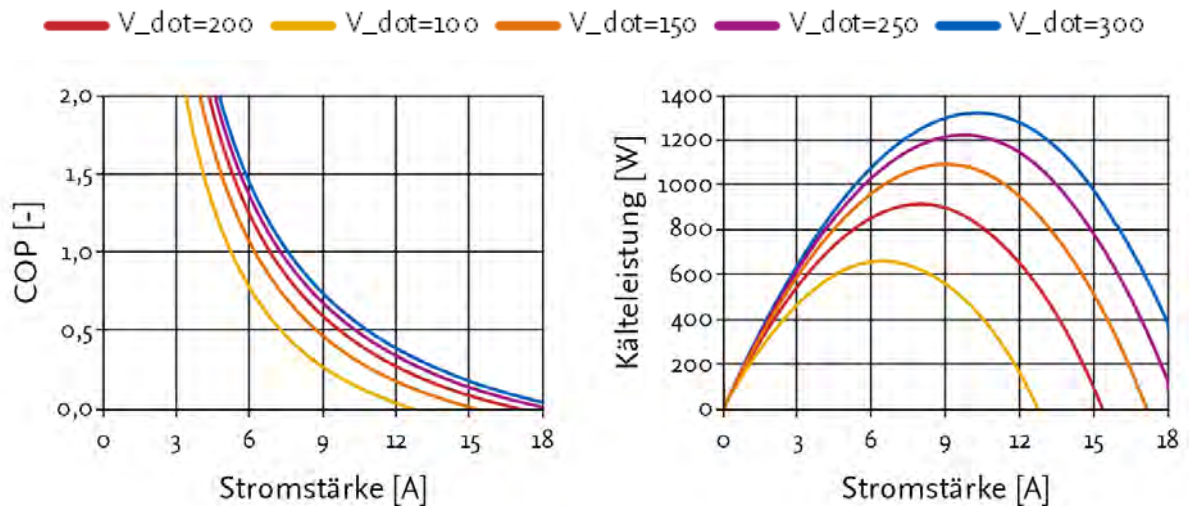


Abbildung 35: Variation des Luftvolumenstroms durch einen thermoelektrischen Wärmeübertrager.

Die rote Kurve stellt die Standardeinstellung dar. Bei einer Halbierung des Luftvolumenstroms auf 100 m³/h verringert sich die maximal erzielbare Kälteleistung um 40 %. Steigert man den Prozessluftvolumenstrom um 50 %, so erhöht sich die maximal erzielbare Kälteleistung um rund 20 %. Eine weitere Erhöhung des Volumenstroms vom Standardwert bewirkt zwar weiterhin eine höhere Kälteleistung. Die Steigerung des thermoelektrischen COPs beträgt bei einer Erhöhung des Volumenstroms um 50 % bis zu 20 %. Weiterhin ist der Maximalwert der Kälteleistung bei höheren Volumenströmen zwar größer, er liegt jedoch auch bei einer höheren Stromstärke vor. Der COP des jeweiligen Maximalwerts nimmt sogar mit ansteigendem Volumenstrom leicht ab. Die Werte der maximalen Kälteleistung sind zur Übersicht in Tabelle 9 aufgetragen.

Tabelle 9: Charakteristische Werte bei maximaler Kälteleistung unterschiedlicher Volumenströme.

Volumenstrom [m ³ /h]	Maximale Kälteleistung [W]	Stromstärke bei max. Kälteleistung [A]	COP bei max. Kälteleistung [-]
100	663	6,43	0,67
150	917	7,97	0,62
200	1095	8,99	0,60
250	1225	9,73	0,58
300	1324	10,26	0,57

Es kann deshalb ausgesagt werden, dass der Prozessluftvolumenstrom einen hohen Einfluss auf das Verhalten des thermoelektrischen Wärmeübertragers hat. Bei einer ganzheitlichen Betrachtung des Wäschetrockners bewirkt allerdings eine Erhöhung des Volumenstroms auch eine Erhöhung der Druckverluste. Die damit einhergehende Erhöhung der elektrischen Gebläseleistung kann sich schnell stärker auf die Energieeffizienz auswirken als der aus der höheren Kälteleistung resultierende gesteigerte Massenstrom des Kondenswassers. Die genaue Einstellung des Volumenstroms muss deshalb am jeweils vorliegenden Gesamtsystem vorgenommen werden.

Im der folgenden Abbildung 36 werden die thermischen Widerstände aufgrund der Kontaktierung und Wärmeleitung auf der Kaltseite des Wärmeübertragers variiert. Dabei sind Werte gewählt, die den technisch realisierbaren Bereich umfassen.

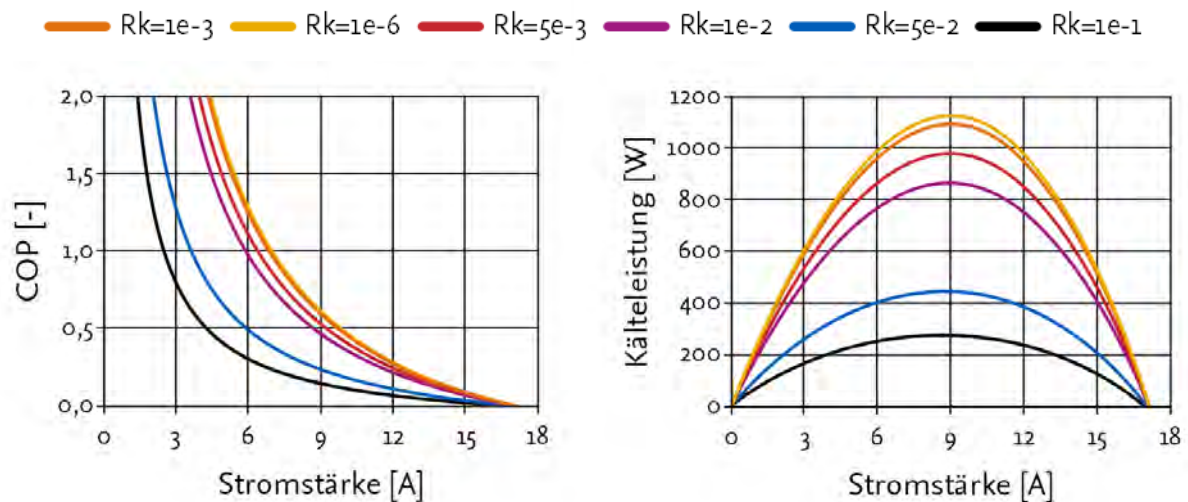


Abbildung 36: Variation des thermischen Widerstands auf der Kaltseite eines thermoelektrischen Wärmeübertragers.

Die orange Kurve gibt jeweils die Standardeinstellung an. Eine Erhöhung des kaltseitigen thermischen Widerstands verringert die maximal erzielbare Kälteleistung eines Moduls. Das Maximum der Kälteleistung aller Variationen befindet sich bei der gleichen Stromstärke. Da sich die elektrische Leistungsaufnahme nur geringfügig aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Materialparameter ändert, nimmt der thermoelektrische COP zu höheren thermischen Widerständen der Kaltseite ab. Die Werte bei maximal erzielbarer Kälteleistung sind zur Übersicht in Tabelle 10 aufgetragen.

Tabelle 10: Charakteristische Werte bei maximaler Kälteleistung unterschiedlicher thermischer Widerstände der Kaltseite des Wärmeübertragers.

Therm. Widerstand TE-Kaltseite [K/W]	Maximale Kälteleistung [W]	Stromstärke bei max. Kälteleistung [A]	COP bei max. Kälteleistung [-]
1e-6	1228	8,99	0,61
1e-3	1095	8,99	0,60
5e-3	981	8,99	0,53
1e-2	867	8,99	0,47
5e-2	447	8,99	0,24
1e-1	227	8,99	0,15

Um also bei vorgegebener Stromstärke eine gewisse Kälteleistung zu gewährleisten, ist die Minimierung des kaltseitigen thermischen Widerstands von großer Bedeutung.

In Abbildung 37 ist der Einfluss des thermischen Widerstands aufgrund der Kontaktierung und Wärmeleitung auf der Warmseite dargestellt.

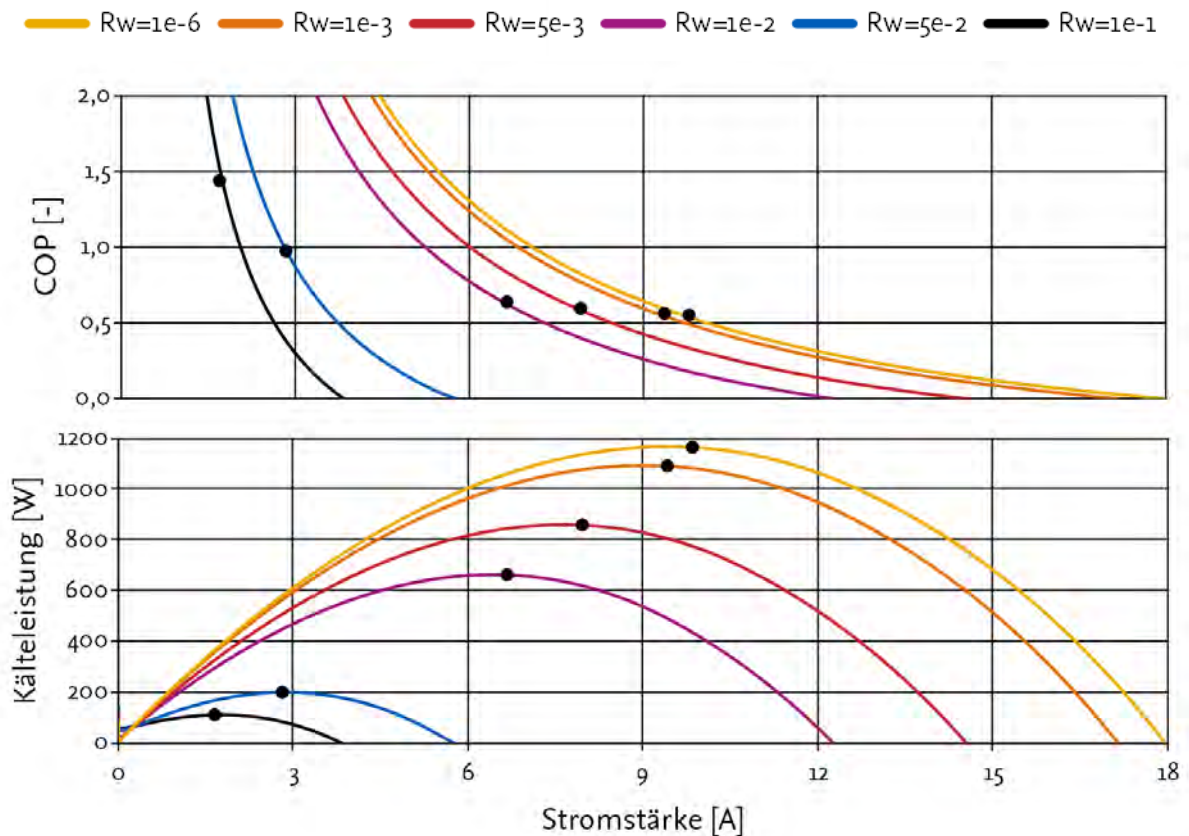


Abbildung 37: Variation des thermischen Widerstands auf der Warmseite eines thermoelektrischen Wärmeübertragers. Ein schwarzer Punkt stellt den Punkt maximal erzielbarer Kälteleistung beim jeweiligen Widerstand dar.

Wie auf der Kaltseite des Wärmeübertragers verringert eine Erhöhung des thermischen Widerstands die maximal erzielbare Kälteleistung. Beim thermischen Widerstand der Warmseite kommt jedoch hinzu, dass das Maximum der Kälteleistung bei höheren thermischen Widerständen mit geringeren Stromstärken erreicht wird. Die Werte bei maximal erzielbarer Kälteleistung sind zur Übersicht in Abbildung 37 als schwarze Punkte gekennzeichnet. Durch die Erhöhung des thermischen Widerstands verringert sich der Betriebsbereich der thermoelektrischen Module, der zwischen der Stromstärke maximaler Kälteleistung und maximalem COP (knapp über 0 A) liegt.

Außerdem verringert sich die Kälteleistung bei Erhöhung der thermischen Widerstände auf der Warmseite deutlich stärker als auf der Kaltseite. Bei Erhöhung der eingestellten Stromstärke kann bei höheren Widerständen ab einem gewissen Punkt keine Kälteleistung mehr vom Modul aufgenommen werden. Bei weiterhin steigender Stromstärke wird dann Wärme auf beiden Seiten des Wärmeübertragers abgegeben und der COP sinkt unter 0.

Liegt keine Kälteleistung mehr vor, ist keine Abkühlung der Luft und damit kein Auskondensieren mehr erreichbar. Um eine hohe Kondensationsrate zu gewährleisten, ist folglich der thermische Widerstand auf der Warmseite des Wärmeübertragers und damit auch die Kontaktierung von essentieller Bedeutung für die ordnungsgemäße Funktion eines thermoelektrischen Wärmeübertragers für die Wäschetrocknung.

Aus der Parameterstudie wichtiger potentieller Einflussgrößen an einem Komponentenmodell eines thermoelektrischen Wärmeübertragers zur Wäschetrocknung können folgende Erkenntnisse zusammengefasst werden:

- Die luftseitigen Wärmeübertragungskoeffizienten des Wärmeübertragers beeinflussen das Verhalten des Wärmeübertragers nur geringfügig. Dies kann damit begründet werden, dass der untersuchte technisch relevante Bereich der Koeffizienten klein im Vergleich zum veränderbaren Bereich der thermischen Kontaktwiderstände. Weitere Untersuchungen werden deshalb mit den in Tabelle 6 angegebenen Grundeinstellungen durchgeführt.
- Der Luftvolumenstrom hat einen hohen Einfluss auf die erreichbare Kälteleistung. Bei einer ganzheitlichen Betrachtung des Trocknungsprozesses bewirkt eine Steigerung des Prozessluftvolumenstroms zwar eine höhere Kälteleistung und damit einen höheren Kondenswassermassenstrom. Der höhere Volumenstrom hat aber auch eine gesteigerte Leistungsaufnahme des Gebläses zur Folge. Die genaue Einstellung des Prozessluftvolumenstroms muss deshalb am jeweils vorliegenden Gesamtsystem vorgenommen werden. Im folgenden Abschnitt wird deshalb der Einfluss des Prozessluftvolumenstroms auf das Systemverhalten untersucht.
- Die thermischen Widerstände aufgrund der Kontaktierung und Wärmeleitung sind entscheidend für die ordnungsgemäße Funktion eines thermoelektrischen Wärmeübertragers. Ist der thermische Widerstand auf der Kaltseite zu hoch, kann kaum noch Kälteleistung von den thermoelektrischen Modulen aufgenommen werden. Ist der thermische Widerstand auf der Warmseite zu hoch, kann sogar auf der Kaltseite Wärme abgegeben werden und die thermoelektrischen Module fungieren lediglich als elektrische Heizer. Dies ist damit zu erklären, dass sich durch den hohen thermischen Widerstand die Module stark aufheizen. Die Materialeigenschaften der Halbleiter sinken ab einer Temperatur von etwa 100 °C und verringern die Leistungsfähigkeit der Module. Durch die Verkleinerung des Betriebsbereichs gibt der Wärmeübertrager schon bei geringen Stromstärken Wärme an die Prozessluft ab.

6.2.2 Parameterstudie des thermoelektrischen Wäschetrockners

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Anzahl Module und der Modulstromstärke auf das Wäschetrocknersystem untersucht. Die Betrachtung des gesamten Trockengangs berücksichtigt den zusätzlichen zeitlichen Verlauf der Lufttemperatur, der die Wärme- und Stoffübertragung in der Wäschetrommel beeinflusst. Je höher die Temperatur ist, desto mehr Feuchtigkeit kann die Wäsche aufnehmen und desto höhere Trocknungsgeschwindigkeiten sind erreichbar.

Für verschiedene Parametervariationen werden die Kenngrößen Energieverbrauch und Trockendauer über der eingestellten Modulstromstärke dargestellt. Die Modulstromstärke ist dabei über den gesamten Trockengang konstant auf den jeweiligen Wert festgelegt. Im vorigen Abschnitt wurden die thermischen Widerstände und der Volumenstrom als starke Einflussgrößen auf das Verhalten des Wärmeübertragers identifiziert. Im Folgenden wird deshalb ihr Einfluss zusätzlich zu dem der Modulstromstärke und der Anzahl der Module auf den gesamten Trocknungsprozess untersucht. Das

Simulationsmodell ist in Kapitel 5 in Abbildung 21 dargestellt und die Parameter des Gesamtsystems sind in Tabelle 8 aufgestellt.

In Abbildung 38 ist der Einfluss des thermischen Widerstands aufgrund der Kontaktierung und Wärmeleitung auf der Warmseite auf den gesamten Trocknungsprozess mit 12 thermoelektrischen Modulen dargestellt.

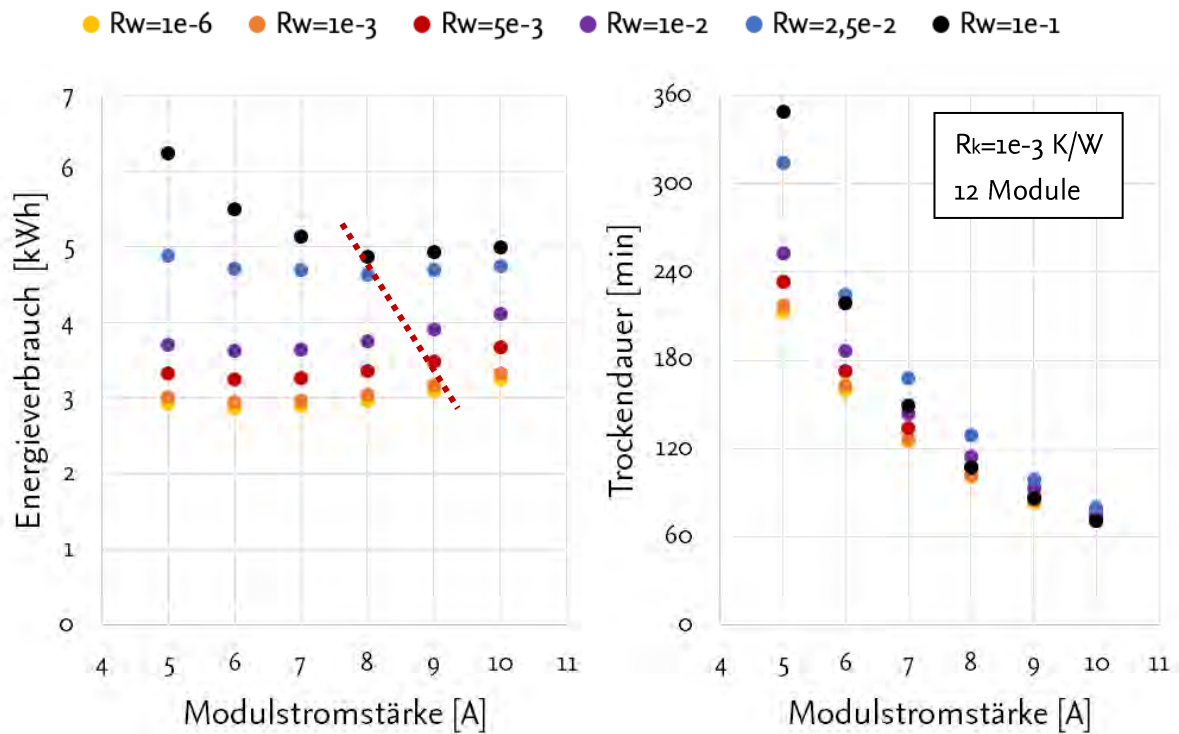


Abbildung 38: Energieverbrauch und Trockendauer des thermoelektrischen Wäschetrockners bei Variation des thermischen Widerstands auf der Warmseite des thermoelektrischen Wärmeübertragers mit 12 Modulen. Rechts der roten Linie im linken Diagramm liegen Ergebnisse von Konfigurationen, die bestehende Temperaturgrenzen übersteigen.

Mit steigendem thermischem Widerstand der Warmseite erhöht sich sowohl der Energieverbrauch als auch die Trockendauer. Bei geringen Widerständen bis zu einem Widerstand von $1e-2$ der Warmseite liegt ein minimaler Energieverbrauch bei einer eingestellten Modulstromstärke von 6 A vor. Mit geringem Widerstand der Warmseite kann ein Energieverbrauch unter 3 kWh realisiert werden. Mit steigender Modulstromstärke steigt das Temperaturniveau im Prozess an und die Trockendauer wird reduziert. Die gestrichelte rote Linie im linken Diagramm markiert die Grenze der umsetzbaren Konfigurationen. Rechts dieser Linie steigt die Trommelaustrittstemperatur während der Trocknung über den Grenzwert von 75°C , welcher eine Beschädigung der Wäsche verhindern soll. Aus diesem Grund sind nur Konfigurationen bis 8 A ohne Schädigung der Wäsche umsetzbar. Mit 12 Modulen und dem Einstellen einer über den Trocknungsprozess konstanten Stromstärke ist also ein Energieverbrauch von unter 3 kWh realisierbar oder eine Trockendauer von unter 120 min. Für einen thermischen Widerstand von $1e-1$ K/W nimmt die Trockendauer zu höheren Stromstärken stärker ab als für geringere thermische Widerstände. Für derart hohe thermische Widerstände steigt die Modultemperatur so weit an, dass auf beiden Wärmeübertragerseiten Wärme an die Luft übertragen

wird. Aufgrund dieser stärkeren Abnahme der Trockendauer bei sehr hohen thermischen Widerständen kann die Grenze der umsetzbaren Konfigurationen nicht in die rechten Diagramme eingezeichnet werden.

Wird die Anzahl Module verringert, verlagern sich die Minima von Energieverbrauch und Trockendauer zu höheren Stromstärken. Gleichzeitig wird bei weniger Konfigurationen der Grenzwert der Trommelaustrittstemperatur überschritten. Eine Heizleistung, die zur Schädigung der Wäsche führt, wird mit 10 Modulen erst für Betriebsbedingungen mit 9 A oder höher erreicht. In Abbildung 39 ist der Einfluss des thermischen Widerstands aufgrund der Kontaktierung und Wärmeleitung auf der Warmseite auf den gesamten Trocknungsprozess mit 10 thermoelektrischen Modulen dargestellt.

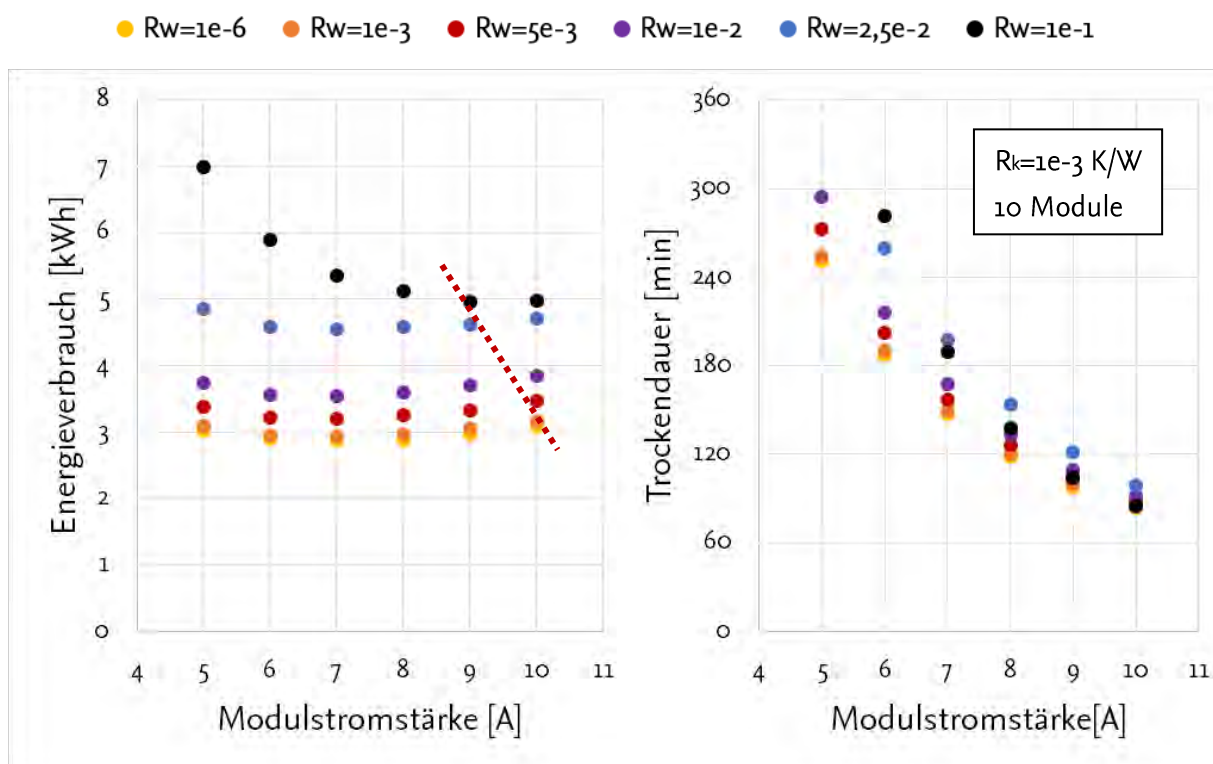


Abbildung 39: Energieverbrauch und Trockendauer des thermoelektrischen Wäschetrockners bei Variation des thermischen Widerstands auf der Warmseite des thermoelektrischen Wärmeübertragers mit 10 Modulen. Rechts der roten Linie im linken Diagramm liegen Ergebnisse von Konfigurationen, die bestehende Temperaturgrenzen übersteigen.

Wird die Anzahl der Module erhöht, verlagern sich die Minima von Energieverbrauch und Trockendauer zu geringeren Stromstärken. Bereits bei Konfigurationen mit mittleren Stromstärken wird der Grenzwert der Trommelaustrittstemperatur überschritten. In Abbildung 40 ist der Einfluss des thermischen Widerstands aufgrund der Kontaktierung und Wärmeleitung auf der Warmseite auf den gesamten Trocknungsprozess mit 14 thermoelektrischen Modulen dargestellt.

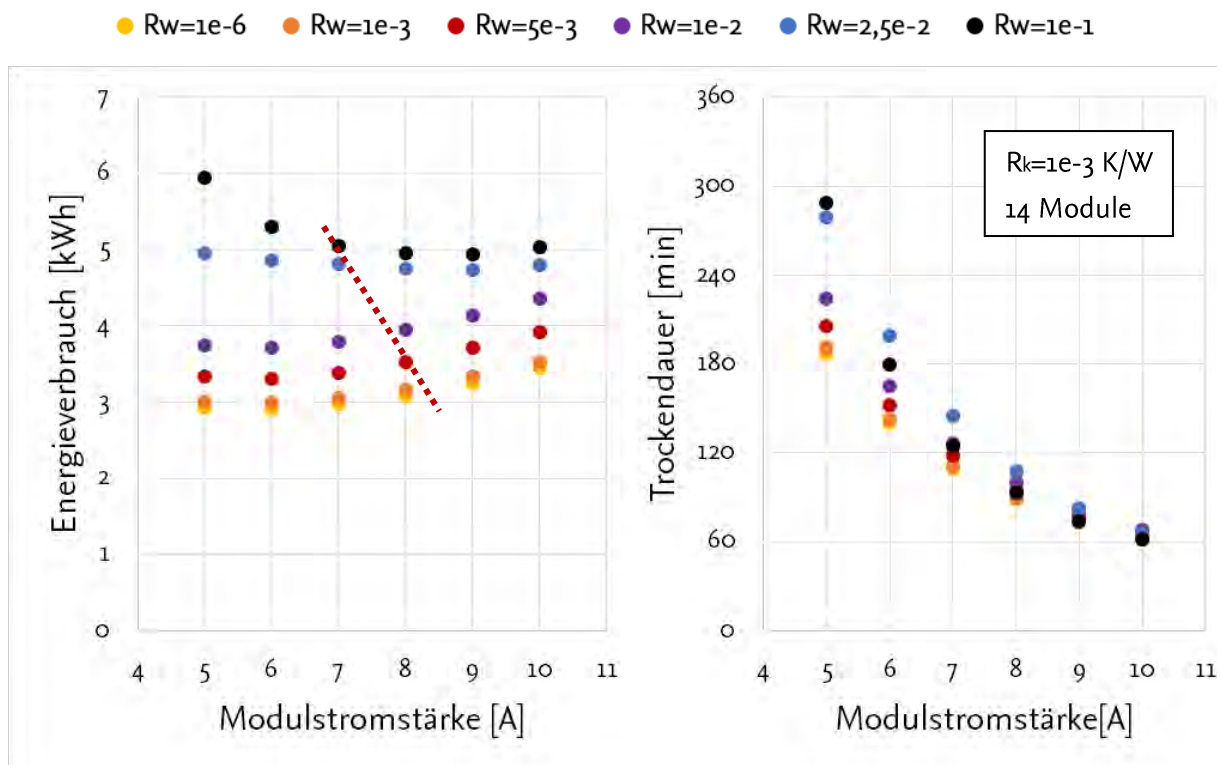


Abbildung 40: Energieverbrauch und Trockendauer des thermoelektrischen Wäschetrockners bei Variation des thermischen Widerstands auf der Warmseite des thermoelektrischen Wärmeübertragers mit 14 Modulen. Rechts der roten Linie im linken Diagramm liegen Ergebnisse von Konfigurationen, die bestehende Temperaturgrenzen übersteigen.

Vergleicht man die Abbildung 39 und die Abbildung 40, ist zu erkennen, dass mit weniger Modulen der minimale Energieverbrauch bei unterschiedlichen warmseitigen thermischen Widerständen abnimmt. Gleichzeitig nimmt die zugehörige Trockendauer mit weniger Modulen zu. Da jedoch mit weniger Modulen mehr Konfigurationen bei höheren Stromstärken eingestellt werden können, sind Trockengänge mit deutlich geringeren Trockendauern umsetzbar. Diese können weniger als 120 Minuten betragen. Zur Übersicht sind für unterschiedliche Modulanzahlen der minimale Energieverbrauch und die minimale Trockendauer für die Konfiguration mit einem warmseitigen thermischen Widerstand von $1e-2$ K/W in Tabelle 11 gegenübergestellt. Dieser Widerstand liegt nahe an dem im Validierungsmodell eingestellten Wert und wird damit als konstruktiv umsetzbar eingestuft.

Tabelle 11: Charakteristische Werte des TE-Wäschetrockners bei unterschiedlicher Modulanzahl bei einem warmseitigen thermischen Widerstand von $1e-2$ K/W.

	Modulstromstärke	Energieverbrauch [kWh]	Trockendauer [min]
Minimaler Energieverbrauch			
4 Module	11	3,50	187
6 Module	8,75	3,43	183
8 Module	7,75	3,45	171
10 Module	7	3,54	167
12 Module	6,5	3,63	166
14 Module	6	3,72	165
Minimale Trockendauer			
6 Module	12,5	3,61	100
8 Module	10,6	3,66	101
10 Module	9,5	3,75	100
12 Module	8,6	3,84	101
14 Module	7,9	3,97	103

Die minimal benötigte Energie pro Trockengang nimmt mit sinkender Modulanzahl ab. Bei einer Reduzierung der Module von 8 auf 6 Module im Wärmeübertrager sinkt der Energieverbrauch lediglich um etwa 0,6 %. Es liegt somit ein flaches Optimum der Modulanzahl in Bezug auf einen minimalen Energieverbrauch bei 6 Modulen vor.

Die minimal benötigte Trockendauer pro Trockengang ist unabhängig von der Modulanzahl. Die Einstellung der Stromstärke für die minimale Trockendauer richtet sich ausschließlich danach, dass bei der jeweiligen Einstellung die Temperaturgrenzwerte eingehalten werden. Für den vorliegenden Volumenstrom von etwa $200 \text{ V}^3/\text{h}$ ist eine Trockendauer von 100 Minuten erreichbar. Mit sinkender Modulanzahl nimmt bei der Einstellung der minimalen Trockendauer der Energieverbrauch ab.

Je weniger Module verwendet werden, desto geringer ist jedoch auch die vorhandene Kontaktfläche zu den thermoelektrischen Modulen. Mit abnehmender Modulanzahl steigt also der Einfluss der Kontaktgüte eines einzelnen Moduls und damit das Risiko eines unregelmäßig erhöhten thermischen Widerstands. Außerdem ist ein Vorteil einer höheren Modulanzahl, dass die Modulstromstärken der beiden optimalen Einstellungen dichter beieinander liegen.

In Abbildung 41 ist der Einfluss des thermischen Widerstands aufgrund der Kontaktierung und Wärmeleitung auf der Kaltseite auf den gesamten Trocknungsprozess mit 12 thermoelektrischen Modulen dargestellt.

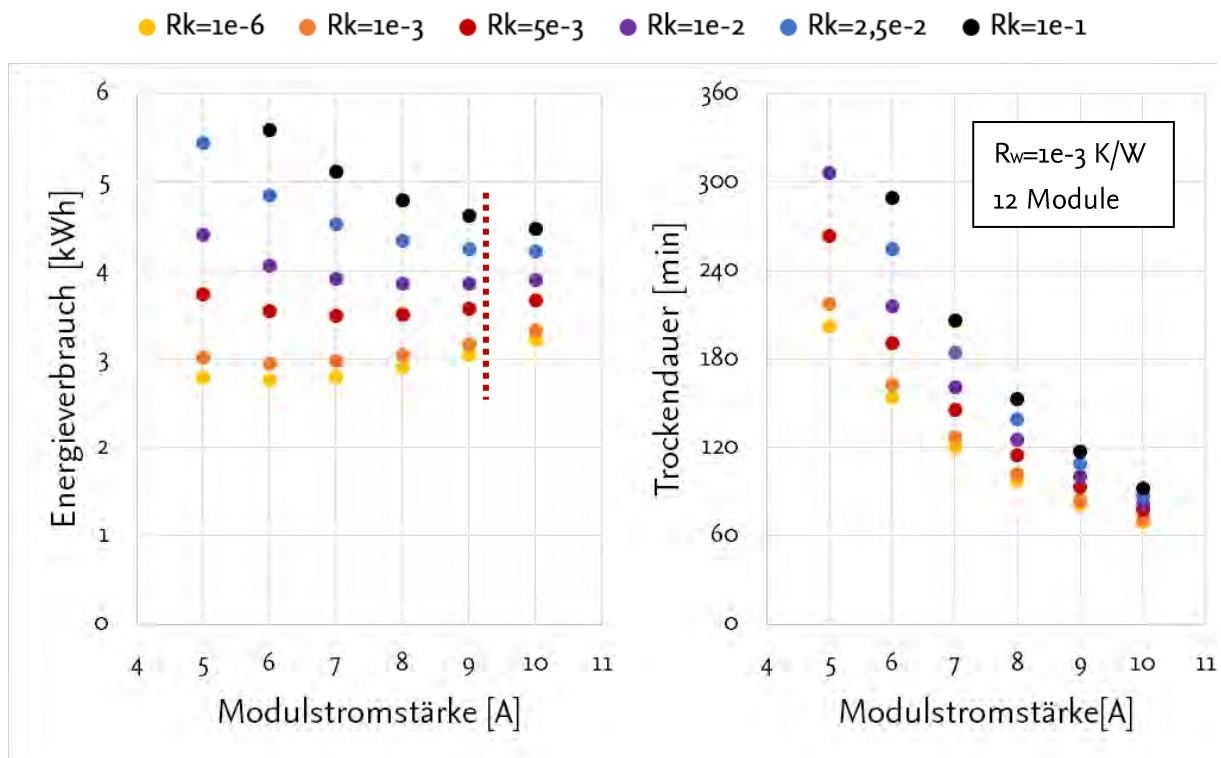


Abbildung 41: Energieverbrauch und Trockendauer des thermoelektrischen Wäschetrockners bei Variation des thermischen Widerstands auf der Kaltseite des thermoelektrischen Wärmeübertragers mit 12 Modulen. Rechts der roten Linie im linken Diagramm liegen Ergebnisse von Konfigurationen, die bestehende Temperaturgrenzen übersteigen.

Mit steigendem thermischem Widerstand der Kaltseite erhöht sich – analog zur Warmseite - sowohl der Energieverbrauch als auch die Trockendauer. Mit steigendem thermischem Widerstand verlagert sich das Minimum des Energieverbrauchs zu höheren Stromstärken. Die gestrichelte rote Linie im linken Diagramm markiert wieder die Grenze der umsetzbaren Konfigurationen.

Während bei hohen warmseitigen Widerständen die Trockendauer wieder abnimmt, steigt die Trockendauer zu hohen kaltseitigen Widerständen stetig an. Dies kann damit erklärt werden, dass bei hohen Widerständen auf der Kaltseite kaum noch Kälteleistung bereitgestellt werden kann. Die Wärme kann jedoch über die Warmseite hinreichend gut abgeführt werden und verhindert ein Überhitzen der Module.

Schließlich ist in Abbildung 42 der Einfluss des Prozessluftvolumenstroms auf den gesamten Trocknungsprozess mit 12 thermoelektrischen Modulen dargestellt. Hierbei ist der im zeitlichen Mittel vorliegende Volumenstrom angegeben. Zur Verdeutlichung des Einflusses auf den Energieverbrauch ist in der linken Abbildung die Ordinatenachse angepasst.

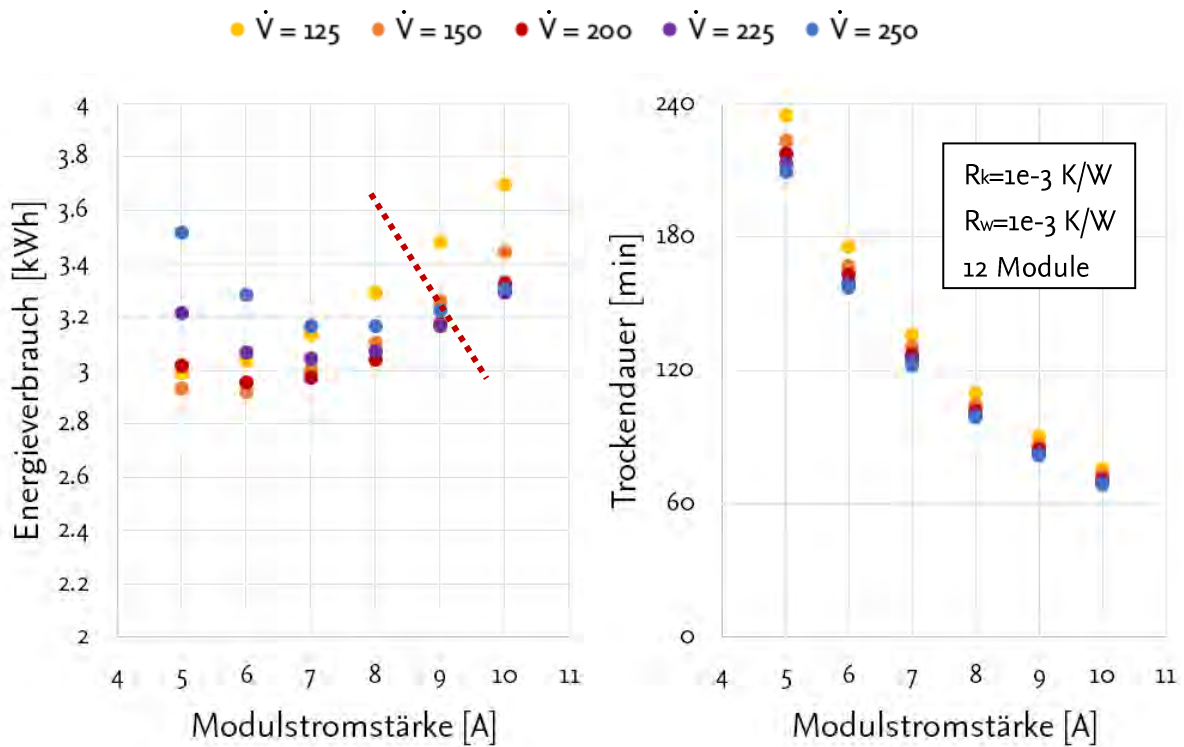


Abbildung 42: Energieverbrauch und Trockendauer des thermoelektrischen Wäschetrockners bei Variation des Prozessluftvolumenstroms. Rechts der roten Linie im linken Diagramm liegen Ergebnisse von Konfigurationen, die bestehende Temperaturgrenzen übersteigen.

Mit steigendem Volumenstrom bewegt sich das Minimum des Energieverbrauchs zu höheren Stromstärken. Gleichzeitig nimmt der minimale Energieverbrauch mit steigendem Volumenstrom zu. Dies kann durch die erhöhte Leistungsaufnahme des Gebläses erklärt werden. Durch den höheren Volumenstrom nimmt die Trockendauer ab. In Tabelle 12 sind zur Übersicht der minimale Energieverbrauch und die minimale Trockendauer für die unterschiedlichen Volumenströme aufgetragen.

Tabelle 12: Charakteristische Werte des TE-Wäschetrockners bei unterschiedlichen Volumenströmen bei thermischen Widerständen von jeweils $1e-3$ K/W.

	Energieverbrauch [kWh]	Trockendauer [min]
Minimaler Energieverbrauch		
125 m ³ /h	2,99	235
150 m ³ /h	2,92	167
200 m ³ /h	2,96	163
225 m ³ /h	3,05	125
250 m ³ /h	3,17	99
Minimale Trockendauer		
125 m ³ /h	3,29	110
150 m ³ /h	3,10	105
200 m ³ /h	3,17	85
225 m ³ /h	3,17	83
250 m ³ /h	3,22	82

Aus der Tabelle ist ein geringer Einfluss des Prozessluftvolumenstroms auf den minimalen Energieverbrauch zu erkennen. Bei Verdopplung des Volumenstroms steigt das Minimum des Energieverbrauchs um lediglich 6 % an. Die Trockendauer dieser Konfigurationen sinkt dabei um knapp 58 % auf unter 100 Minuten.

Der Einfluss des Volumenstroms auf die Trockendauer ist hingegen deutlich erkennbar. Mit einem höheren Volumenstrom kann mehr Wärme abgeführt werden und die Grenztemperaturen werden mit weniger Konfigurationen erreicht. Stellt man eine Konfiguration minimaler Trockendauer ein, so sinkt diese um etwa 25 % bei einer Verdopplung des Volumenstroms. Bei geringen thermischen Widerständen führt somit ein hoher Volumenstrom mit einer Gebläseleistung über 350 W zu einer starken Reduzierung der Trockendauer bei geringem Anstieg des Energieverbrauchs.

Mit 12 Modulen und dem Einstellen einer über den Trocknungsprozess konstanten Stromstärke ist ein Energieverbrauch von unter 3 kWh realisierbar oder eine Trockendauer von unter 120 min.

Aus der Parameterstudie wichtiger potentieller Einflussgrößen am Systemmodell eines thermoelektrischen Wäschetrockners können folgende Erkenntnisse zusammengefasst werden:

- Die Kenntnis der thermischen Kontaktwiderstände der beiden Wärmeübertragerseiten ist von entscheidender Bedeutung für die Einstellung einer gewünschten Betriebsart. Mit steigenden thermischen Widerständen verschiebt sich der minimale Energieverbrauch zu Einstellungen mit höherer Modulstromstärke.
- Die Betriebsart ist stark abhängig von der Modulstromstärke, da hierdurch maßgeblich das Temperaturniveau im Prozess gesteuert wird.
- Der Prozessluftvolumenstrom beeinflusst bei vorliegender Parametrierung nur in geringem Maße die Einstellung der Modulstromstärke für minimalen Energieverbrauch. Der Einfluss auf die Trockendauer ist dagegen wesentlich. Bei Verdopplung des Volumenstroms von etwa 125 V³/h auf 250 V³/h beträgt die Trockendauer weniger als die Hälfte.
- Für eine vorliegende Systemkonfiguration gibt es jeweils eine zeitoptimale und eine energieoptimale Einstellung. Diese werden jeweils über die Modulstromstärke eingestellt.
- Die minimale Trockendauer wird nicht durch die Modulanzahl, sondern nur durch die Einhaltung sicherheitsrelevanter Grenztemperaturen bestimmt.

6.3 Vergleich und Bewertung des thermoelektrischen Wäschetrockners mit den Referenzsystemen

Im vorigen Abschnitt konnten mit Hilfe der Parameterstudien wichtige Einflussfaktoren auf das Verhalten eines thermoelektrischen Wäschetrockners identifiziert werden. Je nach erreichbaren thermischen Widerständen des thermoelektrischen Wärmeübertragers führt jeweils eine Einstellung der Modulstromstärke entweder zum minimalen Energieverbrauch oder zur minimalen Trockendauer.

Zur Abschätzung des Potentials wurden Optimierungsrechnungen durchgeführt, bei denen das Softwarepaket MUSCOD-II des Interdisziplinären Zentrums für wissenschaftliches Rechnen der

Universität Heidelberg zum Einsatz kam [BP84], [DLS01], [LBS03]. Das bestehende Simulationsmodell musste dafür zunächst als Optimalsteuerungsproblem formuliert werden, wobei analog zu Gräber vorgegangen wurde [Grä14]. Als Steuergrößen sind die Modulstromstärke und die Drehzahlen von Prozessluftgebläse und Lüftergebläse definiert. Der Trockengang wird in 50 Zeitschritte unterteilt, wobei für jeden Zeitschritt die genannten Steuergrößen geändert werden können. Für die Konfiguration von 12 Modulen und einem erhöhten thermischen Widerstand auf Warmseite des Wärmeübertragers von $1e-2$ K/W wird exemplarisch der zeitliche Verlauf der optimierten Steuergrößen in Abbildung 43 dargestellt. Die Gebläsedrehzahlen sind zur besseren Lesbarkeit auf die jeweilige Maximaldrehzahl normiert worden.

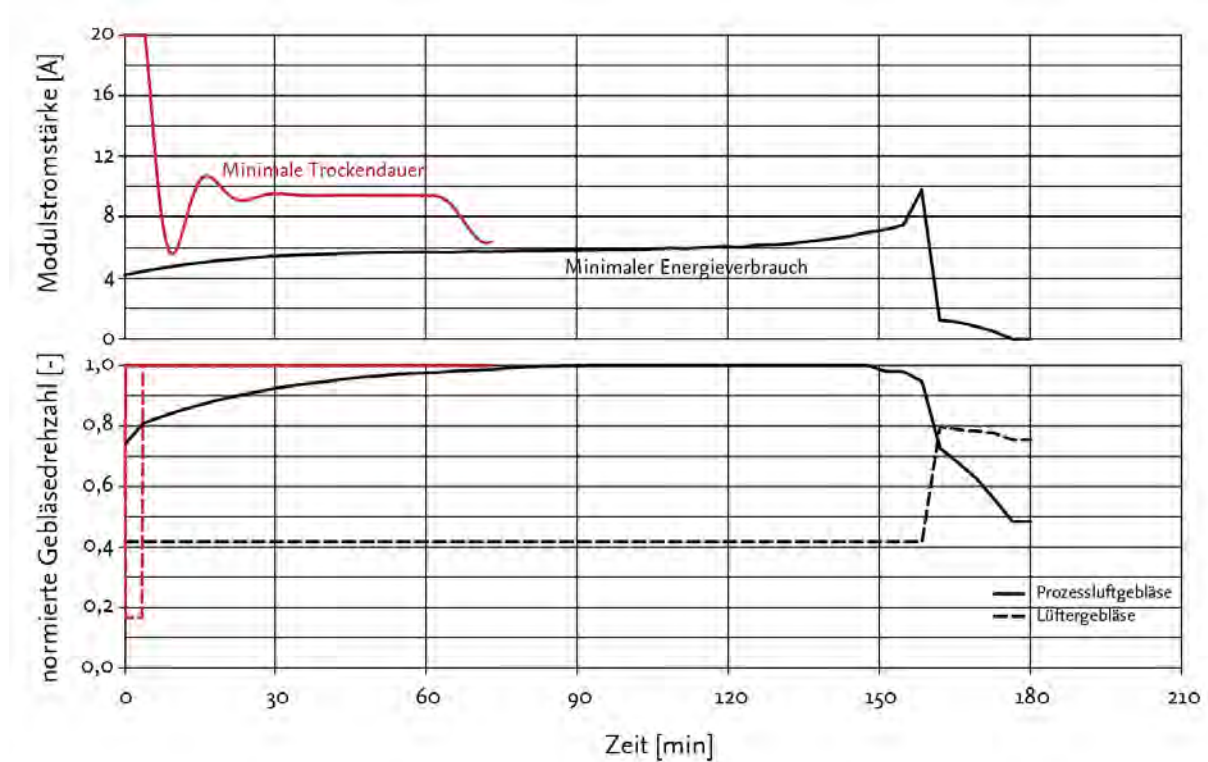


Abbildung 43: Zeitlicher Verlauf der optimierten Steuergrößen beider Betriebsstrategien eines thermoelektrischen Wäschetrockners.

In Tabelle 13 sind der Energieverbrauch und die Trockendauer der beiden definierten Betriebsstrategien aus der Parameterstudie und der Optimierungsrechnung gegenübergestellt.

Da der erhöhte thermische Widerstandswert nahe an dem im Validierungsmodell eingestellten Wert liegt, wird damit eine konstruktiv umsetzbare Konfiguration betrachtet.

Tabelle 13: Energieverbrauch und Trockendauer der Optima der Parameterstudie und der optimierten Betriebsführung mit 12 TE-Modulen.

	Energieverbrauch [kWh]	Trockendauer [min]
Minimaler Energieverbrauch		
Parameterstudie	3,63	163
Optimierungsrechnung	3,03	180
Minimale Trockendauer		
Parameterstudie	3,84	101
Optimierungsrechnung	4,06	74

Der aus der Optimierungsrechnung ermittelte minimale Energieverbrauch ist etwa 26,5 % geringer als das durch die Parameterstudie ermittelte Minimum. Gleichzeitig erhöht sich durch die Optimierung die Trockendauer um rund 10 % leicht.

Die optimierte Einstellung für eine minimale Trockendauer ergibt eine weitere Reduzierung der Trockendauer um etwa 26,5 % gegenüber dem durch die Parameterstudie ermittelten Minimum. Hierdurch erhöht sich der Energieverbrauch um knapp 6 % leicht.

6.3.1 Vergleich der Wäschetrocknersysteme

In der folgenden Tabelle 14 werden die charakteristischen Werte Energieverbrauch und Trockendauer für die beiden optimierten Einstellungen eines thermoelektrischen Wäschetrockners mit den Werten eines Kondensationstrockners und eines Wärmepumpenwäschetrockners verglichen. Die Ergebnisse des thermoelektrischen Wäschetrockners wurden mit einer konstruktiv umsetzbaren Parametereinstellung des Wärmeübertragers und Gesamtsystems erzielt. Die Daten des Kondensationstrockners und des Wärmepumpentrockners sind Mittelwerte von selbstgewonnenen Messdaten an handelsüblichen Geräten mit einer Wäschebelastung von 7 kg.

Tabelle 14: Vergleich charakteristischer Werte des thermoelektrischen Wäschetrockners mit Referenzgeräten. Die Ergebnisse sind mit konstruktiv umsetzbaren Parametereinstellungen angegeben.

	Energieverbrauch [kWh]	Trockendauer [min]
Thermoelektrischer Wäschetrockner		
Minimaler Energieverbrauch	3,03	180
Minimale Trockendauer	4,06	74
Kondensationstrockner		
	4,13	124
Wärmepumpentrockner		
	1,92	136

Die Trockendauer des thermoelektrischen Wäschetrockners ist für die Einstellung minimaler Trockendauer 40 % geringer als die eines herkömmlichen Kondensationstrockners. Dabei ist der Energieverbrauch mit knapp 2 % Abweichung ungefähr gleich dem eines Kondensationstrockners. Mit der Einstellung eines minimalen Energieverbrauchs benötigt der thermoelektrische Wäschetrockner rund 26,5 % weniger Energie als ein herkömmlicher Kondensationstrockner. Bei der Einstellung ist jedoch die Trockendauer etwa 45 % höher als die des Kondensationstrockners.

Somit kann der TE-Wäschetrockner sowohl hinsichtlich des Energieverbrauchs als auch hinsichtlich der Trockendauer bessere Ergebnisse liefern als ein herkömmlicher Kondensationstrockner.

Im Vergleich mit einem Wärmepumpenwäschetrockner kann der TE-Wäschetrockner zwar deutlich schneller trocknen, verbraucht dabei aber auch mehr Energie. Der TE-Wäschetrockner benötigt bei optimalen Einstellungen etwa 46 % weniger Zeit bei doppeltem Energieverbrauch. Auch bei energieoptimaler Einstellung benötigt der TE-Wäschetrockner knapp 58 % mehr Energie und trocknet die Wäsche etwa 32 % langsamer.

Ein Vorteil gegenüber dem Wärmepumpentrockner kann jedoch die flexible Steuerung der Modulstromstärke darstellen. Hierdurch können mit wenig Aufwand verschiedene Nutzungsvarianten umgesetzt werden. Ist dem Nutzer die Dauer nicht wichtig, kann eine besonders effiziente Einstellung verwendet werden, die zwar voraussichtlich eine höhere Trockendauer besitzt als ein Wärmepumpenwäschetrockner, jedoch vom Energieverbrauch vergleichbar mit ineffizienten Wärmepumpentrocknermodellen ist. Diese Flexibilität spiegelt sich auch im Verlauf der Trommeleintrittstemperatur und –austrittstemperatur der zwei Nutzungsvarianten wider. In Abbildung 44 sind diese exemplarisch für die beiden optimierten Betriebsstrategien dargestellt.

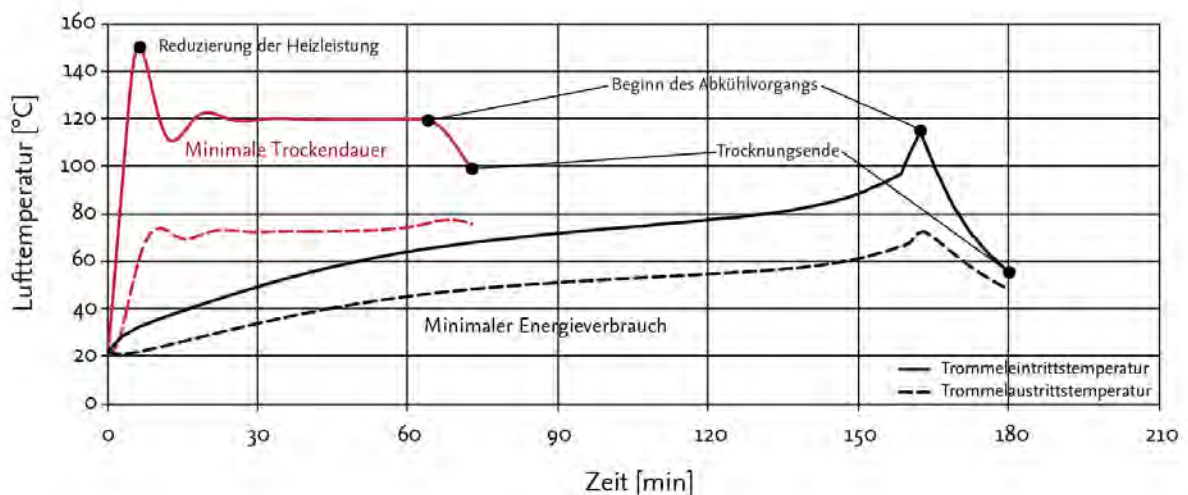


Abbildung 44: Temperaturverlauf am Trommeleintritt und -austritt der beiden optimierten Betriebsstrategien eines thermoelektrischen Wäschetrockners.

Der schnelle Betriebsmodus liegt auf einem hohen Temperaturniveau vergleichbar mit dem eines Kondensationstrockners (vergleiche Abbildung 7). Der effiziente Modus liegt etwas oberhalb des geringen Temperaturniveaus eines Wärmepumpenwäschetrockners. Über die flexible Steuerung der Modulstromstärke kann damit auch auf die thermische Belastung der Wäsche Rücksicht genommen werden.

Die Entwicklungen in der Materialwissenschaft lassen zudem eine weitere Steigerung der Effizienz thermoelektrischer Module zu. Das Potential für mögliche COP-Steigerungen soll hier anhand von Gleichung 6 sowie Gleichung 18 und 20 verdeutlicht werden. Die auf der Kaltseite aufgenommene Wärme ist von der Peltier-Wärme, der Wärmeleitung im Inneren und der Jouleschen Wärme

abhängig. Die zugeführte elektrische Leistung entspricht der Differenz der Peltier-Wärmen sowie der Jouleschen Wärme. Bei näherer Betrachtung der genannten Beiträge ist zu erkennen, dass diese von insgesamt genau drei Materialparameter abhängen: Dem Seebeck-Koeffizienten, der Wärmeleitfähigkeit und dem spez. elektrischen Widerstand. Vor diesem Hintergrund wird klar, dass durch Parametervariation der genannten Größen veränderte COPs herbeigeführt werden können. In einer beispielhaften Systemsimulation wurde die Wärmeleitfähigkeit um 50 % gesenkt. In diesem Fall ist der Energieverbrauch nur noch etwa 30 % höher als der eines handelsüblichen Wärmepumpentrockners. Dabei ist die Trockendauer rund 20 % geringer. Eine Optimierung der Betriebsweise bei der Nutzung thermoelektrischer Module könnte eine weitere Reduzierung des Energieverbrauchs ergeben. Eine identische Änderung kann durch eine 50 %-tige Reduzierung des spez. elektrischen Widerstands bewirkt werden.

6.3.2 Kostenabschätzung eines thermoelektrischen Wäschetrockners

Da der Aufbau eines TE-Wäschetrockners auf dem eines Kondensationstrockners basiert, werden für die Kostenabschätzung nur die zusätzlichen Kosten für den Bau des thermoelektrischen Wärmeübertragers betrachtet.

Aus einer Preisnachfrage beim Hersteller der thermoelektrischen Module konnte der Preis für ein Modul und für 1000 Module ermittelt werden. Geht man davon aus, dass die Abschätzung für eine Serie von 10000 Wäschetrocknern erfolgt und in jedem Wäschetrockner 10 Module eingebaut werden, könnte eine Bestellung von rund 100000 Modulen erfolgen. Hier ist eine weitere Preisreduktion aufgrund der höheren Stückzahlen zu erwarten. Pro TE-Wärmeübertrager werden zur thermischen Anbindung der Kaltseite 10 Heatpipes eingebaut, für die auch eine Preisanfrage von 1000 Stück getätigt wurde. Geht man von einem mit dem Luftkühler vergleichbaren Preis für die restliche Wärmeübertragerkonstruktion aus, ergeben sich folgende Werte für die Kostenabschätzung des TE-Wärmeübertragers:

Tabelle 15: Abgeschätzte Kosten der Hauptkomponenten eines thermoelektrischen Wärmeübertragers.

Thermoelektrisches Modul (10 Stk./Wärmeübertrager)		
Einzelpreis	54,54 €	
Stückpreis bei Mindestmenge 1000	33,57 €	
Kosten pro Wärmeübertrager		ca. 300 €
Heatpipes (10 Stk./Wärmeübertrager)		
Einzelpreis	10,29 €	
Stückpreis bei Mindestmenge 1000	5,27 €	
Kosten pro Wärmeübertrager		ca. 50 €
Kosten Wärmeübertragerkonstruktion		50 – 100 €
Gesamtkosten TE-Wärmeübertrager		400 – 450 €

Unter Berücksichtigung von Zusatzkosten der Peripherie, die pauschal mit 50 € festgelegt werden, werden die Kosten eines serientauglichen thermoelektrischen Wäschetrockners voraussichtlich um

450-500 € höher liegen als die eines Kondensationstrockners. Es ist also davon auszugehen, dass ein thermoelektrischer Wäschetrockner preislich vergleichbar mit einem Wärmepumpenwäschetrockner sein wird.

7 Potentielle Umweltentlastung

Wäschetrocknen auf der Leine in der Sonne verursacht weder Umweltbelastungen noch Stromkosten. Bei Regen und Kälte ist in Deutschland allerdings häufig der Wäschetrockner das Mittel der Wahl. Die Umweltwirkungen von konventionellen Kondensations- und Wärmepumpentrocknern sind hauptsächlich auf den Energieverbrauch, beim Wärmepumpentrockner auch auf die Kältemittelverluste, zurückzuführen [RGLo8]. Bei beiden Punkten gilt es anzusetzen, um den Einsatz von Wäschetrocknern umweltfreundlicher zu gestalten.

Der Stromverbrauch in deutschen Privathaushalten ist von 1990 bis 2010 um 19,2 % angestiegen und lag laut Umweltbundesamt im Jahr 2011 bei 139,7 Mrd. kWh, was 26,6 % des Gesamtenergieverbrauchs in Deutschland entsprach [Uba17a]. Davon geht ca. die Hälfte auf das Konto von Elektrogeräten [Den17]. Eine Erhebung der Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz in Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut im Jahr 2012 ergab, dass Wäschetrockner einen Anteil von mehr als 10 % am Stromverbrauch bei Elektrogeräten aufweisen [Öko12]. Somit lässt sich der Stromverbrauch von Wäschetrocknern für das Jahr 2012 auf ca. 6,9 Mrd. kWh abschätzen. Bei einem mittleren CO₂-Emissionsfaktor von 581 g/kWh ist damit eine jährliche CO₂-Emission von 4,0 Mio. Tonnen verbunden [Ich16], ohne evtl. Kältemittelverluste mit zu berücksichtigen.

Der in diesem Projektantrag verfolgte Einsatz einer thermoelektrischen Wärmepumpe in Wäschetrocknern weist das Potential auf, durch optimierte Komponenten und eine geeignete Systemverschaltung einerseits und durch angepasste Betriebsstrategien andererseits eine deutliche Reduktion des Energieverbrauchs gegenüber konventionellen Kondensationstrocknern zu erreichen. Die Energieeffizienz von Wärmepumpentrocknern ist nach momentanem Stand der Technik nicht erreichbar, jedoch durch zukünftige Forschungsaktivitäten in der Materialtechnologie und der Betriebsweise denkbar. Ausgehend von einem durchschnittlichen Stromverbrauch eines Wäschetrockners von 4 kWh [Öko12] und einem jährlichen Stromverbrauch von 4,6 Mrd. kWh werden im Jahr etwa 1,15 Mrd. Trocknungszyklen durchlaufen.

Wird im Rahmen dieses Projekts z.B. eine Einsparung von 1 kWh pro Norm-Trocknungsgang erzielt, könnte eine jährliche Einsparung von 1,15 Mrd. kWh erreicht werden. Dies würde eine CO₂-Einsparung von 648.600 Tonnen pro Jahr bedeuten. Leider sind die Anteile der verschiedenen Wäschetrocknertechnologien in deutschen Haushalten unbekannt. Geht man davon aus, dass von den momentan ca. 15 Mio. Wäschetrocknern in deutschen Haushalten [SB14] etwa 10 % effiziente Wärmepumpentrockner mit R134a als Kältemittel und einer jeweiligen Füllmenge von 300 g sind, lassen sich allein in Deutschland 450 Tonnen des klimaschädlichen Kältemittels einsparen. Es wäre somit also im Vergleich zu beiden konventionellen Wäschetrocknertechnologien eine Verringerung der Umweltauswirkungen möglich.

Der Stromverbrauch eines elektrischen Haushaltsgeräts hat in vielen Fällen den größten Einfluss auf die Umweltwirkungen des Geräts. Der Stromverbrauch allein reicht jedoch nicht aus, um die Umweltwirkungen korrekt darzustellen. In einem ökologischen Vergleich wurden daher alle Lebensphasen der untersuchten Geräte von der Beschaffung der Rohstoffe bis zur endgültigen

Entsorgung oder Kreislaufführung aller verbauten Materialien berücksichtigt. Die thermoelektrische Wäschetrocknertechnologie wurde unter verschiedenen Nutzungsbedingungen hinsichtlich mehrerer Umweltwirkungskategorien mit einem typischen Kondensationstrockner und einem Wärmepumpentrockner verglichen. Für jede Trocknervariante wurde eine Stoffstrommodellierung aller relevanten Stoff- und Energieflüsse in Form von Stoffstromnetzen mit dem Computerprogramm *Umberto NXT LCA* und der Datenbank *Ecoinvent 3* erstellt. Des Weiteren wurde eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich des Strombedarfs und der Art der Stromerzeugung während der Nutzungsphase durchgeführt.

In einer am IfT erstellten Studie wurden die potentiellen Umweltauswirkungen von Kondensationstrocknern, Wärmepumpentrocknern und thermoelektrischen Trocknern in den Nutzungsszenarien „100 Trockengänge pro Jahr“, „50 Trockengänge pro Jahr“, „200 Trockengänge pro Jahr“ und „100 Trockengänge pro Jahr mit Strom, der zusätzlich aus erneuerbaren Energien produziert wird“ bilanziert und miteinander verglichen [Die15]. Hierzu wurden alle Lebensphasen der genannten Wäschetrocknertypen mit Datensätzen aus *Ecoinvent 3* im Computerprogramm *Umberto NXT LCA* modelliert und die Umweltwirkungen mit der Bewertungsmethode *ReCiPe Midpoint (H) w/o LT* berechnet. Es wurden beispielhaft die Wirkungskategorien Treibhauspotential, Ozonabbaupotential, Süßwasserökotoxizitätspotential, Süßwassereutrophierungspotential, terrestrisches Versauerungspotential, Humantoxizitätspotential und fossiles Rohstofferschöpfungspotential betrachtet. Auf eine Gewichtung der Wirkungskategorien wurde verzichtet, da dies objektiv nicht möglich ist. Als funktionelle Einheit wurde ein Trockengang mit 7 kg Wäsche gewählt. In diesem Bericht wird ausschließlich auf das Treibhauspotential als repräsentative Wirkungskategorie eingegangen.

Da der tatsächliche Energieverbrauch eines Seriengeräts eines thermoelektrischen Wäschetrockners stark von der thermischen Anbindung der TE-Module abhängt, werden im Folgenden zwei Verbrauchsszenarien betrachtet. Das optimistische Szenario stellt einen TE-Wäschetrockner mit optimierter thermischer Anbindung und optimierter Betriebsstrategie dar. Das realistische Szenario steht für einen TE-Wäschetrockner mit optimierter Betriebsstrategie, der einen TE-Wärmeübertrager mit Parametern des Prototyps enthält. Der betrachtete Wärmepumpentrockner ist mit dem Kältemittel R134a befüllt.

Für die Systeme ist der folgende Stromverbrauch pro Trockengang bei voller Beladung angenommen:

Tabelle 16: Angenommener Stromverbrauch der betrachteten Wäschetrockner.

Trocknerart	Energieverbrauch pro Trockengang [kWh]
Wärmepumpentrockner	1,75
Kondensationstrockner	4,14
Thermoelektrischer Wäschetrockner (optimistisches Szenario)	2,0
Thermoelektrischer Wäschetrockner (realistisches Szenario)	3,0

Die Datensätze hinsichtlich des Materials, des Herstellungsprozesses und des Herstellungsorts sind größtenteils aus der 2008 durchgeführten Studie von Rüdener u.A. entnommen [RGLo8]. Für den thermoelektrischen Wäschetrockner ist der Datensatz eines Kondensationstrockners um die Materialien der thermoelektrischen Module und der im Prototyp verwendeten Materialien des TE-Wärmeübertragers ergänzt. Hierbei werden 24 Module in der Rechnung betrachtet, wodurch die folgende Betrachtung als konservativer Ansatz gesehen werden kann.

Es wird eine durchschnittliche Lebensdauer eines Wäschetrockners von 13 Jahren angenommen. Bei einem mittleren Wäscheanfall von etwa 700 kg pro Jahr, wie es in Rüdener u.A. angegeben ist, wird vereinfacht von 100 Trockengängen mit voller Beladung pro Jahr ausgegangen. In Abbildung 45 ist das jeweilige Treibhauspotential des Trockners durch Produktion und Entsorgung ohne Nutzung des Geräts und bei einer Nutzung von 100 Trocknungszyklen pro Jahr dargestellt. Hier wird nochmals unterschieden zwischen der Nutzung von Strom aus Windkraftanlagen und Strom des deutschen Strommixes. Grundlage der Berechnung ist neben den erwähnten Datenbanken der CO₂-Emissionsfaktor des deutschen Strommixes von 2015 [Ich16] und der Emissionsfaktor der Windenergie von 2010 [Gem17].

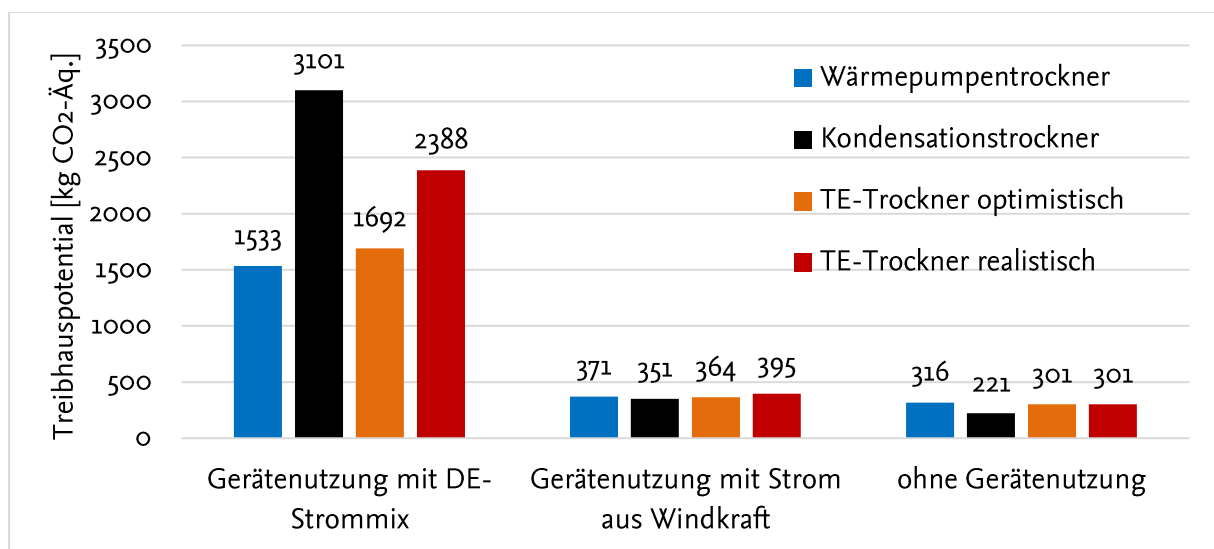


Abbildung 45: Treibhauspotential der untersuchten Wäschetrocknersysteme ohne und mit Gerätenutzung (1300 Trockenzyklen).

Die Ergebnisse der Wirkungsbilanz zeigen, dass thermoelektrische Wäschetrockner in Haushalten bei geringer Nutzung oder bei Nutzung mit Strom aus erneuerbaren Energien ein geringeres Treibhauspotential aufweist als ein Wärmepumpentrockner. Je höher die Gerätenutzung von Strom aus dem deutschen Strommix ist, desto besser schneidet der Wärmepumpentrockner ab und desto schlechter der thermoelektrische Wäschetrockner und der Kondensationstrockner. Sowohl bei geringer als auch bei hoher Nutzung von Strom aus dem deutschen Strommix liegt das Treibhauspotential eines thermoelektrischen Wäschetrockners zwischen dem eines Kondensationstrockners und dem eines Wärmepumpentrockners. Lediglich bei der Konfiguration mit hohem Energieverbrauch (geringe Trockendauer) und geringer Nutzung bzw. Nutzung von Strom aus regenerativen Energien besitzt der thermoelektrische Wäschetrockner das höchste Treibhauspotential.

Es zeichnet sich ab, dass Kondensationstrockner nur mit zusätzlich erzeugten erneuerbaren Energien und besonders geringer Nutzung bessere Ergebnisse erzielen könnten als thermoelektrische Trockner. In diesem Fall ist es jedoch fraglich, ob sich die Anschaffung eines Wäschetrockners überhaupt lohnt. Generell ist von geringeren Emissionen auszugehen, wenn die Geräte mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben werden.

Unter Berücksichtigung von Produktion und Entsorgung der Geräte besitzt der thermoelektrische Wäschetrockner für die meisten Nutzungsszenarien ein Treibhauspotential, das zwischen denen der handelsüblichen Geräte liegt. Bei geringer Gerätenutzung ist ein Kondensationstrockner am umweltschonendsten. Bei hoher Gerätenutzung emittiert ein Wärmepumpentrockner am wenigsten CO₂. Da der thermoelektrische Wäschetrockner kein Kältemittel enthält, gestaltet sich jedoch die Entsorgung einfacher als bei einem Wärmepumpentrockner.

Der TE-Wäschetrockner ist in der Lage, Wäsche fast doppelt so schnell wie handelsübliche Geräte mit geschlossenem Prozessluftkreislauf zu trocknen. Für Waschsalons und andere Nutzer, bei denen die Zeit - bspw. über Personalkosten - den größten Kostenfaktor bildet, stellt der TE-Trockner eine Alternative zu am Markt verfügbaren Wäschetrocknern dar. Er bietet damit ein hohes Potential zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes zukünftiger Trocknergenerationen. Geht man schließlich davon aus, dass die Hälfte der momentan verwendeten Kondensationswäschetrockner durch thermoelektrische Wäschetrockner ausgetauscht werden (ca. 6,75 Mio. Geräte), könnte der CO₂-Ausstoß um 4,81 bis 9,51 Mio. Tonnen reduziert werden.

8 Fazit

Ziel des Projektes war eine ganzheitliche Untersuchung eines neuartigen thermoelektrischen Wäschetrocknerkonzepts. Hierfür wurde zum einen der Gesamtprozess, bestehend aus Trocknungs- und thermoelektrischem Wärmepumpenprozess, detailliert analysiert und zum anderen ein Prototyp entwickelt und aufgebaut.

In einem ersten Schritt wurden in einer Konzeptionierungsphase günstige Prozess- und Geometrieparameter für eine energieeffiziente Trocknung identifiziert und festgelegt. Bei der Wahl der Module konnte auf Erkenntnisse aus dem Projekt AZ 28528 zurückgegriffen werden. Mit Hilfe einer groben Prozessauslegung konnte die Anzahl der Module und der zu erwartende Betriebsbereich der thermoelektrischen Module abgeschätzt werden. Nach einer Untersuchung einer geeigneten fluidseitigen Verschaltung konnte erfolgreich ein Prototyp eines thermoelektrischen Wärmeübertragers aufgebaut werden. Durch Integration des am IfT erstellten Wärmeübertragers in einen Prozessluftkreislauf konnte außerdem ein Prototyp eines thermoelektrischen Wäschetrockners erstellt werden. Zur Gewährleistung eines günstigen Volumenstroms wurde ein zusätzliches Gebläse in den Luftkreislauf integriert.

In einer detaillierten thermodynamischen Analyse des thermoelektrischen Wärmeübertragers und des gesamten Trocknungssystems konnte die Funktionsweise des thermoelektrischen Wäschetrockners wie beschrieben nachgewiesen werden. Über die detaillierte Messung eines handelsüblichen Kondensationstrockners konnte ein Großteil der im thermoelektrischen Wäschetrockner verwendeten Komponentenmodelle validiert werden. Das bestehende Modell eines TE-Moduls wurde im Rahmen dieses Projekts weiter verbessert und anhand von Messungen an einem dafür erstellten Prüfstand validiert. Das neue Komponentenmodell eines thermoelektrischen Wärmeübertragers zur Wäschetrocknung konnte über die Messung des Prototyps im Gesamtsystem validiert werden. Somit war auch die Validierung des Gesamtsystems mittels einzeln validierter Komponentenmodelle erfolgreich.

Verschiedene potentielle Systemeinflussgrößen wurden in Parameterstudien untersucht. Hieraus konnten wichtige Einflussgrößen auf das Systemverhalten identifiziert werden. Nachdem diese bestimmt wurden, konnten zeit- und energieoptimale Betriebsführungen für die thermoelektrische Wäschetrocknung abgeleitet werden. Durch die Einstellung einer zeitlich veränderlichen Betriebsstrategie kann eine Reduzierung der Trockendauer von 40 % bzw. eine Reduzierung des Energieverbrauchs von 26,5 % gegenüber einem handelsüblichen Kondensationstrockner erreicht werden.

In einem abschließenden Vergleich mit Referenzsystemen konnte gezeigt werden, dass ein thermoelektrischer Wäschetrockner mit am Markt verfügbaren Kondensationstrocknern sowohl im Hinblick auf den Energieverbrauch als auch im Hinblick auf die Trockendauer konkurrieren kann. Im Vergleich mit handelsüblichen Wärmepumpentrocknern ist der Energieverbrauch um etwa die Hälfte höher. Dabei ist die Trockendauer des thermoelektrischen Wäschetrockners jedoch deutlich geringer. Der TE-Wäschetrockner ist in der Lage, Wäsche fast doppelt so schnell wie handelsübliche Geräte mit

geschlossenem Prozessluftkreislauf zu trocknen. Für Waschsalons und andere Nutzer, bei denen die Zeit - bspw. über Personalkosten - den größten Kostenfaktor bildet, stellt der TE-Trockner eine Alternative zu am Markt verfügbaren Wäschetrocknern dar. Er bietet damit ein hohes Potential zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes zukünftiger Trocknergenerationen. Fortschritte in der Materialwissenschaft könnten hier zu einer weiteren Verbesserung des thermoelektrischen Wärmepumpeneffekts und damit zu einer weiteren Reduzierung des Energieverbrauchs führen.

Im Rahmen des durchgeführten Vorhabens wurde somit erstmalig das Konzept eines thermoelektrischen Wäschetrockners ganzheitlich sowohl theoretisch als auch experimentell detailliert untersucht. Es konnten wichtige Erkenntnisse bezüglich der Auslegung, wichtiger Einflussgrößen und des Potentials dieses Konzepts gewonnen werden.

Literaturverzeichnis

- [Alp17] T. Alpögger, „Ganzheitliche Untersuchung von Haushalts-Wäschetrocknern insbesondere hinsichtlich des Einsatzes umweltfreundlicher Kältemittel und Steigerung der Energieeffizienz“, *Abschlussbericht DBU*, AZ. 31753, wird 2017 eingereicht.
- [BGE10] K. Becken, D. de Graaf und C. Elsner, „Fluorierte Treibhausgase vermeiden. Wege zum Ausstieg“, Umweltbundesamt, 2010.
- [BP84] H. G. Bock und K. J. Plitt, „A Multiple Shooting algorithm for direct solution of optimal control problems.“, in *9th IFAC World Congress*, Budapest, 1984.
- [Den17] dena, „www.dena.de,“ [Online]. Available: https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/1381_Energiespartipps_fuer_Haushaltsgeraete_ESD.pdf. [Zugriff: April 2017].
- [Die15] C. Dierks, *Ökologische Bewertung verschiedener Wäschetrocknersysteme*, Studienarbeit an der TU Braunschweig, 2015.
- [DLS01] M. Diehl, D. B. Leineweber und A. A. S. Schäfer, „MUSCOD-II Users' Manual“, IWR-Preprint, Heidelberg, 2001.
- [Fer17] Ferrotec-Nord, „Property of materials,“ Ferrotec-Nord, [Online]. Available: <http://www.ferrotec-nord.com/support/property-materials>. [Zugriff März 2017].
- [Fli12] O. Flieger, „Messtechnische Untersuchung eines Wärmepumpen-Wäschetrockners“, Bachelorarbeit an der TU Braunschweig, 2012.
- [Gem17] GEMIS, „CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung in Deutschland nach Art der Erzeugung im Jahr 2010,“ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/233868/umfrage/co2-emissionen-bei-der-stromerzeugung-nach-erzeugungsart/>, 2017.
- [Grä14] M. Gräber, „Energieoptimale Regelung von Kälteprozessen“, Dissertation an der TU Braunschweig, 2014.
- [Gro13] A. Grond, „Die Marktsättigung liegt unter 50 Prozent...“, *ref-Elektrohändler*, Bd. 6, 2013.
- [Ich16] P. Icha, „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxidemissionen der deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015“, Umweltbundesamt, 2016.

- [JLKo9] C. Junior, N. Lemke und J. Köhler, „Modelling of a Thermoelectric HVAC System for Automobiles“, *Journal of Electronic Materials*, Bd. 38, Nr. 7, 2009.
- [JRTo8] C. Junior, C. Richter, W. Tegethoff, N. Lemke und J. Köhler, „Modeling and Simulation of a Thermoelectric Heat Exchanger using the Object Oriented Library TIL“, in *Proceedings of the 6th International Modelica Conference*, Bielefeld, 2008.
- [Jun10] C. Junior, „Analyse thermoelektrischer Module und Gesamtsysteme“, Dissertation an der TU Braunschweig, 2010.
- [KSW13] R. Kories, H. Schmidt-Walter, „Taschenbuch der Elektrotechnik“, Verlag Europa Lehrmittel, 2013.
- [LBS03] D. Leineweber, I. Bauer, A. A. S. Schäfer, H. G. Bock und J. P. Schlöder, „An Efficient Multiple Shooting Based Reduced SQP Strategy for Large-Scale Dynamic Process Optimization (Parts I and II).“, *Computers and Chemical Engineering*, Bd. 27, pp. 157-174, 2003.
- [Öko12] Öko-Institut, „Energieverbrauch von Wäschetrocknern“, Öko-Institut e.V. und Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz, 2012.
- [QO17] Quick-Ohm, „Einbau und Montage von Peltierelementen,“ [Online]. Available: <http://quick-cool-shop.de/peltierelemente-know-how/einbau-und-montage-von-peltierelementen/>. [Zugriff: März 2017].
- [RGo4] N. Rüdener und C.-O. Gensch, „Energy demand of tumble dryers with respect to differences in technology and ambient conditions,“ Öko-Institut e.V., 2004.
- [RGLo8] I. Rüdener, C.-O. Gensch und R. Liu, „Vergleich der Umweltauswirkungen und Kosten verschiedener Wäschetrocknersysteme,“ Öko-Institut e.V., 2008.
- [SB14] Statistisches Bundesamt, „Ausstattung privater Haushalte mit elektrischen Haushalts- und sonstigen Geräten - Deutschland,“ 2014.
- [Som14] Deutsche Bundesstiftung Umwelt, „Untersuchung einer thermoelektrischen Wärmepumpe für den Einsatz in Elektrofahrzeugen“, *Abschlussbericht DBU*, AZ. 28528, 2014.
- [Som17] R. Somdalen, „Thermodynamische Analyse eines thermoelektrischen Wäschetrockners“, Dissertation an der TU Braunschweig (wird 2017 eingereicht), 2017.
- [Teg99] W. Tegethoff, „Eine objektorientierte Simulationsplattform für Kälte- Klima- und Wärmepumpensysteme“, *Fortschritt-Bericht VDI*, Bd. 19, Nr. 118, 1999.

- [Uba17a] Umweltbundesamt, „Energieverbrauch privater Haushalte“, [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/energieverbrauch-privater-haushalte>. [Zugriff: März 2017].
- [Uba17b] Umweltbundesamt, „Wäschetrockner“, [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/elektrogeraete/waeschetrockner#textpart-1>. [Zugriff: März 2017].
- [VDI13] VDI-Wärmeatlas, Verein Deutscher Ingenieure, Springer-Verlag, 2013.