

# MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades  
„Master of Science in Engineering“  
im Studiengang Maschinenbau-Master

## Experimentelle Untersuchung der Integration eines Vortex Tubes in einen thermodynamischen Kühlkreislauf

Ausgeführt von: Bartosz STOKLOSA, BSc.  
Personenkennzeichen: 2310804025

1. BegutachterIn: FH-Prof. PD DI Dr. techn. Maximilian Lackner, MBA
2. BegutachterIn: Mag. Dr. Richard Jurisits

Wien, 24.05.2025



## Eidesstattliche Erklärung

„Ich, als Autor / als Autorin und Urheber / Urheberin der vorliegenden Arbeit, bestätige mit meiner Unterschrift die Kenntnisnahme der einschlägigen urheber- und hochschulrechtlichen Bestimmungen (vgl. Urheberrechtsgesetz idgF sowie Satzungsteil Studienrechtliche Bestimmungen / Prüfungsordnung der FH Technikum Wien idgF).

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und Gedankengut jeglicher Art aus fremden sowie selbst verfassten Quellen zur Gänze zitiert habe. Ich bin mir bei Nachweis fehlender Eigen- und Selbstständigkeit sowie dem Nachweis eines Vorsatzes zur Erschleichung einer positiven Beurteilung dieser Arbeit der Konsequenzen bewusst, die von der Studiengangsleitung ausgesprochen werden können (vgl. Satzungsteil Studienrechtliche Bestimmungen / Prüfungsordnung der FH Technikum Wien idgF).

Weiters bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit bis dato nicht veröffentlicht und weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt habe. Ich versichere, dass die abgegebene Version jener im Uploadtool entspricht.“

Wien, 24.05.2025

.....  
Ort, Datum

.....  
Unterschrift

# Kurzfassung

Angesichts des steigenden Bedarfs an energieeffizienten Kühlsystemen untersucht diese Masterarbeit die Integration eines Vortex Tubes in einen thermodynamischen Kühlkreislauf, um dessen Leistungszahl (COP) zu erhöhen. Das Vortex Tube ist ein einfaches Gerät ohne bewegliche Teile und trennt Druckluft in einen warmen und kalten Luftstrom. Die Idee ist es, die jeweiligen Luftströme dem Verdampfer und Verflüssiger zuzuführen, um eine gezielte Optimierung und Effizienzsteigerung dieser Komponenten zu generieren.

Vier Szenarien wurden entwickelt und analysiert: Szenario 1 (Referenzszenario, Kühlschrank ohne Integration des Vortex Tubes), Szenario 2 (Warmluft auf Verdampfer), Szenario 3 (Kaltluft auf Verflüssiger) und Szenario 4 (Kombination beider Luftströme). Die theoretische Analyse ergab COP-Werte von 4,00 (Szenario 1), 5,44 (+36 %, Szenario 2), 6,09 (+52,3 %, Szenario 3) und 7,44 (+86 %, Szenario 4).

Für die experimentelle Untersuchung wurde ein Kühlschrank („Bomann“ KB7235, Deutschland) modifiziert, indem die Schaumstoffisolierung entfernt und Pneumatikschläuche für die Luftströme des Vortex Tubes an dem Verdampfer und Verflüssiger angebracht wurden. Eine aluminisierte Hitzeschutzmatte ersetzte die Werksisolierung, um Wärmeverluste zu minimieren. Die Kühlleistung wurde anhand der Temperaturabnahme eines Wasserbehälters im Kühlschrank über einem Zeitraum von 30 Minuten gemessen.

Die experimentellen COP-Werte betragen 1,62 (Szenario 1), 1,71 (+6,2 %, Szenario 2), 2,01 (+24,2 %, Szenario 3) und 1,98 (+22,2 %, Szenario 4).

Zukünftige Forschung sollte sich aus diesem Grund auf die Optimierung der VT-Geometrie und die Verbesserung der Energieeffizienz von Druckluftquellen konzentrieren, um dadurch das volle Potenzial dieser Technologie auszuschöpfen.

## Abstract

In view of the increasing demand for energy-efficient cooling systems, this master's thesis investigates the integration of a vortex tube into a thermodynamic cooling circuit in order to increase its coefficient of performance (COP). The Vortex Tube, a simple device with no moving parts, separates compressed air into a hot and cold air stream. The idea is to feed the respective air flows to the evaporator and condenser, thereby generating a targeted optimisation and increase in efficiency of these components.

Four scenarios were developed and analysed: Scenario 1 (reference scenario, refrigerator without integration of vortex tube), Scenario 2 (hot air to evaporator), Scenario 3 (cold air to condenser) and Scenario 4 (combination of both air flows). The theoretical analysis resulted in COP values of 4.00 (scenario 1), 5.44 (+36 %, scenario 2), 6.09 (+52.3 %, scenario 3) and 7.44 (+86 %, scenario 4).

For the experimental study, a refrigerator ("Bomann" KB7235, Germany) was modified by removing foam insulation and attaching pneumatic hoses for the air flows of the vortex tube to the evaporator and condenser. An aluminised heat protection mat replaced the factory insulation to minimise heat loss. The cooling capacity was measured via the temperature drop of a water tank in the refrigerator over 30 minutes.

The experimental COP values were 1.62 (Scenario 1), 1.71 (+6.2 %, Scenario 2), 2.01 (+24.2 %, Scenario 3) and 1.98 (+22.2 %, Scenario 4).

Future research should therefore focus on optimising the VT geometry and improving the energy efficiency of compressed air sources to exploit the full potential of this technology.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während meines Studiums und insbesondere bei der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt und begleitet haben.

Mein tief empfundener Dank gilt in erster Linie meiner Familie und meiner Freundin. Meinem Vater, Zbigniew, zu dem ich stets aufgeblickt habe und dessen Begeisterung für Technik über seinen eigenen Vater – meinen Großvater – auch auf mich übergegangen ist. Diese generationsübergreifende Leidenschaft war eine der Schlüsselfaktoren dafür, dass ich selbst ein starkes Interesse an Naturwissenschaften und Technik entwickelt habe. Ich bin dankbar dafür, dass ich mich mit beiden stets über technische Themen austauschen konnte und viel von ihnen lernen durfte.

Meiner Mutter Halina danke ich von Herzen für ihr Einfühlungsvermögen, ihre Warmherzigkeit und ihre unerschütterliche Unterstützung. Ihr Zuspruch hat mir in herausfordernden Zeiten Mut gemacht und mir geholfen, mit Prüfungsängsten und Stress umzugehen. Sie hat mir nie das Gefühl gegeben, allein zu sein, und dafür bin ich ihr zutiefst dankbar.

Ein ebenso großer Dank gilt meinem großen Bruder Oskar, meinem besten Freund, der mich ursprünglich auf die Idee gebracht hat, Maschinenbau an der Fachhochschule Technikum zu studieren. Seine Motivation und sein Zuspruch haben mich maßgeblich beeinflusst, diesen Weg überhaupt einzuschlagen. Ich habe ihn – ebenso wie meine Eltern – stets für seinen Werdegang, sein Wissen und seine Klarheit bewundert und mich gerne von seinem Rat leiten lassen. Ohne ihn wäre ich heute vermutlich nicht dort, wo ich stehe.

Und nicht zuletzt danke ich meiner Freundin, Valerie, die mich tagtäglich begleitet und unterstützt hat – besonders in Phasen großer Belastung, wenn Studium und Arbeit parallel viel Energie erforderten. Trotz eigener Verpflichtungen im Studium und Beruf hat sie sich immer Zeit genommen, mir zur Seite zu stehen, mich zu motivieren und aufzufangen, wenn es nötig war. Ich bin sehr dankbar, sie an meiner Seite zu wissen.

Mein besonderer Dank gilt darüber hinaus Herrn FH-Prof. PD DI Dr. techn. Maximilian Lackner, MBA, der mich mit außergewöhnlichem Engagement durch alle Phasen dieser Arbeit begleitet hat. Seine jederzeitige Erreichbarkeit, seine fachliche Kompetenz und seine motivierende Art waren für mich von unschätzbarem Wert. Ohne seine Unterstützung wäre die Umsetzung dieser Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen. Ebenso danke ich Herrn Mag. Dr. Richard Jurisits für seine fachlichen Rückmeldungen und seine Unterstützung im Rahmen der Betreuung.

Ein herzliches Dankeschön gilt auch Herrn Radu Dionisie Curcean, Werkstättenmeister an der Fachhochschule, der mich beim Versuchsaufbau mit seiner Erfahrung und Hilfsbereitschaft tatkräftig unterstützt hat.

Ebenso danke ich der Firma „EPU TEC GmbH“ für die Leihgabe des Vortex Tubes samt Zubehör, die die praktische Durchführung der Experimente überhaupt erst möglich gemacht hat.

# Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung und Zielsetzung .....	1
1.1	Kontext, Motivation, Stand der Technik.....	1
1.2	Problemstellung / Forschungsfragen.....	2
1.2.1	Problemstellung.....	2
1.2.2	Forschungsfragen .....	3
1.3	Zielsetzung .....	4
1.4	Lösungsansatz .....	5
1.5	Projektressourcen .....	6
1.5.1	Am Projekt beteiligten Personen & Unternehmen/Partner .....	6
1.5.2	Projektrelevante Ressourcen und deren Sicherstellung .....	6
2	Theoretische Grundlagen.....	7
2.1	Was sind Vortex Tubes? .....	7
2.2	Wie funktionieren Vortex Tubes? .....	9
2.3	Anwendungsgebiete des Vortex Tubes.....	12
3	Integration des Vortex Tubes in thermodynamische Kreisprozesse .....	14
3.1	Theoretische Grundlagen des thermodynamischen Ansatzes .....	14
3.2	Analyse der Komponenten .....	19
3.2.1	Klassischer Kreislauf ohne Vortex Tube .....	19
3.2.2	Integration des Vortex Tubes .....	20
3.2.3	Thermodynamische Effekte.....	21
3.3	Theoretische Bewertung der Szenarien .....	22
3.3.1	Szenario 1: Klassischer Kreislauf ohne Vortex Tube .....	23
3.3.2	Szenario 2: Warmstrom auf den Verdampfer .....	26
3.3.3	Szenario 3: Kaltstrom auf den Verflüssiger .....	28
3.3.4	Szenario 4: Kombinierte Nutzung von Warm- und Kaltstrom .....	30
3.3.5	Zusammenfassung Szenarienanalyse .....	32
4	Experimentelle Untersuchung und Versuchsaufbau .....	34
4.1	Komponentenbeschreibung .....	34
4.1.1	„Bomann“ KB7235 Kühlschrank .....	34
4.1.2	Vortex Tube „EXAIR“ 3208.....	37
4.1.3	Aluminisierte Hitzeschutzmatte .....	39

4.1.4	Temperatursensor .....	39
4.2	Versuchsablauf.....	40
4.3	Szenario 1 – Referenzmessung ohne Vortex Tube .....	43
4.4	Szenario 2 – Warmluft auf Verdampfer .....	46
4.5	Szenario 3 – Kaltluft auf Verflüssiger .....	51
4.6	Szenario 4 – Kombinierte Nutzung von Warmluft und Kaltluft .....	54
4.7	Vergleichende Darstellung der Temperaturverläufe.....	59
5	Schlussfolgerung und Ausblick .....	61
5.1	Schlussfolgerung.....	61
5.2	Diskussion .....	62
5.3	Ausblick .....	64
6	Zusammenfassung.....	66
7	Literaturverzeichnis .....	67
	Abbildungsverzeichnis .....	70
	Tabellenverzeichnis .....	71
	Abkürzungsverzeichnis .....	72
	Variablenverzeichnis.....	73
	Anhang: Dokumentationstabelle für verwendete KI-Tools.....	76

# 1 Problemstellung und Zielsetzung

## 1.1 Kontext, Motivation, Stand der Technik

Der Energieverbrauch in Haushalten und der Industrie, insbesondere durch Klimaanlage und Wärmepumpen, wird aktuell immer stärker hinterfragt, da der Bedarf an nachhaltigen und energieeffizienten Technologien stetig zunimmt. Diese Systeme sind zentrale Bestandteile moderner Heiz- und Kühlanwendungen, tragen jedoch wesentlich zum Gesamtenergiebedarf von Gebäuden bei.

Dabei besteht die Herausforderung darin, diese Systeme sowohl moderner und effizienter zu gestalten, als auch den Energieverbrauch sowie die damit verbundenen Betriebskosten spürbar zu senken, um ökologische und ökonomische Anforderungen zu erfüllen.

Ein vielversprechender Ansatz zur Effizienzsteigerung dieser Systeme ist dabei die Integration des Vortex Tubes in den Kreisprozess. Das Vortex Tube ist ein Gerät, das die einfließende Druckluft in zwei Luftströme mit unterschiedlichen Temperaturen trennt [1] [2]. Aufgrund seines einfachen und robusten Aufbaus wird das Vortex Tube heutzutage vor allem in der Industrie verwendet, insbesondere zur gezielten Kühlung von Werkzeugen [3]. Sein Potenzial für größere Heiz- und Kühlsysteme, wie dies bei Wärmepumpen oder Klimaanlage der Fall ist, wurde bisher weitgehend noch nicht erforscht.

Diese Arbeit analysiert das Potenzial der Integration des Vortex Tubes in den Kreisprozess, um neue Ansätze für energieeffiziente Kühlsysteme zu entwickeln. Durch die nachfolgende systematische Untersuchung sollen Erkenntnisse gewonnen werden, die die Grundlage für zukünftige Optimierungen und Anwendungen in der Heiz- und Kühltechnik bilden.

## **1.2 Problemstellung / Forschungsfragen**

### **1.2.1 Problemstellung**

Die Integration des Vortex Tubes (VT) in thermodynamische Kreisprozesse bietet einerseits vielversprechende Potenziale, andererseits aber auch eine große Anzahl an Herausforderungen. Besonders kritisch ist die Abhängigkeit des Vortex Tubes von einer energieintensiven Druckluftversorgung, welche in einer Vielzahl an thermodynamischen Anwendungen vorkommt und dabei einen erheblichen Energieaufwand verursacht. Darüber hinaus stellt die mangelnde Steuerbarkeit der Temperaturtrennung innerhalb des VT eine Einschränkung dar, insbesondere weil sie die Anpassung an die spezifischen Anforderungen eines Kreisprozesses erschwert. Hinzu kommen die thermodynamischen Verluste und der geringe Wirkungsgrad, die den potenziellen Nutzen des Vortex Tubes in Frage stellen. Diese Unsicherheiten begrenzen den breiten Einsatz des VT in bestehenden Kreisprozessen und führen zu offenen Fragen hinsichtlich seiner Effizienz und Wirtschaftlichkeit.

Ein zusätzliches Problem, welches die Vortex Tube Integration mit sich bringt, stellt die Wirtschaftlichkeit dar. Die hohen Kosten der Druckluftversorgung und die Modifikation bestehender Systeme können den nutzbaren Effizienzgewinn übersteigen. Offene Fragen bestehen zudem hinsichtlich der Skalierbarkeit für großtechnische Anwendungen sowie deren Langzeitstabilität unter realen Betriebsbedingungen. Diese Unsicherheiten begrenzen den breiten Implementierungsbereich dieser Technologie und erfordern eine detaillierte Analyse ihrer Machbarkeit.

Diese Masterarbeit widmet sich der systematischen Untersuchung dieser Herausforderungen und adressiert die technischen und thermodynamischen Grenzen der VT-Integration. Das Ziel ist es, die Effizienz und Wirtschaftlichkeit dieser Technologie zu bewerten und Optimierungspotenziale für zukünftige Anwendungen in energieeffizienten Kühlsystemen zu identifizieren.

## 1.2.2 Forschungsfragen

Um die Problemstellung systematisch zu bearbeiten, werden im Rahmen dieser Masterarbeit folgende Forschungsfragen untersucht und ausgearbeitet:

1. *Welche Auswirkungen hat die Integration eines Vortex Tubes auf die Effizienz (COP) und Leistung eines thermodynamischen Kreisprozesses, im Speziellen eines Kühlsystems (Kühlschrank)?*

Ziel ist es herauszufinden, wie sich die Einführung eines Vortex Tubes in ein offenes System mit Druckluftanschluss auf den Wirkungsgrad und die thermodynamischen Eigenschaften des Prozesses auswirkt.

2. *Welche der drei Varianten für die Implementierung und Nutzung des Vortex Tubes bietet die größten Vorteile, vor allem in Bezug auf Effizienz für den thermodynamischen Kreisprozess?*

Dabei werden folgende Szenarien betrachtet: warme Luft nach dem VT trifft auf den Verdampfer, kalte Luft nach dem VT trifft auf den Verflüssiger, kombinierte Nutzung beider Luftströme.

3. *Führt die Nutzung des Vortex Tubes zu einer signifikanten Effizienzsteigerung des offenen Kühlsystems im Vergleich zum geschlossenen System bzw. sind die zusätzlichen Energieaufwände für die Druckluftherzeugung die in die COP-Berechnung einfließen, gerechtfertigt?*

Mit dieser Frage soll untersucht werden, ob die potenziellen Vorteile des Vortex Tubes die zusätzlichen Energieaufwände für den Druckluftanschluss rechtfertigen und ob die Effizienzsteigerung ausreichend ist, um den Einsatz in solchen Anwendungen zu empfehlen.

Durch die Beantwortung dieser Forschungsfragen soll ein fundierter Überblick über die Eignung des Vortex Tubes für offene thermodynamische Systeme gegeben werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Vergleich zwischen idealisierter Simulation und experimentellen Versuchen unter realen Bedingungen in einem modifizierten Kühlschrank.

## 1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Masterarbeit ist es, die Einsatzmöglichkeiten und die Effizienz eines Vortex Tubes in thermodynamischen Kreisprozessen zu analysieren und zu bewerten. Aufbauend auf einer theoretischen Vorbetrachtung, wird die Integration des Vortex Tubes experimentell validiert, um konkrete Schlussfolgerungen zu dem realen Einsatz treffen zu können.

Am Beispiel eines modifizierten Kühlsystems wird untersucht, ob das Vortex Tube zur Steigerung des Wirkungsgrades beitragen kann. Dabei liegt der Fokus auf der Analyse der Einzelwirkungen der jeweiligen Luftströme als auch auf der kombinierten Nutzung beider.

Die Arbeit hat folgende konkrete Ziele:

- Effizienzanalyse: Quantifizierung des Einflusses des Vortex Tubes auf den COP-Wert eines offenen Kühlsystems
- Szenarienvergleich: Analyse und Vergleich des klassischen geschlossenen Modellkreislaufs (Referenzszenario) mit drei unterschiedlichen Szenarien eines offenen Systems
- Experimentelle Validierung: Analyse des Unterschieds zwischen den idealisierten theoretischen und experimentellen Modellen
- Anwendungsempfehlungen: Bewertung über die Eignung des Vortex Tubes für den Einsatz in neuen energieeffizienten Kühlsystemen

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen nicht nur zur Klärung der theoretischen und praktischen Einsatzmöglichkeiten des Vortex Tubes beitragen, sondern auch als Grundlage für die Weiterentwicklung innovativer, energieeffizienter Heiz- und Kühlsysteme dienen sowie Anhaltspunkte für zukünftige empirische Untersuchungen liefern.

## 1.4 Lösungsansatz

Im ersten Schritt erfolgt eine konzeptionelle Analyse des bestehenden Kühlsystems eines handelsüblichen Kühlschranks. Schnell hat sich herausgestellt, dass ein Mini-Kühlschrank für die Versuchszwecke aufgrund seiner kompakten Bauweise praktischer ist. Ziel ist es, die thermodynamischen Eigenschaften und die Komponentenverteilung im klassischen Kältekreis zu erfassen.

Im zweiten Schritt erfolgt eine intensive Auseinandersetzung mit den thermodynamischen Grundlagen, insbesondere mit dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik, dem Energieerhaltungssatz sowie der Berechnung des Coefficient of Performance (COP). Diese Grundlagen bilden die Basis für die Bewertung der Effizienzanalyse in dem späteren Verlauf der Arbeit.

Im dritten Schritt wird das Vortex Tube als ergänzendes Element identifiziert und hinsichtlich ihrer physikalischen Wirkweise sowie potenzieller optimaler Integrationspunkte am Kühlschrank untersucht.

Der vierte Schritt umfasst eine umfangreiche Literaturrecherche zu den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Vortex Tubes in Kältesystemen, sowie eine technische Bewertung vergleichbarer Studien und Konzepte.

Im fünften Schritt wird ein experimenteller Aufbau konzipiert und in der FH-Werkstatt umgesetzt. Zunächst wird der Kühlschrank für die Integration des Vortex Tubes präpariert. Anschließend werden drei verschiedene Szenarien zur Integration des Vortex Tube getestet. Im sechsten Schritt erfolgt die messtechnische Erfassung der Temperaturen in den jeweiligen Versuchsszenarien und die Daten werden mit dem klassischen System verglichen.

Im siebten und abschließenden Schritt wird die Effizienzveränderung bewertet, die Auswirkungen auf das Gesamtsystem analysiert und Empfehlungen für eine potenzielle Weiterentwicklung formuliert.

## **1.5 Projektressourcen**

### **1.5.1 Am Projekt beteiligten Personen & Unternehmen/Partner**

- Bartosz STOKLOSA, BSc – Projektleitung und Verfasser dieser Masterarbeit
- FH-Prof. PD DI Dr. techn. Maximilian LACKNER, MBA – 1. Betreuer
- Mag. Dr. Richard JURISITS – 2. Betreuer
- Radu PAVALACHE – Leitung Technische Kundenberatung „EXAIR“ Produkte bei „EPU TEC GmbH“
- Radu Dionisie CURCEAN – Leitung Werkstätten an Fachhochschule Technikum Wien

### **1.5.2 Projektrelevante Ressourcen und deren Sicherstellung**

- „BOMANN“ KB7235 Kühlschrank: handelsüblich beschafft, dient als Basisanlage für die Integration des Vortex Tube
- Vortex Tube „EXAIR“ 3208: Leihgabe des VT-Modells samt „EXAIR“ Cooling Kit (BP3908J) und Heißenden-Schalldämpfer (3903) von der Firma „EPU TEC GmbH“  
<https://www.eputec.de/exair-wirbelrohr/wirbelrohr-vortex-tube/>
- Druckluftversorgung: Nutzung vorhandener Druckluftversorgung der FH-Werkstatt mit maximaler Druckluft bis 8 bar

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Was sind Vortex Tubes?

Das Vortex Tube, auch als Wirbelrohr bekannt, ist eine zylindrische Vorrichtung, die einen Massestrom, in der Regel Druckluft, in zwei separate Ströme mit unterschiedlichen Temperaturen aufteilen kann. Die Luft wird in einen kalten und einen warmen Strom aufgeteilt, die an entgegengesetzten Enden des Rohres austreten. Bemerkenswert ist, dass dies ohne bewegliche Teile oder chemische Reaktionen geschieht [1].

Obwohl der Aufbau einfach erscheint, sind die physikalischen Prozesse im Inneren des Vortex Tubes hochkomplex und bis heute nicht vollständig verstanden, was das Gerät wissenschaftlich relevant macht. In der Industrie wird das Vortex Tube vor allem zur Erzeugung von Wärme- und Kaltluftströmen aus einer einzigen Druckluftquelle eingesetzt [4].

Die Erfindung des Vortex Tube geht auf den französischen Wissenschaftler und Ingenieur Georges J. Ranque zurück, der 1928 mithilfe von Experimenten mit der Entwicklung einer Wirbelpumpe begann und erstmals daran arbeitete, eine solche herzustellen [5]. Im Zuge dessen versuchte er, seine neue Erfindung zu optimieren und zu kommerzialisieren, jedoch ohne Erfolg. Seine Idee fand zunächst wenig Beachtung, da der Wirkungsgrad des Apparates unzureichend und dementsprechend ineffizient war. Später nahm sich der deutsche Ingenieur Rudolf Hilsch der Konstruktion an und verbesserte sie erheblich [5]. Durch systematische Untersuchungen verschiedener Parameter wie Geometrie und Luftzufuhr gelang es Hilsch, den Wirkungsgrad des Vortex Tubes zu erhöhen und erste Erklärungsansätze zu entwickeln. Diese Arbeiten wurden nach dem Zweiten Weltkrieg wieder aufgenommen und vertieft [6].

Aufgrund der Komplexität der inneren Vorgänge ist die Simulation des Vortex Tubes besonders anspruchsvoll, was seine Optimierung und Weiterentwicklung erschwert. Kommerzielle Anwendungen finden sich vor allem dort, wo Zuverlässigkeit, Kompaktheit und geringe Kosten gefragt sind, z. B. bei der Kühlung von Maschinenteilen oder Lebensmitteln sowie bei der Regelung von Gasströmen in industriellen Prozessen [4]. Das Vortex Tube ist unter verschiedenen Namen bekannt, darunter Ranque Vortex Tube oder Ranque-Hilsch Tube, benannt nach den beiden Hauptentwicklern. In dieser Arbeit wird zur Vereinfachung die Bezeichnung „Vortex Tube“ verwendet.

Grundlegend lässt sich das Vortex Tube, wie in nachfolgender *Abbildung 1*, in zwei Hauptkategorien unterteilen: das Counterflow-Vortex Tube und das Uni-flow Vortex Tube.

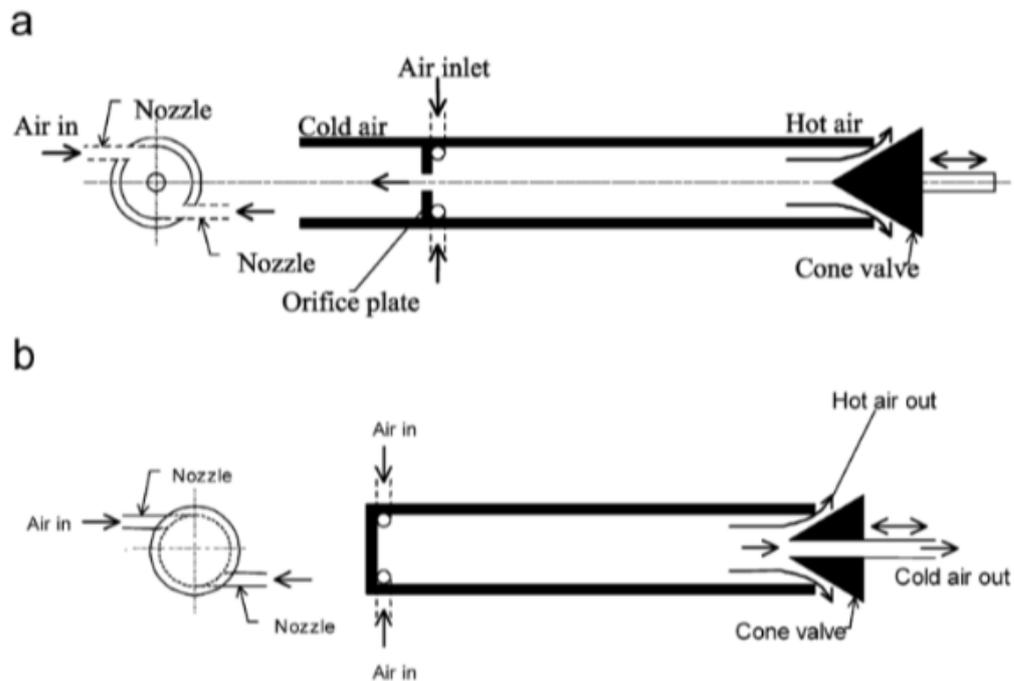


Abbildung 1: Funktionsweise von Counterflow- Vortex Tube (a) und Uni-Flow Vortex Tube (b). Quelle:[1]

Das Counterflow-Vortex Tube führt dabei kalte und warme Luft in entgegengesetzte Richtungen. Es besitzt einen Einlassblock mit Düsen, durch die Druckluft tangential in das Rohr eingeleitet wird. Im Inneren entsteht ein stark rotierender Wirbel, der durch Zentrifugalkräfte an der Rohrwandung gehalten wird. Der Massestrom durchströmt das Rohr und tritt an einem konischen Ventil aus, das die Menge des austretenden Luftstroms reguliert [3]. Etwa 30-70 % der Luft entweichen dabei an dieser Stelle, während der Rest im Gegenstrom zurückgeführt wird, wodurch sich die Luft in der Nähe der Achse abkühlt. Dieses Phänomen wird Ranque-Hilsch-Effekt genannt [1] .

Das Uni-Flow Vortex Tube unterscheidet sich hingegen dadurch, dass die kalte und warme Luft konzentrisch austreten, wobei die warme Luft den kalten Luftstrom umgibt. Die Temperaturdifferenz zwischen den Strömen kann je nach Betriebsbedingungen bis zu 140-160 °C betragen. Untersuchungen zeigen, dass höhere Eintrittsdrücke die Temperaturdifferenz vergrößern. Zum Beispiel führte ein Eintrittsdruck von 500 kPa zu einer Temperaturdifferenz von 90 °C, während bei 100 kPa nur 30 °C erreicht wurden. [2].

## 2.2 Wie funktionieren Vortex Tubes?

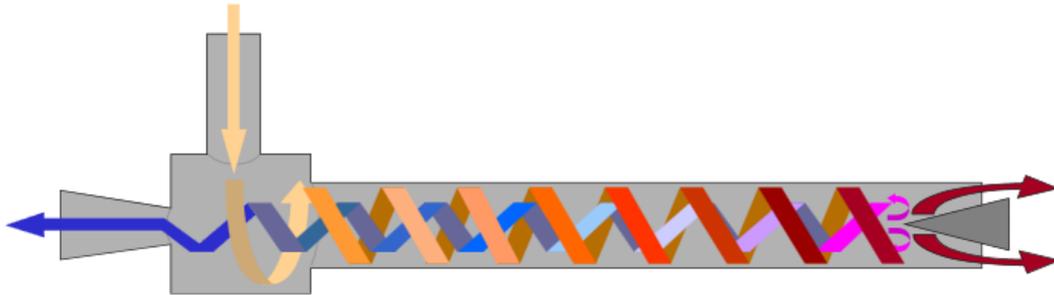


Abbildung 2: Schematische Funktionsweise Vortex Tube Quelle [6]

Das Vortex Tube funktioniert durch die Trennung eines angeschlossenen Druckluftstroms in zwei Ströme mit unterschiedlichen Temperaturen. Der zugrundeliegende Prozess basiert auf der schnellen Rotationsbewegung der Luft innerhalb des Rohres, die durch Zentrifugalkräfte eine Energieverteilung im Luftstrom bewirkt. Die Druckluft wird tangential in die Wirbelkammer des Vortex Tubes eingeleitet. Durch die tangentiale Einströmung wird die Luft in eine starke Drehbewegung versetzt, wodurch ein stabiler Wirbel entsteht. Die dabei entstehenden Zentrifugalkräfte bewirken, dass die Luftmoleküle mit höherer kinetischer Energie – und damit höherer Temperatur – zur Außenwand des Rohres gedrängt werden, während die energieärmeren und damit kälteren Moleküle in der Nähe der Achse verbleiben. Während die Luft entlang des Rohres strömt, bilden sich zwei getrennte Luftströme: ein äußerer heißer Strom und ein innerer kalter Strom. Der äußere Strom mit höherer Energie wird durch die Öffnungen am Rand des Rohrs abgeleitet, während der kalte Strom in die entgegengesetzte Richtung geleitet wird und in der Mitte des Rohrs austritt [7]. Die Verteilung zwischen diesen Strömen kann durch ein konisches Ventil geregelt werden, das den Massendurchsatz des heißen Stroms steuert. Typischerweise beträgt die Verteilung etwa 40 bis 60 %, wobei der warme Strom etwa 60 % und der kalte Strom (Cold fraction)  $\mu_c = 40\%$  des gesamten Massestroms ausmacht. Diese Aufteilung wird gewählt, um eine möglichst große Temperaturdifferenz der generierten Luftströme zu erzielen, wenn beide Luftströme genutzt werden [3].

Die Effizienz des Vortex Tubes hängt stark von mehreren Faktoren ab. Der Druckunterschied zwischen zugeführter und abgeführter Luft spielt eine zentrale Rolle für die erreichbare Temperaturdifferenz. Größere Druckdifferenzen führen zu größeren Unterschieden zwischen warmer und kalter Luft. Darüber hinaus beeinflusst die Geometrie des Vortex Tubes, wie Länge und Durchmesser des Rohres oder Form und Anzahl der

Düsen, die Wirksamkeit der Temperaturtrennung. Zusätzlich wurde festgestellt, dass eine Länge von etwa dem 30 bis 50-fachen des Rohrdurchmessers optimal ist, auch wenn eine eindeutige mathematische Optimierung bisher nicht möglich war [3].

Die folgende *Abbildung 3* veranschaulicht den Effekt der unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten je nach Massenstromanteil der kalten Luft:

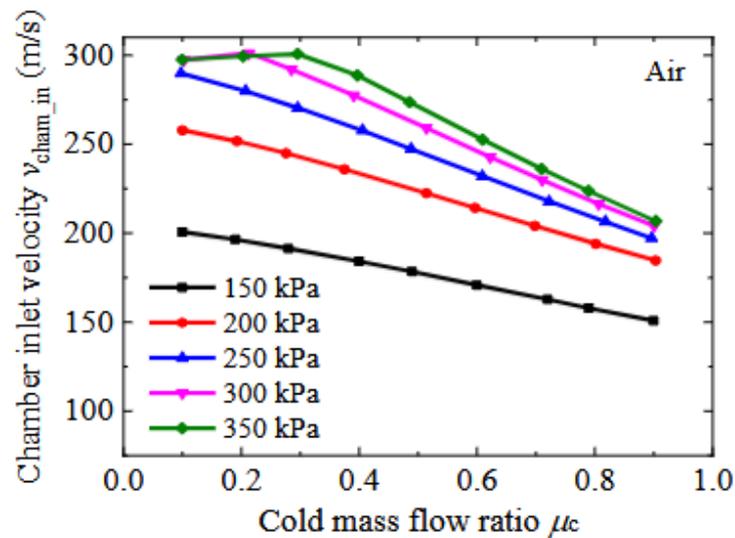


Abbildung 3: Graphen, unterschiedlicher Drücke, mit Beziehung zwischen Massenstromanteil-Kaltluft und Strömungsgeschwindigkeit im VT. Quelle: [8]

Um eine möglichst hohe Temperaturtrennung zum Erhitzen zu erzeugen, ist ein  $\mu_c$  von bis zu 30 % zu wählen, da dies bedeutet, dass 70 % des Massenstroms das heiße Ende des Vortex Tube mit der entsprechend erhöhten Temperatur verlassen.

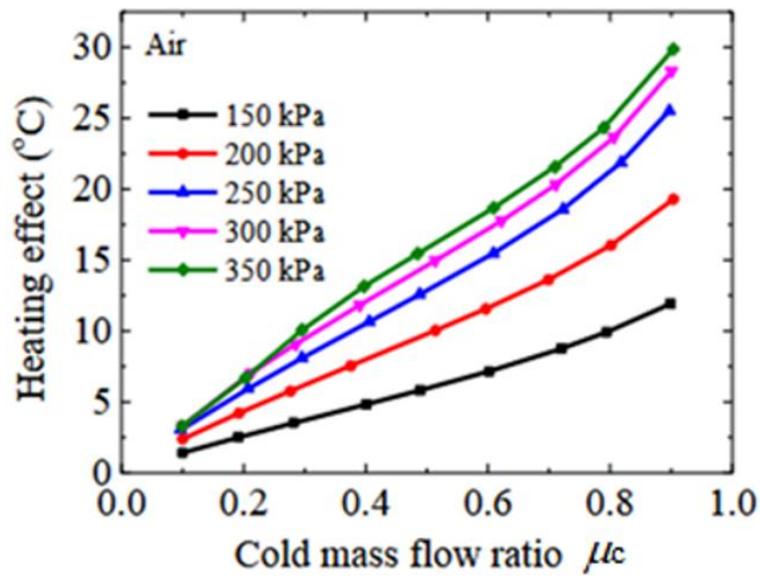


Abbildung 4: Graphen, unterschiedlicher Drücke, mit Beziehung zwischen Massenstromanteil-Kaltluft und Heizeffekt. Quelle: [8]

Die folgende Abbildung 5 zeigt, dass die maximale Abkühlung generiert werden kann, wenn der Massenstrom der kalten Luft bei ungefähr 40 % liegt.

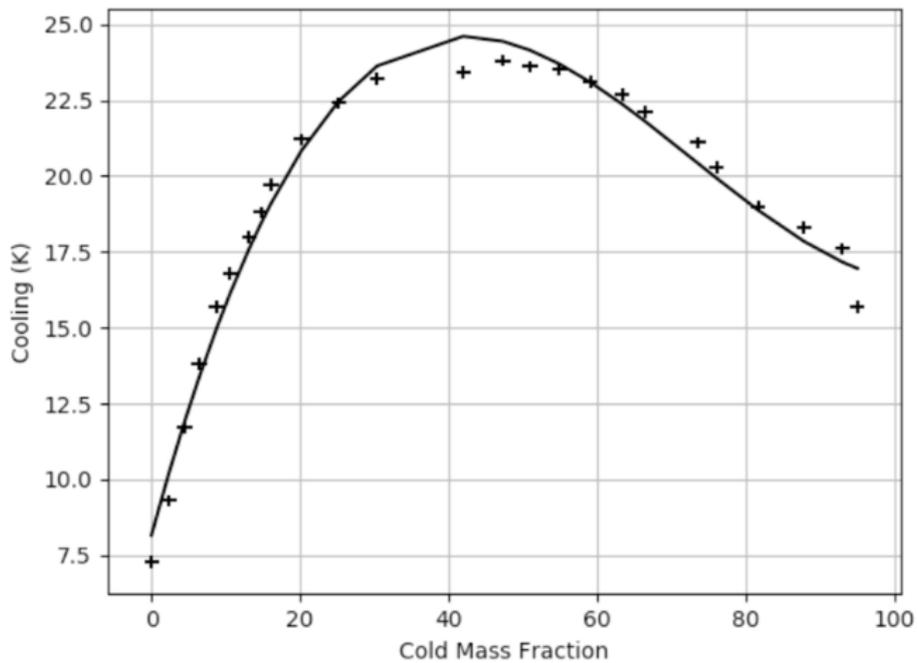


Abbildung 5: Graph mit Beziehung zwischen Massenstromanteil-Kaltluft und Abkühlung bei Vortex Tube-Länge von 1000mm. Quelle: [4]

Wird der Anteil der kalten Masse weiter über 40% erhöht, steigt die Strömungsgeschwindigkeit der kalten Luft. Dies führt zu einer Verschlechterung der Luftströmung innerhalb des Vortex Tubes und folglich zu einer Verminderung der Kühlleistung, wie Abbildung 5 verdeutlicht [3]. Eine gleichmäßige Verteilung der Moleküle und die Minimierung von Strömungsabrissen sind dabei für die Effizienz des Prozesses entscheidend. Durch die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit der Luft, die im Inneren des Rohres nahezu Schallgeschwindigkeit erreicht, wird die Energie effizienter zwischen den Molekülen verteilt, wodurch die Temperaturtrennung verbessert wird.

Obwohl das Vortex Tube in der Theorie eine faszinierende Technologie darstellt, hat es in der Praxis seine Grenzen, insbesondere die Druckluft. Vor allem der hohe Druckluftbedarf macht das System energetisch teuer, im Vergleich zu konventionellen Kühlsystemen. Zusätzlich ist der Wirkungsgrad des Vortex Tubes begrenzt, was seine Anwendung auf Nischenbereiche beschränkt. Trotz dieser Herausforderungen wird das Vortex Tube in der Industrie vor allem dort eingesetzt, wo mechanische Komponenten oder chemische Kältemittel unerwünscht sind [3].

## **2.3 Anwendungsgebiete des Vortex Tubes**

Vortex Tubes werden vorwiegend in der Industrie eingesetzt, da sie hierbei aufgrund ihrer einfachen Bauweise und Zuverlässigkeit hohen Zuspruch finden. Dabei ist ihre Funktionsweise mit der gezielten Kühlung besonders gefragt, wie sie bei Schneidwerkzeugen, Maschinenteilen oder Bearbeitungsvorgängen Anwendung findet. Hierbei ist es besonders vorteilhaft, dass Vortex Tubes eine zuverlässige und wartungsfreie Kühlung ermöglichen.

Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet, bei dem die Vortex Tubes zum Einsatz kommen, ist im Bereich der Arbeitsschutzkleidung, vor allem in Bereichen und Umgebungen mit heißen Temperaturen. In diesem Zusammenhang werden sie vor allem in Gießereien oder bei Schweißarbeiten verwendet. Da Vortex Tubes, aufgrund ihrer einfachen Bauweise auch kompakt und klein ausgeführt werden können, lassen sie sich in Schutzhelmen oder Anzügen integrieren und regulieren dabei die Temperatur im Inneren für den Arbeiter. Aufgrund der angenehmeren Arbeitstemperaturen kann somit die Arbeitseffizienz und Produktivität des Arbeiters gesteigert werden. [4] [3]

Auch in dem Bereich der Elektrotechnik finden Vortex Tubes ein breites Anwendungsfeld, wo ihre Kühlung gezielt für empfindliche Bauteile verwendet wird, um diese vor Überhitzung zu schützen. Dabei kommt ihre kompakte Bauweise besonders zu Geltung, weil sie an Orten

eingesetzt werden, bei denen herkömmliche Kühlmethoden mit Wasser- oder Ölkühlung nicht ausreichen oder nicht ausreichend Platz für diese vorhanden ist. Da in der Elektrotechnik punktuell besonders hohe Temperaturen auftreten können, ist die exakte Kühlung der Vortex Tubes besonders nützlich. [8]

Ein Bereich, in dem das Vortex Tube ebenfalls zum Einsatz kommt, ist die Trennung von Gasmischen wie beispielsweise die Abscheidung von Methan aus Erdgasströmen. Dabei wird die Fähigkeit des Vortex Tubes genutzt, Moleküle nach ihrer Masse zu sortieren und so punktuell abzutrennen. Diese besondere Fähigkeit macht sich die Öl- und Gasbranche und im Besonderen die Petrochemie zunutze. [9]

Ein weiterer Anwendungsfall von Vortex Tubes findet sich in der Automobilindustrie, da sie aufgrund ihrer Bauweise ideal in kompakte Fahrzeuge passen. [6]

Wie sich anhand der zahlreichen Anwendungsfälle erkennen lässt, hat das Vortex Tube verglichen zu den herkömmlichen Kühlmethoden einen klaren Vorteil: es besitzt keine beweglichen Teile, ist dadurch sehr kompakt gebaut, wartungsarm und ermöglicht eine schnelle Reaktion auf Temperaturveränderungen. Diese Vielzahl an Eigenschaften macht es zu einem wertvollen Werkzeug in speziellen Anwendungsfeldern, die bis dahin auf große und kostenintensive Kühlmethoden angewiesen waren oder vollständig auf eine Kühlung verzichten mussten.

## **3 Integration des Vortex Tubes in thermodynamische Kreisprozesse**

### **3.1 Theoretische Grundlagen des thermodynamischen Ansatzes**

Ein Kühlsystem, wie ein Kühlschrank, transportiert Wärmeenergie von dem Bereich niedriger Temperatur (z.B. Gefrierfach) zu einem Bereich höherer Temperatur (Umgebung des Kühlschranks). Dieser Vorgang basiert auf dem Clausius-Rankine-Prozess (CRP), einem zentralen thermodynamischen Zyklus für Heiz- und Kühlsysteme. In seiner klassischen Form durchläuft ein Arbeitsmedium vier Phasen: Kompression, Wärmeaufnahme, Expansion und Wärmeabgabe [10].

Die Integration des Vortex Tubes in den CRP eröffnet zahlreiche Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung. Das Vortex Tube trennt den Arbeitsstrom in exergiereiche (hohe nutzbare Energie) und anergiereiche (geringe nutzbare Energie) Anteile, die gezielt unterschiedlichen Prozessabschnitten zugeführt werden [11].

#### **Integration des Vortex Tubes in den Kreisprozess**

Im klassischen CRP wird der gesamte Arbeitsmediumstrom durch die eine Turbine geleitet, was die Leistungszahl durch entropiereiche Bestandteile einschränkt [11]. In Kühlsystemen übernimmt der Verdampfer jedoch die Funktion der Turbine, indem er die Wärmeaufnahme effizient steuert. Durch die Integration des Vortex Tubes wird der Arbeitsmediumstrom in zwei Anteile aufgeteilt:

- a. Warmstrom: Der exergiereiche Anteil wird dem Verdampfer zugeführt, um die Wärmeübertragung zu unterstützen und zu beschleunigen.
- b. Kaltstrom: Der anergiereiche Anteil wird dem Verdichter zugeführt, um Wärme effizienter aus dem System abzuführen.

*Abbildung 6* zeigt schematisch die Aufteilung der Luftströme nach dem Vortex Tube [12]:

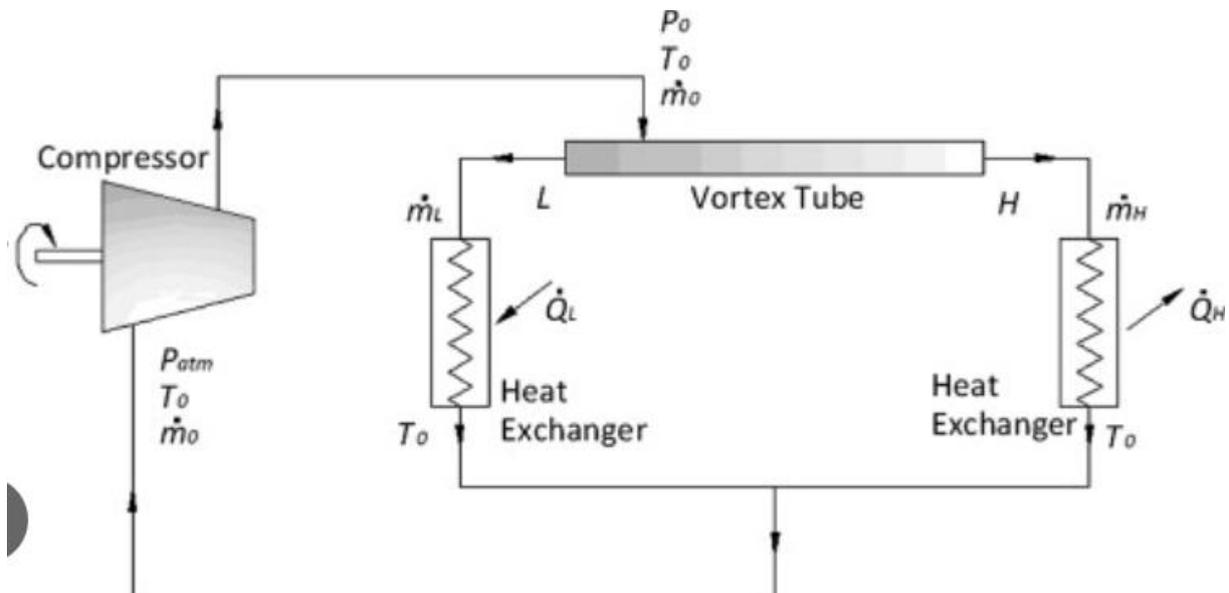


Abbildung 6: Aufteilung der Luftströme nach dem Vortex Tube, Quelle [12]

### Thermodynamische Prinzipien

Die im Kreisprozess relevanten Prinzipien basieren auf dem Gesetz der Energieerhaltung [9]. Die Enthalpieänderung der Luftströme wird durch folgende Gleichung beschrieben [13]:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

$\dot{m}$ ...Massenstrom

$c_p$ ...spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck (ca.  $1,005 \frac{kJ}{kgK}$ )

$\Delta T$ ...Temperaturänderung des jeweiligen Stroms

Diese grundlegende Gleichung der Thermodynamik dient der Analyse des Energieflusses im Kühlsystem. Ziel der Integration des Vortex Tubes ist die Optimierung der Systemeffizienz durch gezielte Nutzung der thermodynamischen Eigenschaften.

### Vergleich der Prozesse

Die theoretische Analyse der Systemeffizienz umfasst vier Szenarien:

- Klassischer Clausius-Rankine-Prozess (CRP) ohne Vortex Tube
- Vortex Tube mit Warmstromnutzung im Verdampfer, um die Wärmeübertragung zu verbessern
- Vortex Tube mit Kaltstromnutzung im Verdichter, um Wärmeabfuhr zu fördern

- Vortex Tube mit gleichzeitiger Nutzung von Warm- und Kaltstrom für maximale Effizienz

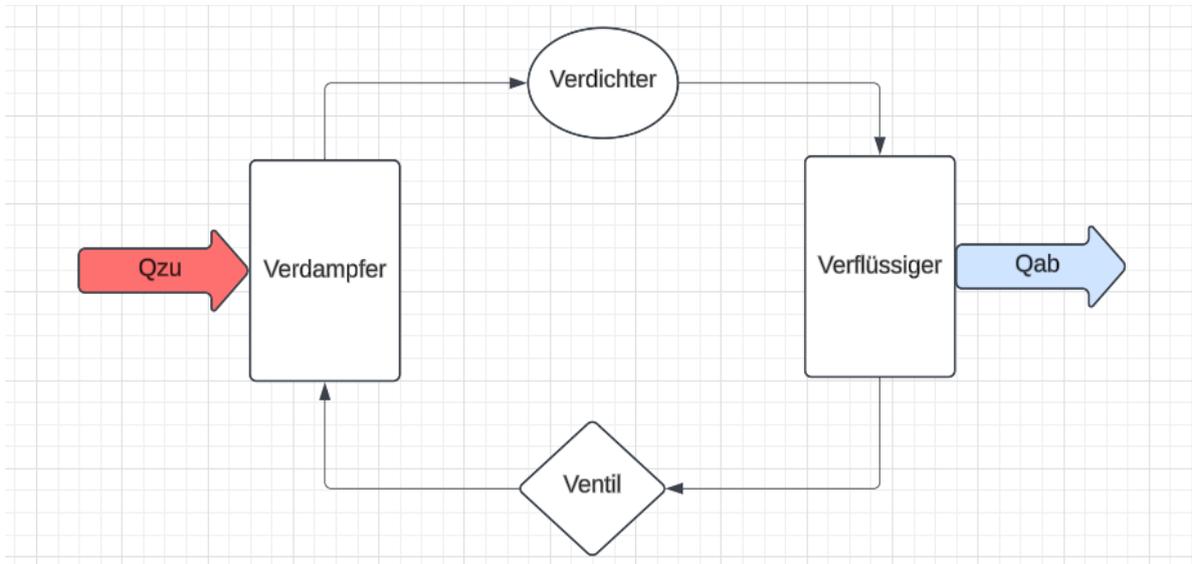


Abbildung 7: Szenario 1: Klassischer CRP ohne Vortex Tube

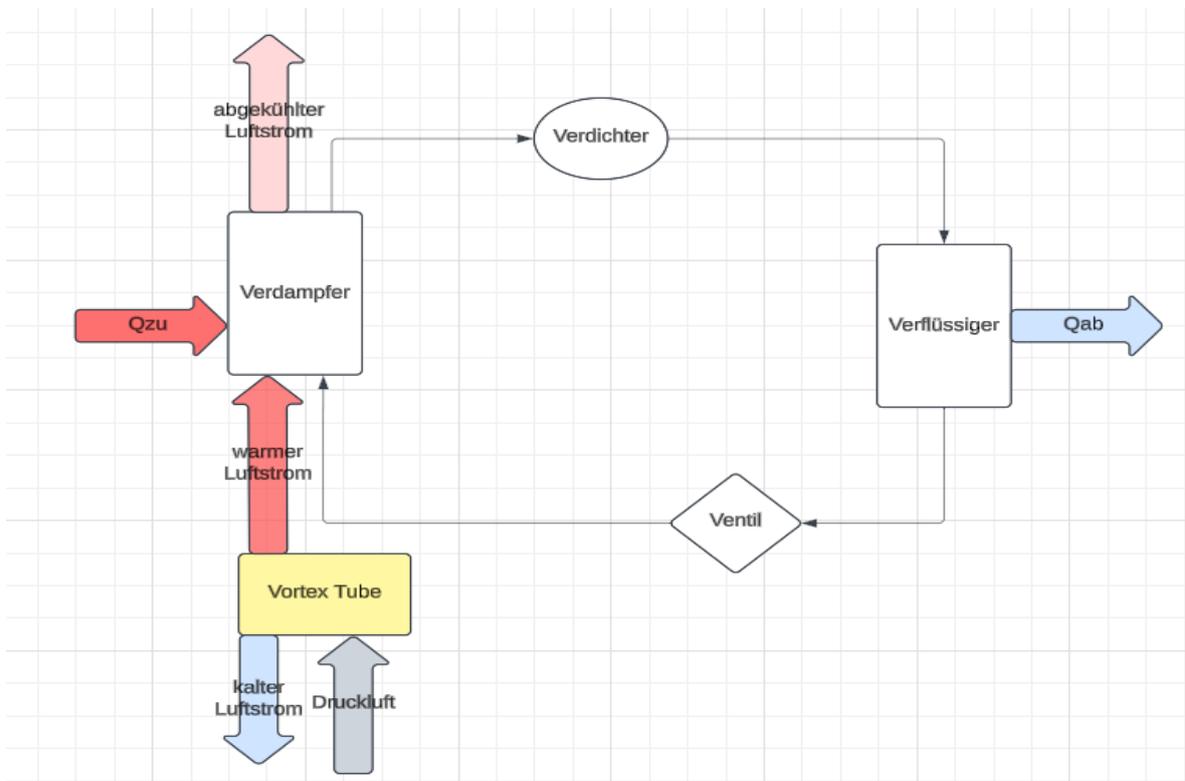


Abbildung 8: Nutzung Warmstrom aus dem Vortex Tube

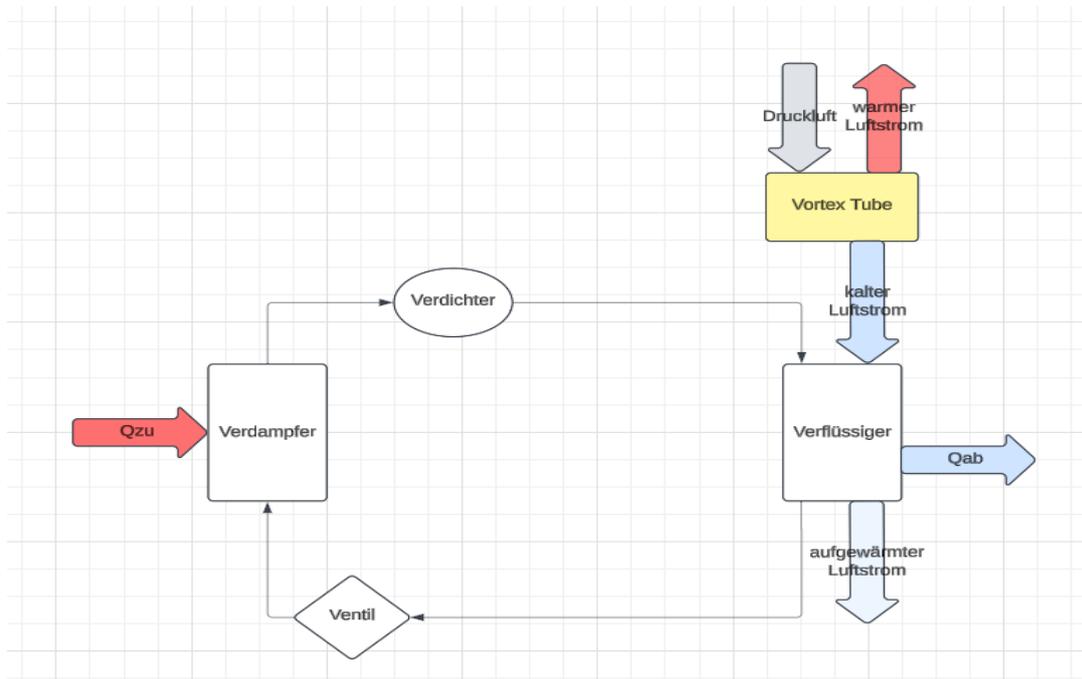


Abbildung 9: Nutzung Kaltstrom aus dem Vortex Tube

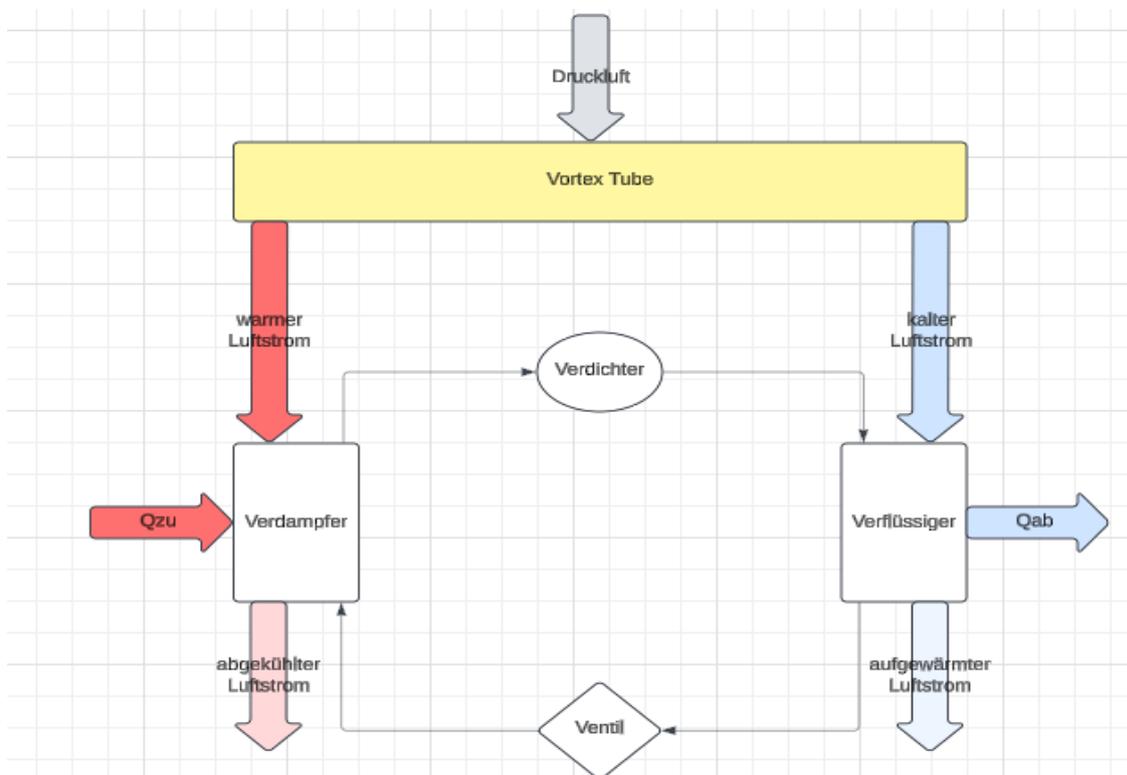


Abbildung 10: Kombinierte Nutzung von warmer und kalter Luft aus dem Vortex Tube

Diese vier Szenarien bilden die Grundlage für die Analyse der Leistungszahl (COP) des Kühlschranks. Diese umfassen ein Referenzszenario ohne Vortex Tube sowie vier Szenarien mit unterschiedlicher Nutzung des Vortex Tubes (Szenarien 1-4), wie in *Kapitel 3.2* detailliert beschrieben. In *Kapitel 3.3* wird die theoretische Systemeffizienz unter idealisierten Annahmen berechnet, darunter isentrope Prozesse, verlustfreie Wärmeübertragung und stabile Betriebsbedingungen. Diese Annahmen ermöglichen die Ermittlung idealisierter COP-Werte für jedes Szenario, die als Referenz für die experimentelle Untersuchung dienen.

Die praktische Umsetzbarkeit dieser theoretischen Annahmen und die tatsächliche Effizienz des Kühlschranks werden in *Kapitel 4* experimentell untersucht. Durch den Vergleich der experimentellen COP-Werte mit den theoretischen Ergebnissen wird bewertet, ob der Einsatz des Vortex Tubes die Effizienz des Kühlschranks signifikant steigern kann. Dieser Vergleich ermöglicht abschließend eine fundierte Aussage darüber, ob die Nutzung des Vortex Tubes in der Praxis ein realistisches Potenzial für Effizienzsteigerungen bietet.

## 3.2 Analyse der Komponenten

### 3.2.1 Klassischer Kreislauf ohne Vortex Tube

Der klassische Kühlkreislauf des Kühlschranks setzt sich zusammen aus vier Hauptkomponenten:

- **Verdichter:** Das Kältemittel (im vorliegenden Fall R600a, ein umweltfreundliches Kältemittel mit niedrigem Siedepunkt) wird verdichtet, wodurch Druck und Temperatur steigen. Der Verdichter liefert die für den Prozess erforderliche Energie.
- **Verflüssiger:** Das heiße, unter hohem Druck stehende Kältemittel gibt seine Wärme an die Umgebung ab, meist über Metalllamellen an der Rückseite oder den Seitenflächen, um eine große Oberfläche zur Wärmeabgabe zu schaffen. Die Wärmeabgabe erfolgt bei konstantem Druck, wodurch das Kältemittel vom gasförmigen in den flüssigen Zustand übergeht.
- **Expansionsventil:** Nach dem Verflüssiger gelangt das Kältemittel in das Expansionsventil. Hier wird Druck und Temperatur gesenkt, um es für den Verdampfer vorzubereiten.
- **Verdampfer:** Im Verdampfer nimmt das Kältemittel durch Verdampfung Wärme aus dem Innenraum des Kühlschranks auf, da sein niedriger Siedepunkt latente Wärme benötigt. Das gasförmige Kältemittel kehrt zum Verdichter zurück und der Zyklus beginnt erneut.

Im diesem klassischen Kreislauf werden diese Komponenten genutzt, um eine in sich geschlossene Wärmeübertragungsstrecke zu schaffen, die die Innentemperatur des Kühlschranks unter der Umgebungstemperatur hält. Die Effizienz dieses Prozesses wird durch den Coefficient of Performance (COP) bewertet. Dieser Kennwert gibt das Verhältnis der abgeführten Wärme zur eingesetzten Energie an [10].

### 3.2.2 Integration des Vortex Tubes

Die Einbindung des Vortex Tubes in den Kühlkreislauf beeinflusst die Energieflüsse maßgeblich und führt zu einer gezielten Nutzung der entstehenden Temperaturtrennung. Das Vortex Tube wird strategisch so positioniert, dass die Warm- und Kaltströme je nach Szenario spezifischen Komponenten zugeführt werden:

- **Referenzszenario (Szenario 1):**
  - Ohne Vortex Tube, wie bereits in *Kapitel 3.2.1* erläutert, dient als Basis für den Vergleich.
  
- **Warmstrom zum Verdampfer (Szenario 2):**
  - Der Warmstrom wird dem Verdampfer zugeführt, um durch zusätzliche Wärmezufuhr die Verdampfung des Kältemittels zu beschleunigen. Der Kaltstrom wird ungenutzt an die Umgebung abgegeben.
  
- **Kaltstrom zum Verflüssiger (Szenario 3):**
  - Der Kaltstrom wird dem Verflüssiger zugeführt, um die Verflüssigungstemperatur zu senken und dadurch die Effizienz zu erhöhen. Der Warmstrom wird unbenutzt an die Umgebung abgegeben.
  
- **Kombinierte Nutzung beider Ströme (Szenario 4):**
  - Warmstrom und Kaltstrom werden gleichzeitig genutzt, wobei der Warmstrom den Verdampfer und der Kaltstrom den Verflüssiger unterstützt.

Die Integration ermöglicht neue Anpassungen des Kühlkreislaufs an spezifische Anforderungen, indem das Kältemittel und die Luftströme gemeinsam Kälte erzeugen. Gleichzeitig entstehen Herausforderungen durch erhöhte Steuerungsanforderungen. Die Effizienz der Szenarien hängt von den thermodynamischen Wechselwirkungen wie Wärmeübertragung und Druckverlusten ab und wird in den folgenden Kapiteln analysiert.

### 3.2.3 Thermodynamische Effekte

Die Funktionsweise des Vortex Tubes ist in *Kapitel 2.2* ausführlich beschrieben. Dieses Kapitel fasst die thermodynamischen Effekte zusammen, die durch das Vortex Tube hervorgerufen werden:

- **Temperaturtrennung:** Dieser Effekt beschreibt die Differenz zwischen Warm- und Kaltstrom, abhängig vom Druck der eingespeisten Luft. Der Joule-Thomson-Koeffizient von Luft beträgt  $\mu_{JZ} = 0,26 \text{ K/bar}$  [14].

Für ideale Gase (hier wird Luft als ideales Gas angenommen) gilt die Joule-Thomson-Gleichung [14]:

$$\Delta T = \mu_{JZ} \cdot \Delta P \quad (2)$$

wobei:

- $\mu_{JZ}$ ... Joule-Thomson-Koeffizient, abhängig von Temperatur und Druck
  - $\Delta P$ ... Druckdifferenz über das Ventil
- **Druckverluste:** Die Expansion im Vortex Tube führt zu unvermeidbaren Druckverlusten, die die Systemeffizienz beeinflussen können [15].
  - **Energieaufwand für Druckluft:** Die Druckluft wird durch einen Kompressor erzeugt, was zusätzliche elektrische Energie erfordert. Dieser Energieaufwand wird bei der Berechnung der Leistungszahl (COP) in *Kapitel 3.3* sowie *Kapitel 4* berücksichtigt und ist eine zentrale Vergleichsvariable.

Die Integration des Vortex Tubes bringt einerseits thermodynamische Vorteile, wie verbesserte Wärmeübertragung, andererseits Herausforderungen durch den zusätzlichen Energieaufwand für die Druckluftherzeugung, die die Vorteile einschränken können. Eine detaillierte Analyse folgt in *Kapitel 3.3*.

### 3.3 Theoretische Bewertung der Szenarien

Im Rahmen dieses Kapitels werden die vier in *Kapitel 3.2.2* definierten Szenarien theoretisch analysiert und miteinander verglichen, um den Einfluss des Vortex Tubes auf den Kühlkreislauf präzise zu bewerten. Die Berechnung der Leistungszahl (Coefficient of Performance, COP) sowie der Energieflüsse dient dazu, das Szenario mit der höchsten Effizienzsteigerung zu ermitteln. Ziel ist es, eine theoretische Grundlage für die experimentelle Validierung in *Kapitel 4* zu schaffen.

Die Analyse prüft, ob die Integration des Vortex Tubes den COP des klassischen Kreislaufs signifikant verbessert oder ob der Energieaufwand für die Druckluftherzeugung die Vorteile überwiegt, sodass die neuen Szenarien als ineffizient gelten. Diese theoretischen Ergebnisse bilden die Grundlage für die praktischen Experimente in *Kapitel 4*, in denen die berechneten Effekte überprüft werden. Durch diesen zweistufigen Ansatz – theoretische Modellierung und experimentelle Validierung – wird sichergestellt, dass die Ergebnisse auf fundierten thermodynamischen Berechnungen als auch auf realen Messungen basieren.

Für die Berechnungen werden mehrere Annahmen getroffen, da viele Werte in Quellen als Wertebereich angegeben sind. Diese Annahmen sind durch Literaturquellen belegt und orientieren sich an realitätsnahen Werten der technischen Praxis:

- $\dot{m}_{Luft}$ ... Massenstrom der Luft im VT = 0,05 kg/s. Entspricht einem Volumenstrom von 500 l/min bei 5 bar [16].
- $R$ ...Spezifische Gaskonstante = 287 J/(kgK), Standardwert [17]
- $T$ ... Umgebungstemperatur = 300 K (ca. 27 °C), typische Betriebsbedingungen [18].
- $\frac{p_2}{p_1}$ ... Druckverhältnis = 6bar/1bar = 6, üblich für effektive Temperaturtrennung [16]
- $\eta$ ... Wirkungsgrad des Kompressors = 0,60, gängiger Wert für kleinere, nicht-industrielle Kompressoren in Haushaltskühlsystemen [19].
- $\Delta T_{warm}$ ...Temperaturdifferenz des Warmstroms = 10 K, realistisch bei gegebenen Druckverhältnis [20].
- $\Delta T_{kalt}$ ...Temperaturdifferenz des Kaltstroms = 6 K, realistisch bei gegebenen Druckverhältnis [20].
- $\dot{m}_{Kühlmittel}$ ... Massenstrom des Kältemittels im Kühlschrank, basierend auf typischen Werten für R600a [21].

### 3.3.1 Szenario 1: Klassischer Kreislauf ohne Vortex Tube

Der klassische Kreislauf umfasst folgende Schritte:

- Wärmeaufnahme ( $\dot{Q}_{\text{Verdampfer}}$ )
- Kompression ( $\dot{W}_{\text{Verdichter}}$ )
- Wärmeabgabe
- Expansion

Der COP-Wert für den klassischen Kreislauf berechnet mit [22]:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{\text{Verdampfer}}}{\dot{W}_{\text{Verdichter}}} \quad (3)$$

Berechnung des COP für Szenario 1:

- **Wärmeaufnahme ( $\dot{Q}_{\text{Verdampfer}}$ )**

Die Wärmeaufnahme im Verdampfer wird aus der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$ , dem Massenstrom des Kühlmittels  $\dot{m}_{\text{Kühlmittel}}$ , als auch der Temperaturänderung  $\Delta T$  berechnet:

$$\dot{Q}_{\text{Verdampfer}} = \dot{m}_{\text{Kühlmittel}} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (4)$$

$\dot{m}_{\text{Kühlmittel}}$ ... Massenstrom des Kühlmittels (kg/s)

$c_p$ ... spezifische Wärmekapazität (kJ/(kg·K)),

$\Delta T$ ... Temperaturänderung im Verdampfer (K)

Annahmen:

$$\dot{m}_{\text{Kühlmittel}} = 0,01 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$c_p = 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \text{ (Wasser als zu kühlender Inhalt) [23]}$$

$$\Delta T = 10 \text{ K}$$

$$\dot{Q}_{\text{Verdampfer}} = 0,01 \cdot 4,2 \cdot 10 = 420 \text{ W} \quad (4.1)$$

- **Verdichterarbeit ( $\dot{W}_{Verdichter}$ )**

Im Zuge dieses Szenarios gehen wir von einem sehr gängigen COP-Wert (COP = 4,0) für moderne Kühlschränke aus, der im realistischen Bereich für haushaltsübliche Kühlsysteme liegt. Typischerweise bewegen sich die COP-Werte moderner Kühlschränke, abhängig von den Betriebsbedingungen, zwischen 2,0 und 4,0. Daher dient der berechnete Wert als realistischer Referenzpunkt, um die Effizienz der Szenarien mit eingebautem Vortex Tube zu bewerten [24] [22].

Im Zuge dieser Annahme kann durch Umformung der Gleichung für den COP-Wert, die Energie berechnet werden, die notwendig ist, um den Verdichter anzutreiben.

$$\dot{W}_{Verdichter} = \frac{\dot{Q}_{Verdampfer}}{COP} \quad (5)$$

$$\dot{W}_{Verdichter} = \frac{420W}{4,0} \quad (5.1)$$

$$\dot{W}_{Verdichter} = 105W \quad (5.2)$$

Berechnung des Druckluftaufwands:

Die Berechnung des Druckluftaufwands ist entscheidend für die Bewertung der Effizienz von Systemen die Druckluft benutzen, wie im Fall mit dem Vortex Tube. Die Arbeit zur Kompression von Luft ( $\dot{W}_{Druckluft}$ ) wird folgendermaßen berechnet [25]:

$$\dot{W}_{Druckluft} = \frac{\dot{m}_{Luft} \cdot R \cdot T_1}{\eta} \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \quad (6)$$

Erklärung der Parameter und ihre Annahme die für die Berechnung gewählt wurde [26]:

$\dot{m}_{Luft}$ ... Massenstrom der Luft = 0,05 kg/s

R...spezifische Gaskonstante = 287 J/(kgK)

$T_1$ ...Eintrittstemperatur der Luft bei Umgebungstemperatur = 300 K

$\eta$ ... Wirkungsgrad des Kompressors = 0,60

$\frac{p_2}{p_1}$ ... Druckverhältnis = 6 bar/1 bar = 6

Der Ausdruck  $\dot{m}_{Luft} \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$ , welcher sich im Zähler des Terms befindet, bildet die spezifische isentrope Verdichtungsarbeit dar [19]:

$$\dot{W}_{Druckluft} = \frac{0,05 \frac{kg}{s} \cdot 287 \frac{J}{kgK} \cdot 300 K}{0,6} \cdot \ln(6) \approx 12,86 kW \quad (6.1)$$

Der berechnete Druckluftaufwand von 12,86 kW für einen Massenstrom von 0,05 kg/s mag für den Einsatz in einem Kühlsystem hoch erscheinen, ist jedoch realistisch, wenn man die energieintensive Natur der Druckluftherzeugung berücksichtigt. Die Erzeugung von Druckluft erfordert viel Energie, insbesondere bei einem Druckverhältnis von 6 und einem typischen Wirkungsgrad des Kompressors von 0,6 [19]. Industrielle Kompressoren benötigen ca. 6-7 kW um 1 m<sup>3</sup>/min Druckluft bei 7 bar zu erzeugen [27]. In dem vorliegenden Fall entspricht der Massenstrom etwa 2,49 m<sup>3</sup>/min, was den hohen Energieaufwand bestätigt. Diese Werte deuten bereits darauf hin, dass der Einsatz eines Vortex Tubes in einem Kühlsystem aufgrund des hohen Druckluftbedarfs ineffizient sein wird.

### 3.3.2 Szenario 2: Warmstrom auf den Verdampfer

In diesem Szenario wird der warme Luftstrom vom Vortex Tube genutzt, um den Verdampfer zusätzlich mit Wärme zu versorgen. Dadurch soll die Verdampfung des Kältemittels beschleunigt und die Gesamteffizienz des Kühlsystems gesteigert werden. Zuerst wird der COP-Wert ohne die Energie für die Druckluftaufbereitung und anschließend der reale COP-Wert dieses Szenarios berechnet:

$$\dot{Q}_{warm} = \dot{m}_{warm} \cdot c_p \cdot \Delta T_{warm} \quad (7)$$

Annahmen:

$$\dot{m}_{warm} = 0,015 \frac{kg}{s} \text{ (30\% der Gesamtluft, siehe Kapitel 2.2)}$$

$$\dot{Q}_{warm} = 0,015 \cdot 1,005 \cdot 10 = 0,3015 \text{ kW} = 150,75 \text{ W} \quad (7.1)$$

Gesamtwärmeaufnahme:

$$\dot{Q}_{SZ2,Gesamt} = \dot{Q}_{Verdampfer} + \dot{Q}_{warm} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{SZ2,Gesamt} = 420 \text{ W} + 150,75 \text{ W} = 570,75 \text{ W} \quad (8.1)$$

COP ohne Druckluftaufwand:

$$COP_{SZ2,ohne\ Druckluft} = \frac{\dot{Q}_{SZ2,Gesamt}}{W_{Verdichter}} = 5,44 \quad (9)$$

Gesamtenergieaufwand:

$$\dot{W}_{Gesamt} = \dot{W}_{Druckluft} + \dot{W}_{Verdichter} \quad (10)$$

$$\dot{W}_{Gesamt} = 12,860 \text{ W} + 105 \text{ W} = 12,965 \text{ kW} \quad (10.1)$$

COP mit Druckluftaufwand:

$$COP_{SZ2,mit\ Druckluft} = \frac{\dot{Q}_{SZ2,Gesamt}}{\dot{W}_{Gesamt}} = \mathbf{0,04}$$

Es zeigt sich, dass der COP-Wert ohne Berücksichtigung des Druckluftaufwands im Vergleich zum klassischen Kreislauf signifikant erhöht werden konnte. Mit Einbezug des Druckluftaufwands sinkt die Effizienz jedoch deutlich und der COP-Wert beträgt nur 0,04, was ein deutlich ineffizienteres System darstellt.

### 3.3.3 Szenario 3: Kaltstrom auf den Verflüssiger

Ähnlich wie in *Kapitel 3.3.2* der Warmstrom berechnet wurde, muss hier zunächst der Kaltstrom nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik berechnet werden:

$$\dot{Q}_{kalt} = \dot{m}_{kalt} \cdot c_p \cdot \Delta T_{kalt} \quad (11)$$

Annahmen:

$$\dot{m}_{kalt} = 0,035 \frac{kg}{s} \text{ (70\% der Gesamtluft, siehe Kapitel 2.2)}$$

$$c_p = 1,005 \frac{kJ}{kgK}$$

$$\Delta T_{kalt} = 6 K$$

$$\dot{Q}_{kalt} = 0,035 \cdot 1,005 \cdot 6 = 0,211 kW = 211 W \quad (11.1)$$

Gesamtwärmeaufnahme:

$$\dot{Q}_{SZ3,Gesamt} = \dot{Q}_{Verdampfer} + \dot{Q}_{kalt} \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{SZ3,Gesamt} = 420 W + 211 W = 631 W \quad (12.1)$$

COP ohne Druckluftaufwand:

$$COP_{SZ3,ohne Druckluft} = \frac{\dot{Q}_{SZ3,Gesamt}}{\dot{W}_{Verdichter}} = 6,09 \quad (13)$$

Gesamtenergieaufwand:

$$\dot{W}_{Gesamt} = \dot{W}_{Druckluft} + \dot{W}_{Verdichter} \quad (14)$$

$$\dot{W}_{Gesamt} = 12,860 kW + 105 W = 12,965 kW \quad (14.1)$$

COP mit Druckluftaufwand:

$$COP_{SZ3,mit\ Druckluft} = \frac{\dot{Q}_{SZ3,Gesamt}}{\dot{W}_{Gesamt}} \approx \mathbf{0,05} \quad (15)$$

Die Ergebnisse dieses Szenarios ähneln denen von Szenario 2. Insbesondere ist der COP ohne Berücksichtigung des Druckluftaufwands im Vergleich zum klassischen Kreislauf verbessert, jedoch ist die Verbesserung gegenüber Szenario 2 nur marginal. Mit Einbezug des Energieaufwands für die Druckluftherzeugung sinkt der COP-Wert deutlich und stellt somit keine Alternative zum klassischen System.

### 3.3.4 Szenario 4: Kombinierte Nutzung von Warm- und Kaltstrom

In diesem finalen Szenario werden sowohl der warme als auch der kalte Luftstrom genutzt.

Aus den oberen Szenarien ergeben sich folgende Massenströme:

$$\dot{m}_{warm} = 0,3 \cdot \dot{m}_{gesamt} = 0,3 \cdot 0,05 \frac{kg}{s} = 0,015 \frac{kg}{s} \quad (16)$$

$$\dot{m}_{kalt} = 0,7 \cdot \dot{m}_{gesamt} = 0,7 \cdot 0,05 \frac{kg}{s} = 0,035 \frac{kg}{s} \quad (17)$$

Wärmestrom:

$$\dot{Q}_{warm} = \dot{m}_{warm} \cdot c_p \cdot \Delta T_{warm} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{warm} = 0,015 \cdot 1,005 \cdot 10 = 0,3015 kW = 150,75 W \quad (7.1)$$

Kaltstrom:

$$\dot{Q}_{kalt} = \dot{m}_{kalt} \cdot c_p \cdot \Delta T_{kalt} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{kalt} = 0,035 \cdot 1,005 \cdot 6 = 0,211 kW = 211 W \quad (11.1)$$

Gesamtwärmeaufnahme:

$$\dot{Q}_{SZ4,Gesamt} = \dot{Q}_{Verdampfer} + \dot{Q}_{warm} + \dot{Q}_{kalt} \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{SZ4,Gesamt} = 420 W + 150,75 W + 211 W = 781,75 W \quad (12.1)$$

COP ohne Druckluft:

$$COP_{SZ4,ohne Druckluft} = \frac{\dot{Q}_{SZ4,Gesamt}}{\dot{W}_{Verdichter}} \approx 7,44 \quad (13)$$

Gesamtenergieaufwand:

$$\dot{W}_{Gesamt} = \dot{W}_{Druckluft} + \dot{W}_{Verdichter} \quad (14)$$

$$\dot{W}_{Gesamt} = 12,860 \text{ kW} + 105 \text{ W} = 12,965 \text{ kW} \quad (14.1)$$

COP mit Druckluftaufwand:

$$COP_{SZ4,mit\ Druckluft} = \frac{\dot{Q}_{SZ4,Gesamt}}{\dot{W}_{Gesamt}} \approx \mathbf{0,06} \quad (15)$$

Abschließend zeigt Szenario 4, bei dem beide Luftströme des Vortex Tubes genutzt werden, dass die Effizienz im Vergleich zum klassischen Kreislauf durch den Energieaufwand für die Druckluftherzeugung deutlich sinkt. Der COP-Wert ist niedrig und bietet keine Verbesserung gegenüber dem Referenzsystem.

### 3.3.5 Zusammenfassung Szenarienanalyse

Auf Grundlage der durchgeführten theoretischen Szenarienanalyse unter idealisierten Bedingungen lässt sich feststellen, dass der Einsatz des Vortex Tubes in einem Kühlsystem verschiedene Auswirkungen auf die Effizienz und den Energieverbrauch des Systems hat. Im Folgenden werden die zentralen Erkenntnisse aus den vier untersuchten Szenarien zusammengefasst:

#### Ergebnisse aus den Szenarien:

Tabelle 1: Ergebnisse der COP-Werte von theoretischer Ausarbeitung

Szenario	COP ohne Druckluft	COP mit Druckluft
1. Klassischer Kreislauf	4	-
2. Warmstrom auf Verdampfer	5,44	0,04
3. Kaltstrom auf Kompressor	6,09	0,05
4. Kombinierte Nutzung	7,44	0,06

#### Interpretation der Ergebnisse:

##### **1. Klassischer Kreislauf (Referenzszenario):**

Der klassische Kreislauf dient als Basis und zeigt mit einem angenommenen, aber sehr realitätsnahen COP = 4 eine typische Effizienz eines modernen Kühlsystems [27]. Ohne zusätzliche Komponenten wird die Effizienz allein durch die Verdichterarbeit bestimmt.

##### **2. Szenario 2 – Warmstrom auf den Verdampfer:**

Die zusätzliche Wärmeübertragung durch den Warmstrom führt zu einer deutlichen Steigerung des COP ohne Druckluft und erreicht vielversprechende 5,44. Wird der Druckluftaufwand jedoch berücksichtigt, sinkt der COP beträchtlich auf 0,04, was den energetischen Vorteil dieses Szenarios erheblich reduziert.

##### **3. Szenario 3 – Kaltstrom auf den Kompressor:**

Der kalte Luftstrom reduziert die Verdichterarbeit aufgrund der Energie aus dem Kaltstrom, was den COP ohne Druckluft auf 6,09 anhebt. Aufgrund von dem Druckluftaufwand sinkt der COP auf 0,05, was dieses Szenario für praktische Anwendungen überaus ineffizient macht.

#### **4. Szenario 4 – Kombinierte Nutzung von Warm- und Kaltstrom:**

Die kombinierte Nutzung bietet den höchsten COP ohne Druckluft mit einem Wert von 7,44 und stellt somit das effizienteste Szenario dar. Auch bei diesem Szenario sinkt der COP durch den Druckluftaufwand drastisch auf den ineffizienten Wert von 0,06, wodurch der zuvor erzielte Effizienzvorteil stark reduziert wird.

##### Zentrale Erkenntnisse:

1. Druckluftaufwand als entscheidender Faktor:
  - Der Energieaufwand für die Bereitstellung der Druckluft hebt die Effizienzvorteile, welches das Vortex Tube mit sich bringt, in allen ermittelten Szenarien auf.
  
2. Kombinierte Nutzung als potenziell effektivste Variante:
  - Ohne Druckluftaufwand bietet die kombinierte Nutzung (Szenario 4) den höchsten Effizienzgewinn.
  - Für praktische Anwendungen müsste eine kostenfreie oder effizientere Druckluftquelle verfügbar sein, um das Potential des Vortex Tubes voll auszuschöpfen.
  
3. Realismus der berechneten COP-Werte:
  - Die errechneten COP-Werte ohne Druckluftaufwand basieren auf idealisierten Annahmen, wie der vollständigen Nutzung der Wärme- und Kälteströme. Laut Literatur ist die Verbesserung des COP durch ein Vortex Tube jedoch deutlich geringer. Studien zeigen, dass die Effizienzsteigerung im Bereich von 0,86 % – bis 4,37 % liegen kann [28]. Die berechneten Werte überschreiten diese realistischen Erwartungen deutlich und verdeutlichen somit die Grenzen rein theoretischer Überlegungen.
  
4. Klassischer Kreislauf bleibt am effizientesten:
  - Unter den untersuchten Bedingungen bleibt der klassische Kreislauf das effizienteste Szenario nach Miteinberechnung der Druckluftaufbereitung.

# 4 Experimentelle Untersuchung und Versuchsaufbau

## 4.1 Komponentenbeschreibung

Im Zuge dieser experimentellen Untersuchung wurde ein handelsüblicher Kühlschrank modifiziert und im Fall der unterschiedlichen Szenarien, mit einem Vortex Tube, als auch weiteren Komponenten ausgestattet. Im folgenden Abschnitt werden die verwendeten Bauteile sowie ihre Funktionen innerhalb des Versuchsaufbaus aufgelistet und erklärt.

### 4.1.1 „Bomann“ KB7235 Kühlschrank

Als Basis für die experimentelle Untersuchung dient der Kühlschrank der Marke „Bomann“ KB7235. Es handelt sich dabei um ein kompaktes Modell mit einem geschlossenen thermodynamischen Kreislauf, in dem das Kältemittel R600a (Isobutan) zum Einsatz kommt. Folgende Gründe waren entscheidend für die Auswahl dieses Kühlschranks:

- **Einfache und benutzerfreundliche Modifikation:** Der Kühlschrank ist einerseits kompakt gebaut und andererseits ein kleines und leichtes Modell mit 16,5 kg Masse. Dies ist von Vorteil, da der Kühlschrank im Verlauf der Untersuchungen häufig bewegt werden musste, um an den jeweiligen Komponenten arbeiten zu können. Zusätzlich besitzt er eine gut zugängliche Rückseite sowie Seitenflächen, was essenziell für eine direkte Anbindung der Luftströme des Vortex Tubes an die Wärmetauschkomponenten ist.
- **Kleines Volumen:** Die kompakte Bauweise des Kühlschranks führt dazu, dass der Innenraum des Kühlschranks schneller heruntergekühlt werden kann, wodurch jegliche Verbesserungen in der Kühlleistung schneller messbar sind. Dementsprechend verkürzte sich die Dauer der jeweiligen Szenarien.
- **R600a als Kältemittel:** Das verwendete Isobutan-Kältemittel verfügt über günstige thermodynamische Eigenschaften wie eine hohe latente Verdampfungswärme und gute Wärmeleitfähigkeit, was eine wirkungsvolle Wärmeübertragung ermöglicht. Zudem ist es ein weit verbreitetes Kältemittel in

Kühlschränken, was die Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Versuchsstand auf reale Anwendungen erhöht.

Um Zugang zu den Kältemittelrohren an der Rückseite und den Seitenflächen des Kühlschranks zu erhalten, in denen das Kältemittel verdampft und kondensiert, musste die Schaumstoffisolierung entfernt werden. Nur ein direkter Zugang ermöglichte die Anbringung von Pneumatikschläuchen an den Rohren, um den Wärmeaustausch für die Vortex-Tube-Integration zu gewährleisten.



Abbildung 11: „BOMANN“ KB7235 Kühlschrank



Abbildung 12: Freigelegte Kühlmittelrohre auf Kühlschrank-Rückseite

#### 4.1.2 Vortex Tube „EXAIR“ 3208

Als entscheidendes Bauteil für diesen Versuch wurde das Vortex Tube der Marke „EXAIR“ Modell 3208 verwendet, welches von der Firma „EPUTEC GmbH“ speziell für diese Masterarbeit zur Verfügung gestellt wurde. Dieses Modell eignete sich mit seinen technischen Eigenschaften und den verfügbaren Druckluftparametern ideal für die Versuche, die in der Werkstatt der Fachhochschule Technikum Wien durchgeführt wurden.



Abbildung 13: „EXAIR“ Vortex Tube. Quelle: [19]

Folgende Druckluftparameter sind in der Werkstatt der Fachhochschule vorhanden:

- Maximaler Betriebsdruck: 7 bar
- Maximaler Volumenstrom: ca. 170 l/min

Damit das Vortex Tube ordnungsgemäß und effizient arbeiten konnte, wurde speziell das Modell 3208 ausgewählt, da dieses mit einem Luftdurchsatz von 227 l/min betrieben werden kann und dabei eine maximale Kühlleistung von 139 Kcal/h bietet. Das nächstkleinere Modell 3204 wurde ausgeschlossen, da es für einen maximalen Luftdurchfluss von 113 l/min konstruiert wurde und den verfügbaren Volumenstrom nicht optimal hätte nutzen können. Das Modell 3208 überstieg zwar mit den angegebenen 227 l/min den vorhandenen Volumenstrom der Werkstatt, jedoch ließ sich dadurch unter praxisnahen Bedingungen eine bessere Annäherung an realistische Anwendungen ermöglichen. Dieses Modell bietet zudem eine höhere Temperaturtrennung, was bedeutet, dass der Einfluss auf den thermodynamischen Kreisprozess größer war.

Wie bereits erwähnt, wurde das „EXAIR“ Vortex Tube Modell 3208, einschließlich eines „EXAIR“ Cooling Kits (BP3908J) und eines Heißenden-Schalldämpfers (3903) von der Firma „EPUTEC GmbH“ als Leihgabe für die Durchführung der Experimente zur Verfügung

gestellt. Weitere Informationen zum verwendeten Modell als auch dem Zubehör sind unter folgenden Link abrufbar: <https://www.eputec.de/exair-wirbelrohr/wirbelrohr-vortex-tube/>

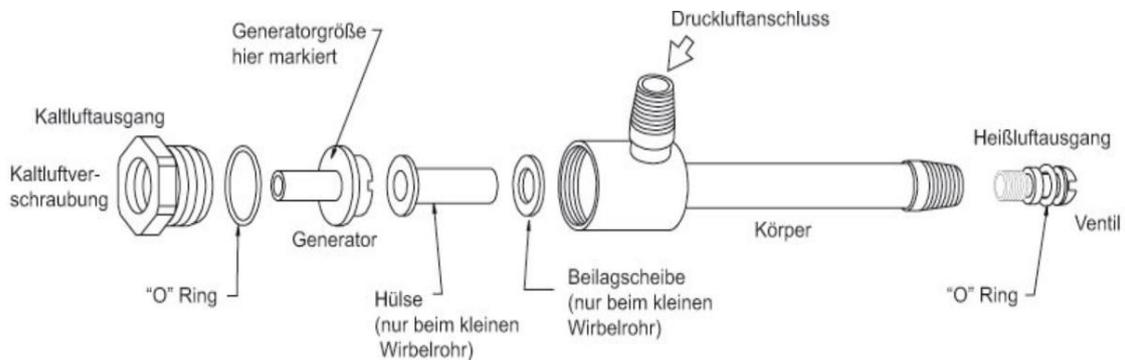


Abbildung 14: Explosionsansicht EXAIR Vortex Tube. Quelle: [19]

Neben dem, von „EPUTEC GmbH“ bereitgestellten „EXAIR“ Vortex Tube, wurde zusätzlich das „EXAIR“ Cooling Kit (BP3908J) mitgeliefert. Dabei handelt es sich unter anderem um sechs unterschiedliche Generatoren aus Kunststoff, deren Aufgabe es ist, den Luftstrom im Inneren des Wirbelrohres zu beeinflussen und dadurch sowohl die Temperaturtrennung als auch den Volumenstrom an den beiden Ausgängen zu regulieren. Bei den Generatoren kamen zwei Typen zum Einsatz:

- C – Generatoren (“Cooling”): 2GC, 4GC, 8GC
- R – Generatoren (“Refrigeration”): 2GR, 4GR, 8GR

Der Unterschied zwischen den beiden Generatoren liegt in ihrer Konfiguration und ihrem dezidierten Aufgabenfeld. C-Generatoren generieren einen geringen Temperaturunterschied, bei gleichzeitig hohem Luftdurchsatz, was eine hohe Strömungsgeschwindigkeit am Ausgang zur Folge hat. R-Generatoren hingegen sind für maximale Temperaturtrennung ausgelegt, wodurch entweder sehr hohe oder sehr niedrige Temperaturen erreicht werden. Dies geschieht allerdings auf Kosten des deutlich reduzierten Volumenstroms.

Im Zuge dieser Arbeit wurde daher je nach Szenario der Generator ausgewählt, welcher nicht nur eine geeignete Temperatur erreicht, aber auch die notwendige Strömungsgeschwindigkeit generierte, um einen möglichst effizienten Temperatúraustausch zu ermöglichen. Eine detaillierte Analyse und Auswahlbegründung folgen in *Kapitel 4.2*.

Die mitgelieferten Schalldämpfer für beide Auslässe wurden demontiert, nachdem sie die Leistung des Vortex Tubes reduzierten und der daraus resultierende höhere Geräuschpegel für die Versuchszwecke nicht von Bedeutung war.

### **4.1.3 Aluminisierte Hitzeschutzmatte**

Nach der Entfernung der werkseitigen Schaumstoffisolierung an den Rück- und Seitenflächen des Kühlschranks, um direkten Zugang zu den Komponenten von Verflüssiger und Verdampfer zu erhalten (*siehe Kapitel 4.1.1*), wurde eine alternative thermische Isolierung erforderlich. In Absprache mit dem Betreuer, wurde eine aluminisierte Hitzeschutzmatte gewählt, die Wärmeeintrag von außen sowie Kälteverlust aus dem Inneren verhindert. Die dünne, flexible Matte wurde mehrfach gefaltet, um eine ausreichend dicke Isolierschicht zu bilden. In die an der Rückseite angebrachte Matte wurde eine Öffnung eingeschnitten, um den Pneumatikschlauch mit dem Warmstrom des Vortex Tubes zum Verdampfer zu führen. Durch ihre hohe Reflexionsfähigkeit, gewährleistete die Matte Temperaturstabilität während der 30-minütigen Versuche, was entscheidend war, um realitätsnahe Bedingungen sicherzustellen und thermische Wechselwirkungen zwischen den Komponenten zu vermeiden.

### **4.1.4 Temperatursensor**

Um die verbesserte Effizienz des Kühlprozesses bei den unterschiedlichen Szenarien messen und quantifizieren zu können, wurde zur Erfassung der Temperaturverläufe im Innenraum des Kühlschranks ein digitaler Temperaturfühler eingesetzt. Dieser Sensor befindet sich auf dem Kabelende eines ca. 0,5 m langen Kabels, sodass möglich ist, den Temperatursensor im geschlossenen Kühlschrank zu positionieren und das Display mit der Temperaturanzeige außerhalb zu halten. Der Sensor hat eine Temperaturmessgenauigkeit von  $\pm 1$  °C und für einen Temperaturbereich von -50 °C bis +110 °C ausgelegt.

Zusätzlich wurde der Sensor in einen Behälter mit 170 ml Wasser gelegt, um die Abkühlung des Wassers bei den Szenarien zu messen. Das Wasser hatte dabei stets die gleiche Ausgangstemperatur von 18 °C.

## 4.2 Versuchsablauf

Alle Experimente wurden unter kontrollierten, identischen Bedingungen durchgeführt, um vergleichbare Ergebnisse für die Szenarien 1 bis 4 zu erzielen, die eine zuverlässige Bewertung der Effizienzsteigerung durch den Vortex Tube ermöglichen. Der Kühlschrank wurde vor jedem Versuch entleert, um thermische Störeinflüsse durch Inhalte zu vermeiden, und mindestens eine Stunde vor dem ersten Experiment des Tages mit geschlossener Tür auf Betriebstemperatur gebracht. Die Kühlleistung, die manuell über ein Bedienfeld im Kühlschrank einstellbar ist, wurde auf die dritte von fünf Stufen (ca. 50 % der Maximalleistung) eingestellt, um konsistente Betriebsbedingungen sicherzustellen. Ein Glasbehälter mit 170 ml Wasser wurde in der Mitte des Kühlraums platziert, um die Temperaturentwicklung im Inneren zu messen. In diesen Behälter wurde ein Temperaturmesssensor eingeführt, dessen Kabel so verlegt wurde, dass die Anzeige bei geschlossener Tür von außen gut lesbar war. Die Starttemperatur des Wassers wurde auf exakt 18 °C festgelegt, da diese Temperatur typische Bedingungen für Haushaltskühlschränke widerspiegelt und eine einheitliche Ausgangsbasis gewährleistet. Jeder Versuch begann erst, wenn diese Temperatur erreicht war. Die Messungen erstreckten sich über 30 Minuten, wobei die Wassertemperatur alle 5 Minuten aufgezeichnet wurde, um die Kühlleistung der Szenarien präzise zu dokumentieren. Zwischen den Szenarien wurde der Wasserbehälter entfernt und der Kühlschrank geschlossen, um eine Erwärmung des Innenraums durch die Umgebungstemperatur zu verhindern.

Ein zentraler Aspekt des Versuchsaufbaus war die Positionierung des Vortex Tubes, um Unterschiede in den Ergebnissen durch variable Anordnungen auszuschließen. Das Vortex Tube wurde strategisch so platziert, dass die Pneumatikschläuche die Warm- und Kaltluftströme gezielt zu den vorgesehenen Komponenten (Verdampfer oder Verflüssiger) leiten oder von diesen wegführen konnten, um thermische Wechselwirkungen zu vermeiden. Diese Anordnung sorgte dafür, dass die Luftströme ausschließlich die beabsichtigten Komponenten beeinflussten, wie in den Szenarien 2 bis 4 definiert (siehe *Kapitel 3.2.2*). Abbildung 16 veranschaulicht die Konfiguration für Szenario 4, in dem beide Luftströme genutzt werden: Das Vortex Tube, deutlich mit einem orangen Warnaufkleber gekennzeichnet, führte den Warmstrom durch einen durchsichtigen Pneumatikschlauch durch die aluminisierte Hitzeschutzmatte (siehe *Kapitel 4.1.3*) zum Verdampfer an der Rückseite des Kühlschranks. Der Kaltstrom wird durch einen weiteren Schlauch unter der Bodenplatte zum silbernen Rohr des Kompressors geleitet, das den Anfang des Verflüssigers darstellt. Durch die gezielte Ausrichtung der Pneumatikschläuche beschränkte

sich der Wärmeeintrag auf die gewünschten Systemstellen, wodurch Störeinflüsse minimiert und die Reproduzierbarkeit der Messungen sichergestellt wurden.

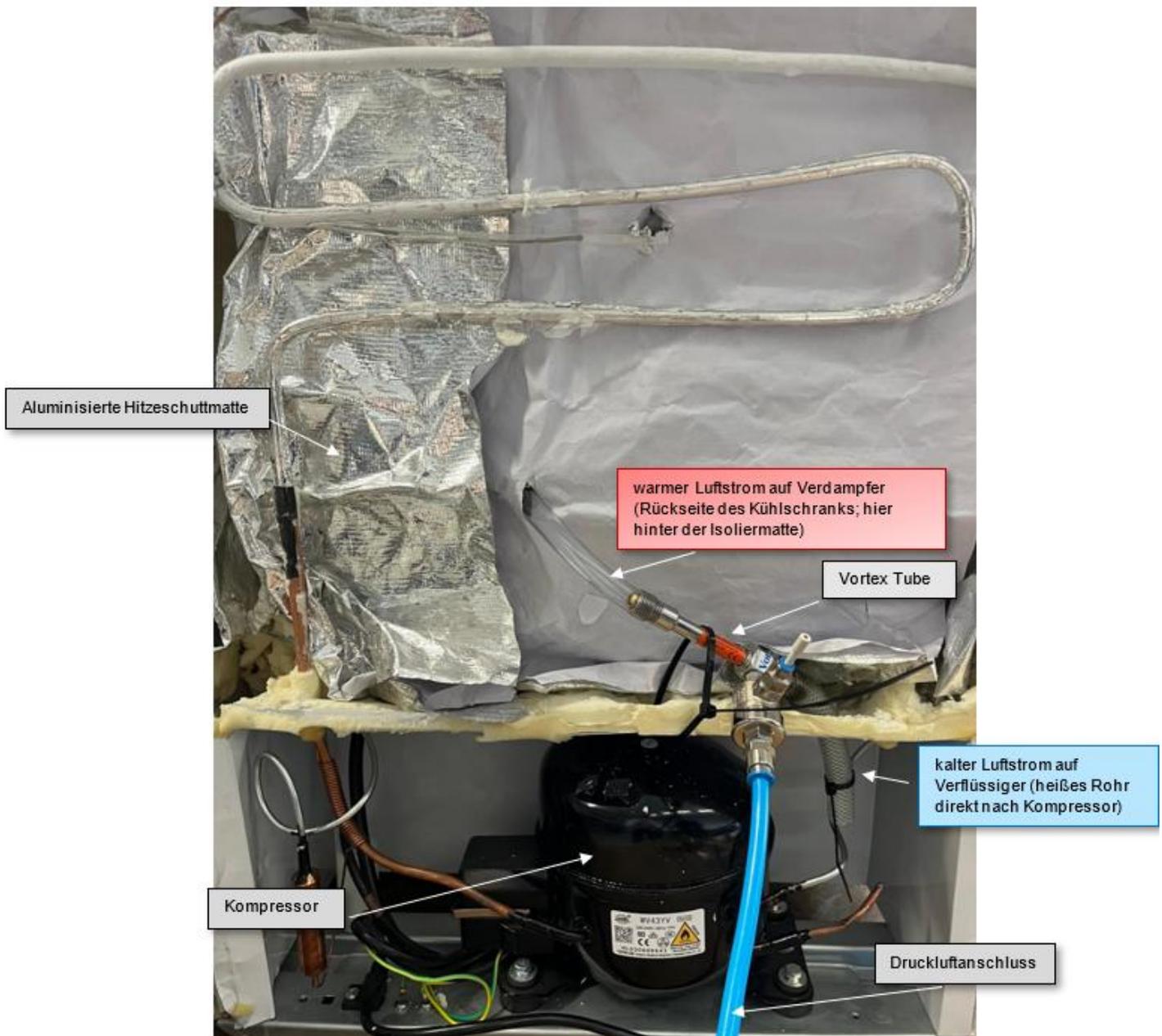


Abbildung 15: Versuchsaufbau mit Vortex Tube und aluminiumbeschichteten Hitzeschutzmatten

Ein maßgeblicher Aspekt bei der Bewertung der Ergebnisse war die Messmethodik. Im Gegensatz zu den theoretischen Berechnungen im Kapitel 3, die den Massenstrom des Kältemittels verwendeten, basierte die experimentelle Bewertung auf der Temperaturabnahme des 170 ml- Wasserbehälters im Kühlschrank. Diese Methode

ermöglichte keine direkte Berechnung des thermodynamischen COP nach denselben Parametern wie in der Theorie, bot jedoch eine vergleichbare Grundlage zur Beurteilung der Effizienzsteigerung zwischen den Szenarien. Der experimentelle COP wurde als Quotient aus dem Wärmeentzug des Wassers und der gemessenen elektrischen Leistungsaufnahme des Kühlschranks bestimmt. Diese relative Effizienz ermöglichte einen direkten Vergleich der Szenarien, unabhängig von den theoretischen Annahmen.

Die Auswahl des Generators für jedes Szenario wurde vorab durch separate Vergleichsmessungen getroffen, deren Details in den folgenden Kapiteln erläutert werden. Um die Robustheit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden für jedes Szenario mehrere Messungen durchgeführt. Die aufgezeichneten Temperaturwerte repräsentieren den Mittelwert dieser Experimente, wodurch statistische Schwankungen minimiert und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse erhöht wurden.

Die elektrische Leistungsaufnahme wurde auf Basis der Herstellerangabe (Nennleistung) berücksichtigt. Eine genauere Erfassung mittels eines Energiezählers wäre wünschenswert gewesen, um den COP-Wert noch präziser bestimmen zu können.

### 4.3 Szenario 1 – Referenzmessung ohne Vortex Tube

Dieses Szenario dient zur experimentellen Überprüfung des gleichen Szenarios aus dem Kapitel 3.3.1, wobei das Szenario aus dem Kapitel 3 theoretisch behandelt wurde. Im Zuge der Ermittlung der Effizienz des Kühlschranks, wurde zunächst eine Messung im Betriebszustand durchgeführt, bei dem das Vortex Tube gar nicht zur Verwendung kam. Dabei wurden folgende Temperaturen gemessen:

Tabelle 2: Temperaturmesspunkte Szenario 1

Zeit [min]	Temperatur [°C]
0	18,0
5	16,2
10	14,8
15	13,9
20	12,8
25	11,8
30	10,8

In der nachfolgenden Grafik sind die Messpunkte mittels Graphen dargestellt:

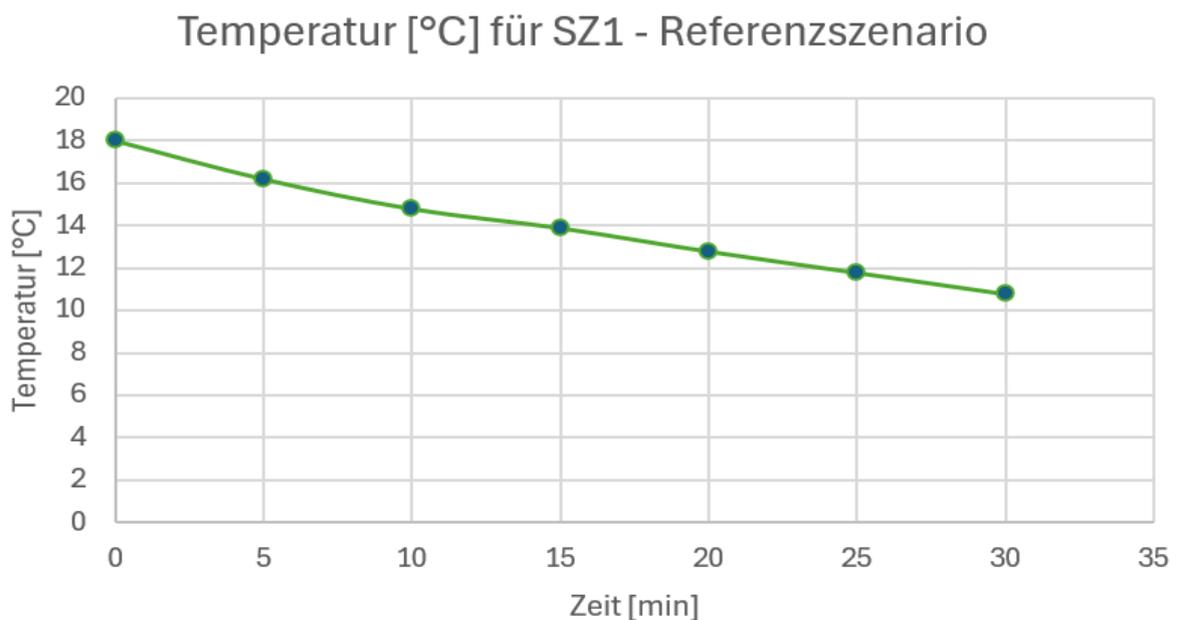


Abbildung 16: Graph des Temperaturverlaufs Szenario 1

### Berechnung des experimentellen COP für SZ1:

#### **Abgeführte Wärmemenge:**

$$Q_{SZ1} = m_w \cdot c_p \cdot \Delta T_{SZ1} \quad (16)$$

$m_w$ ...Masse des Wassers

$c_p$ ...spezifische Wärmekapazität Wasser

$\Delta T_{SZ1}$ ...Temperaturänderung des Wassers

$$Q_{SZ1} = 0,170 \text{ kg} \cdot 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 7,2 \text{ K} = 5,14 \text{ kJ} \quad (16.1)$$

#### **Aufgewendete elektrische Energie:**

$$W = P \cdot t \quad (17)$$

$P$ ...elektrische Leistungsaufnahme des Kühlschranks

$t$ ...Versuchszeitraum

$$W = 0,06 \text{ kW} \cdot 0,5 \text{ h} = 0,03 \text{ kWh} = 108 \text{ kJ} \quad (17.1)$$

#### **COP- Berechnung:**

$$COP_{SZ1,exp} = \frac{Q_{SZ1}}{W} = \frac{5,14 \text{ kJ}}{108 \text{ kJ}} = 0,047 \quad (18)$$

Da sich dieser COP-Wert, siehe Gleichung (18), ausschließlich auf das gekühlte Wasservolumen von 170 ml bezieht, wurde im nächsten Schritt ein idealisierter Vergleichswert des COP für das gesamte Innenraumvolumen des Kühlschranks (5,8 l) ermittelt. Dabei wurde angenommen, dass sich der spezifische Energieaufwand bei Kühlung einer größeren Masse analog verhält und keine zusätzlichen thermischen Verluste auftreten. Unter dieser idealisierten Annahme ergibt sich ein finaler COP-Wert für den gesamten Innenraum, der im Folgenden für dieses Szenario dargestellt wird:

$$\frac{5,8 \text{ l}}{0,17 \text{ l}} = 34,1 \quad (19)$$

$$Q_{SZ1} = 5,14 \text{ kJ} \cdot 34,1 = 175,4 \text{ kJ} \quad (20)$$

$$COP_{SZ1} = \frac{175,4 \text{ kJ}}{108 \text{ kJ}} = \mathbf{1,62} \quad (21)$$

Wie bereits in *Kapitel 3.3.1* erläutert, liegt der COP-Wert moderner Kühlschränke typischerweise zwischen 2,0 und 4,0. Für die theoretische Berechnung des Referenzszenarios (Szenario 1) wurde ein COP von 4,0 angenommen, da dieser Wert die idealisierte Obergrenze für einen modernen, effizienten Kühlschrank darstellt. Im experimentellen Szenario 1 ergibt sich jedoch ein COP von 1,62, berechnet aus dem Wärmeentzug des Wasservolumens und hochgerechnet auf das gesamte Innenvolumen des Kühlschranks. Diese Diskrepanz zwischen theoretischem und experimentellem COP wird durch mehrere Faktoren erklärt.

Ein maßgeblicher Grund ist, dass die theoretische Berechnung in *Kapitel 3.3.1* idealisierte thermodynamische Annahmen verwendet, darunter verlustfreie Wärmeübertragung, vollständige Verdampfung und Verflüssigung des Kältemittels R600a sowie ein isentroper Kompressorwirkungsgrad. Solche Annahmen entsprechen nicht den realen Bedingungen des Experiments, wo Wärmeverluste, unvollständige Zustandsänderungen und ein begrenzter Kompressorwirkungsgrad die Effizienz beeinträchtigen. Ein weiterer Faktor ist die bauliche Veränderung des Kühlschranks für die spätere Integration des Vortex Tubes. Wie in *Kapitel 4.1.3* beschrieben, wurde der werkseitige Isolierschaum entfernt, um Zugang zu den Kältemittelrohren zu erhalten. Anstelle des Schaums wurde eine aluminisierte Hitzeschutzmatte installiert, die jedoch die ursprüngliche Dämmwirkung, insbesondere an der Rückseite des Kühlschranks mit ursprünglich dicker Isolierung, nur teilweise ersetzen konnte. Dies führte zu erhöhten Wärmeverlusten, die die Kühlleistung und damit den COP negativ beeinflussten.

Darüber hinaus unterscheiden sich die Methodiken der COP-Berechnung. Die theoretische Berechnung in *Kapitel 3* basiert auf dem Massenstrom des Kältemittels R600a und idealisierten Zustandsänderungen im Kühlkreislauf, wie in *Kapitel 3.2.1* beschrieben. Im Gegensatz dazu wird der experimentelle COP aus dem Wärmeentzug eines Wasserbehälters mit einem Volumen von 170 ml berechnet. Die Berechnung basiert dabei auf der gemessenen Temperaturabnahme über einen definierten Zeitraum, im Verhältnis zur elektrischen Leistungsaufnahme des Kühlschranks (*siehe Kapitel 4.2*). Aufgrund dieser unterschiedlichen Ansätze ist ein direkter Vergleich der COP-Werte nicht möglich. Dennoch

bietet der experimentelle COP eine praktische Grundlage, um die relative Effizienz zu bewerten und Unterschiede in der Effizienzsteigerung zwischen Szenario 1 und den Szenarien mit Vortex Tube zu quantifizieren.

Obwohl der experimentelle COP von 1,62 deutlich unter dem theoretischen Wert (COP = 4,00) liegt, ist er plausibel, wenn die baulichen Modifikationen und realen systembedingten Verluste berücksichtigt werden. Dieser Wert stellt eine valide Referenz für die Bewertung der folgenden Szenarien dar, in denen der Einsatz des Vortex Tubes die Effizienz potenziell verbessern könnte.

#### **4.4 Szenario 2 – Warmluft auf Verdampfer**

In Szenario 2 wurde der warme Luftstrom des Vortex Tubes gezielt auf die Verdampferrohre an der Rückseite des Kühlschranks geleitet. Das Ziel war es, dem Verdampfer und dem Kältemittel R600a zusätzliche thermische Energie zuzuführen, um die Erwärmung und infolgedessen die Verdampfung des Kältemittels zu beschleunigen. Dies sollte die Wärmeaufnahme aus dem Innenbereich des Kühlschranks steigern und die Kühlleistung verbessern, wie in *Kapitel 3.2.2* theoretisch beschrieben.

Für den Versuch wurde der GC8-Generator für das Vortex Tube verwendet, da dieser eine optimale Kombination aus einer Lufttemperatur von 53 °C und einem ausreichenden Luftstrom bietet, wie vorherige Vergleichsmessungen (*Kapitel 4.2*) gezeigt haben. Im Vergleich dazu erzeugten R-Generatoren höhere Temperaturen (bis über 100 °C), jedoch bei deutlich geringeren Luftgeschwindigkeiten, was für diesen Versuch nachteilig war. Eine hohe Luftgeschwindigkeit ist maßgeblich, um den Verdampfer gleichmäßig über eine große Fläche zu erwärmen und punktuelle Erwärmung zu vermeiden, die den dahinterliegenden Kühlschranksinnenraum ungewollt aufheizen könnte.

Verschiedene Methoden zur Führung des Warmstroms wurden getestet, um die Effizienz der Wärmeübertragung zu maximieren. Ein einfacher Pneumatikschlauch, der die Warmluft quer über den Verdampfer leitete, lieferte die besten Ergebnisse, gemessen an der Abkühlgeschwindigkeit des Wasservolumens im Kühltank (siehe Kapitel 4.2).



Abbildung 17: Einfaches Schlauchende für warmen Luftstrom

Im Vergleich dazu wurde zunächst ein alternatives Schlauchende eingesetzt, das mit mehreren querverteilten Bohrungen versehen war. Ziel war es, den austretenden Warmluftstrom flächiger auf den Verdampfer zu verteilen, um eine breitere thermische Abdeckung zu erzielen. Die dahinterstehende war, die Wärme gezielter und gleichmäßiger einzubringen. In der Praxis zeigte sich jedoch, dass dieser Ansatz nicht funktionierte wie ursprünglich angenommen. Durch die Vielzahl an Öffnungen verringerte sich der lokale Druck innerhalb des Schlauchs deutlich, sodass an den Endungen der einzelnen Bohrungen kaum noch Luft austrat. Stattdessen führten die Querbohrungen zu einem Druckabfall, vermutlich kam es zu vermehrten Verwirbelungen im Schlauch, was zu einem nahezu vollständigen Zusammenbruch der Strömungsgeschwindigkeit an den Austrittsstellen führte. Da die Luftbewegung jedoch entscheidend für den konvektiven Wärmeaustausch ist, konnte auf diese Weise keine nennenswerte Wärmeübertragung zum Verdampfer stattfinden.



Abbildung 18: Versuch mit Schlauchende für warmen Luftstrom mit Querbohrungen

Folgende Messdaten wurden nach mehreren Versuchen gemittelt:

Tabelle 3: Temperaturmesspunkte Szenario 2

Zeit [min]	Temperatur [°C]
0	18,0
5	15,1
10	14,0
15	13,1
20	12,4
25	11,5
30	10,4

In der nachfolgenden Grafik sind die Messpunkte mittels Graphen dargestellt:

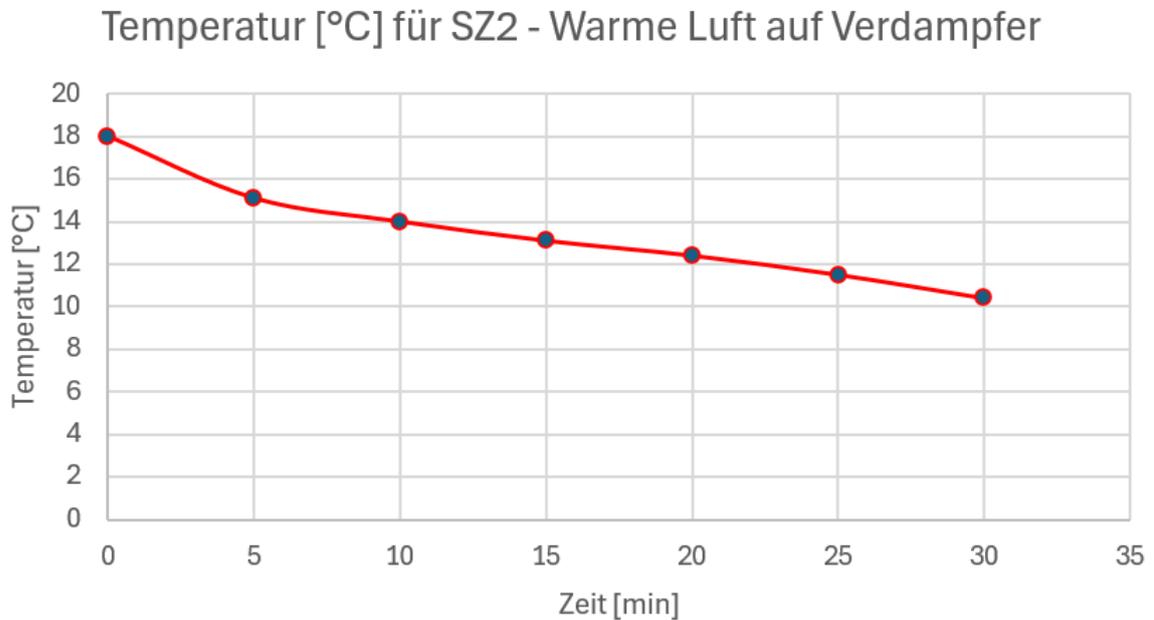


Abbildung 19: Graph des Temperaturverlaufs Szenario 2

Berechnung des experimentellen COP für SZ2:

**Abgeführte Wärmemenge:**

$$Q_{SZ2} = m_w \cdot c_p \cdot \Delta T_{SZ2} \quad (22)$$

$m_w$ ...Masse des Wassers

$c_p$ ...spezifische Wärmekapazität Wasser

$\Delta T_{SZ2}$ ...Temperaturänderung des Wassers

$$Q_{SZ2} = 0,170 \text{ kg} \cdot 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 7,6 \text{ K} = 5,40 \text{ kJ} \quad (23)$$

**Aufgewendete elektrische Energie:**

$$W = P \cdot t \quad (17)$$

$P$ ...elektrische Leistungsaufnahme des Kühlschranks

$t$ ...Versuchszeitraum

$$W = 0,06 \text{ kW} \cdot 0,5 \text{ h} = 0,03 \text{ kWh} = 108 \text{ kJ} \quad (17.1)$$

### COP- Berechnung:

$$COP_{SZ2,exp} = \frac{Q_{SZ2}}{W} = \frac{5,40 \text{ kJ}}{108 \text{ kJ}} = 0,050 \quad (24)$$

Da sich dieser COP-Wert, siehe Gleichung (24), ausschließlich auf das gekühlte Wasservolumen von 170 ml bezieht, wurde im nächsten Schritt ein idealisierter Vergleichswert des COP für das gesamte Innenraumvolumen des Kühlschranks (5,8 l) ermittelt. Dabei wurde angenommen, dass sich der spezifische Energieaufwand bei der Kühlung einer größeren Masse analog verhält und keine zusätzlichen thermischen Verluste auftreten. Unter dieser idealisierten Annahme ergibt sich ein finaler COP-Wert für den gesamten Innenraum, der im Folgenden für dieses Szenario dargestellt wird:

$$\frac{5,8 \text{ l}}{0,17 \text{ l}} = 34,1 \quad (19)$$

$$Q_{SZ2,Innenvolumen} = 5,40 \text{ kJ} \cdot 34,1 = 184,98 \text{ kJ} \quad (25)$$

$$COP_{SZ2} = \frac{184,98 \text{ kJ}}{108 \text{ kJ}} = 1,71 \quad (26)$$

Die theoretische Berechnung für Szenario 2 in *Kapitel 3.3.2* ergab einen idealisierten COP-Wert von 5,44, was einer Steigerung von +36 % gegenüber dem Referenzszenario (COP = 4,00) entspricht. Im experimentellen Szenario 2 wurde hingegen ein COP von 1,71 erreicht, was eine Verbesserung von 5,56 % gegenüber dem experimentellen COP von 1,62 in Szenario 1 darstellt (*siehe Kapitel 4.3*). Diese deutliche Diskrepanz zwischen theoretischem und experimentellem COP lässt sich durch mehrere Faktoren erklären.

Ein maßgeblicher Grund ist die unzureichende großflächige Wärmeübertragung auf den Verdampfer. Trotz gezielter Zufuhr des warmen Luftstroms des Vortex Tubes mit 53 °C, war die Wärmeübertragungsfläche vermutlich nicht ausreichend, um eine schnelle und gleichmäßige Verdampfung des Kältemittels R600a zu bewirken. Dies begrenzte die Wärmeaufnahme aus dem Kühlschrankinneren und führte nur zu einer leichten Verbesserung der Kühlleistung. Ein weiterer Faktor könnte eine ungewollte lokale Erwärmung des Kühlschrankinnenraums durch den Warmstrom sein, insbesondere in Bereichen mit eingeschränkter Dämmwirkung der aluminisierten Hitzeschutzmatte. Solche thermischen Störeinflüsse hätten die Effizienzsteigerung teilweise kompensiert.

Trotz der geringen Verbesserung bestätigt Szenario 2 die Wirksamkeit des Ansatzes. Die gezielte Erwärmung des Verdampfers durch den Warmstrom des Vortex Tubes führte zu einer messbaren Steigerung der Kühlleistung, wenn auch deutlich unter den theoretischen Erwartungen. Der experimentelle COP von 1,71 bietet eine Grundlage für den Vergleich mit den folgenden Szenarien 3 und 4, in denen weitere Optimierungen untersucht werden.

## **4.5 Szenario 3 – Kaltluft auf Verflüssiger**

Im dritten Szenario wird der kühle Luftstrom, den der Vortex Tube erzeugt, gezielt auf die Verflüssigerleitung des Kühlschranks gerichtet, um die Effizienz des Kühlprozesses zu verbessern. Das Ziel besteht darin, das heiße, verdichtete Kältemittelgas unmittelbar nach dem Verlassen des Kompressors abzukühlen, um die Wärmeabgabe an die Umgebung zu verringern und die Kondensation zu erleichtern. Theoretisch würde dies den Druck im Kühlkreislauf verringern und die Gesamteffizienz steigern, wie dies in *Kapitel 3.2.2* erläutert wird. Im Zuge unterschiedlicher Versuche hat sich gezeigt, dass die optimale Kühlleistung erleichtert wird, wenn der Luftschlauch präzise auf die Verflüssigerleitung ausgerichtet ist, die direkt aus dem Kompressor kommt und entlang der Außenwand des Kühlschranks in mehreren Schleifen verläuft.

Der GC4-Generator wurde für den Versuch mit dem Vortex Tube basierend auf früheren Vergleichsmessungen ausgewählt (*siehe Kapitel 4.2*). Die Untersuchungen zeigen, dass GR-Generatoren bei einer geringen Luftzufuhr Temperaturen von bis zu  $-20\text{ °C}$  erzeugen. Um sicherzustellen, dass ein effizienter Wärmeaustausch mit der Verflüssigerleitung stattfindet, wurde der GC4-Generator aufgrund seiner hohen Strömungsgeschwindigkeit bevorzugt. Gemäß der Darstellung in *Abbildung 16 (Kapitel 4.2)* wurde der Pneumatikschlauch so angeordnet, dass er den kalten Luftstrom direkt auf das heiße Verflüssigerrohr nach dem Kompressor lenkt, um eine bestmögliche Abkühlung zu gewährleisten.

Folgende Messdaten wurden nach mehreren Versuchen gemittelt:

Tabelle 4: Temperaturmesspunkte Szenario 3

Zeit [min]	Temperatur [°C]
0	18,0
5	15,6
10	14,0
15	12,7
20	11,4
25	10,2
30	9,1

In der nachfolgenden Grafik sind die Messpunkte mittels Graphen dargestellt:

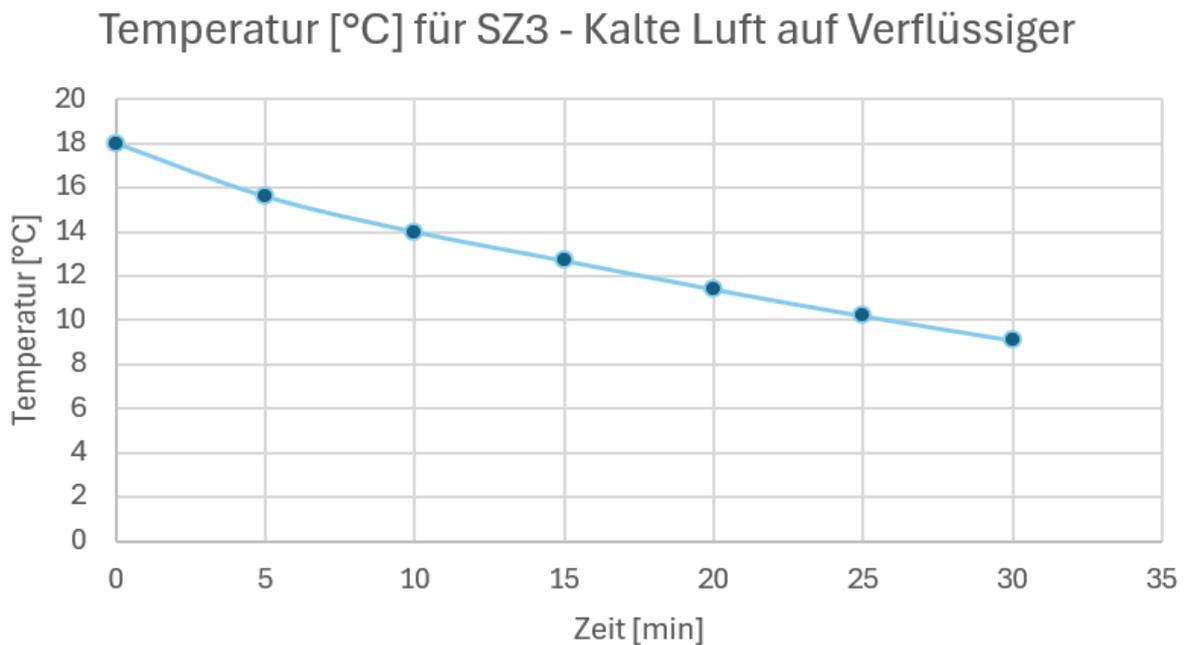


Abbildung 20: Graph des Temperaturverlaufs Szenario 3

Berechnung des experimentellen COP für SZ3:

**Abgeführte Wärmemenge:**

$$Q_{SZ3} = m_w \cdot c_p \cdot \Delta T_{SZ3} \quad (27)$$

$m_w$ ...Masse des Wassers

$c_p$ ...spezifische Wärmekapazität Wasser

$\Delta T_{SZ3}$ ...Temperaturänderung des Wassers

$$Q_{SZ3} = 0,170 \text{ kg} \cdot 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 8,9 \text{ K} = 6,35 \text{ kJ} \quad (27.1)$$

**Aufgewendete elektrische Energie:**

$$W = P \cdot t \quad (17)$$

$P$ ...elektrische Leistungsaufnahme des Kühlschranks

$t$ ...Versuchszeitraum

$$W = 0,06 \text{ kW} \cdot 0,5 \text{ h} = 0,03 \text{ kWh} = 108 \text{ kJ} \quad (17.1)$$

**COP- Berechnung:**

$$COP_{SZ3,exp} = \frac{Q_{SZ3}}{W} = \frac{6,35 \text{ kJ}}{108 \text{ kJ}} = 0,059 \quad (28)$$

Da sich dieser COP-Wert, siehe Gleichung (28), ausschließlich auf das gekühlte Wasservolumen von 170 ml bezieht, wurde im nächsten Schritt ein idealisierter Vergleichswert des COP für das gesamte Innenraumvolumen des Kühlschranks (5,8 l) ermittelt. Dabei wurde angenommen, dass sich der spezifische Energieaufwand bei Kühlung einer größeren Masse analog verhält und keine zusätzlichen thermischen Verluste auftreten. Unter dieser idealisierten Annahme ergibt sich ein finaler COP-Wert für den gesamten Innenraum, der im Folgenden für dieses Szenario dargestellt wird:

$$\frac{5,8 \text{ l}}{0,17 \text{ l}} = 34,1 \quad (19)$$

$$Q_{SZ3,Innenvolumen} = 6,35 \text{ kJ} \cdot 34,1 = 216,54 \text{ kJ} \quad (29)$$

$$COP_{SZ3} = \frac{216,54 \text{ kJ}}{108 \text{ kJ}} = \mathbf{2,01} \quad (30)$$

Die theoretische Berechnung für Szenario 3 in *Kapitel 3.3.3* ergab einen idealisierten COP-Wert von 6,09, was einer Steigerung von +52,3 % gegenüber dem Referenzszenario mit einem COP von 4,00 entspricht. Im experimentellen Szenario 3 wurde hingegen ein COP von 2,01 erreicht, was eine Verbesserung von +24,2 % gegenüber dem experimentellen COP von 1,62 in Szenario1 (*Kapitel 4.3*) darstellt. Obwohl eine klare Effizienzsteigerung erkennbar ist, fällt diese geringer aus als theoretisch erwartet.

Die gesteigerte Effizienz lässt sich durch zwei Hauptfaktoren erklären. Erstens führte die Abkühlung des heißen Kältemittels R600a direkt nach dem Kompressor durch den kalten Luftstrom des Vortex Tubes (bis -20 °C, siehe *Kapitel 4.5*, erster Teil) vermutlich zu einer Druckreduktion im Kühlkreislauf. Dies verbesserte die Wärmeabgabe des Verflüssigers und erhöhte die Effizienz des Kondensationsprozesses. Zweitens konnte das Kältemittel schneller auf eine niedrigere Temperatur abgekühlt werden, bevor es das Expansionsventil und den Verdampfer erreichte, was eine effizientere Wärmeentnahme aus dem Kühlschranksinnenraum ermöglichte.

Die experimentelle Steigerung ist jedoch nur etwa halb so groß wie theoretisch prognostiziert. Maßgeblich dafür ist, dass die theoretischen Berechnungen idealisierte Annahmen treffen, wie verlustfreie Wärmeübertragung, isentrope Prozesse, sowie optimale Kopplung zwischen dem kalten Luftstrom und dem Verflüssigerrohr. In der Praxis treten jedoch Verluste auf, insbesondere durch die unzureichende Dämmwirkung der aluminisierten Hitzeschutzmatte (*siehe Kapitel 4.1.3*). Während der werkseitige Isolierschaum eine Dicke von bis zu 4 cm aufwies, beträgt die Dicke der Matte nur wenige Millimeter, was zu erhöhten thermischen Verlusten führt und die Effizienzsteigerung begrenzt.

## **4.6 Szenario 4 – Kombinierte Nutzung von Warmluft und Kaltluft**

Szenario 4 stellt das anspruchsvollste Szenario dar, bei dem der warme und der kalte Luftstrom des Vortex Tubes gleichzeitig genutzt werden, um den thermodynamischen Kreislauf des Kühlschranks zu optimieren. Durch die Kombination der Ansätze aus Szenario 2 (Warmluft auf Verdampfer) und Szenario 3 (Kaltluft auf Verflüssiger) werden Verdampfer und Verflüssiger gezielt mit den jeweiligen Luftströmen beaufschlagt. Ziel ist es, einerseits die Verdampfung des Kältemittels R600a zu beschleunigen und andererseits die Kondensation sowie die Abkühlung des Kältemittels zu verbessern, um die Gesamteffizienz zu maximieren, wie in *Kapitel 3.2.2* theoretisch beschrieben. Die theoretische Berechnung

für Szenario 4 (*Kapitel 3.3.4*) ergab einen idealisierten COP-Wert von 7,44, der höchste aller Szenarien und entspricht einer Steigerung von 86 % gegenüber dem Referenzszenario mit einem COP von 4,00. Daher waren die Erwartungen an das Experiment hoch, eine vergleichbare Effizienzsteigerung zu erzielen.

Für den Versuch wurden mehrere Konfigurationen getestet, einschließlich verschiedener Einstellungen der Stellschraube des Vortex Tubes, die den Luftstrom und damit die Temperaturen der Luftströme variieren ließ, sowie unterschiedliche Generatoren. Vergleichsmessungen (*siehe Kapitel 4.2*) zeigten, dass der GC8-Generator optimale Ergebnisse liefert. Dieser erzeugt einen warmen Luftstrom von 38 °C und einen kalten Luftstrom von -18°C bei gleichzeitig hoher Strömungsgeschwindigkeit beider Ströme, was einen effektiven Wärmeaustausch gewährleistet.

Folgende Messdaten wurden nach mehreren Versuchen im Mittel erreicht:

Tabelle 5: Temperaturmesspunkte Szenario 4

<b>Zeit [min]</b>	<b>Temperatur [°C]</b>
0	18,0
5	15,4
10	14,0
15	12,9
20	11,6
25	10,3
30	9,2

In der nachfolgenden Grafik sind die Messpunkte mittels Graphen dargestellt:

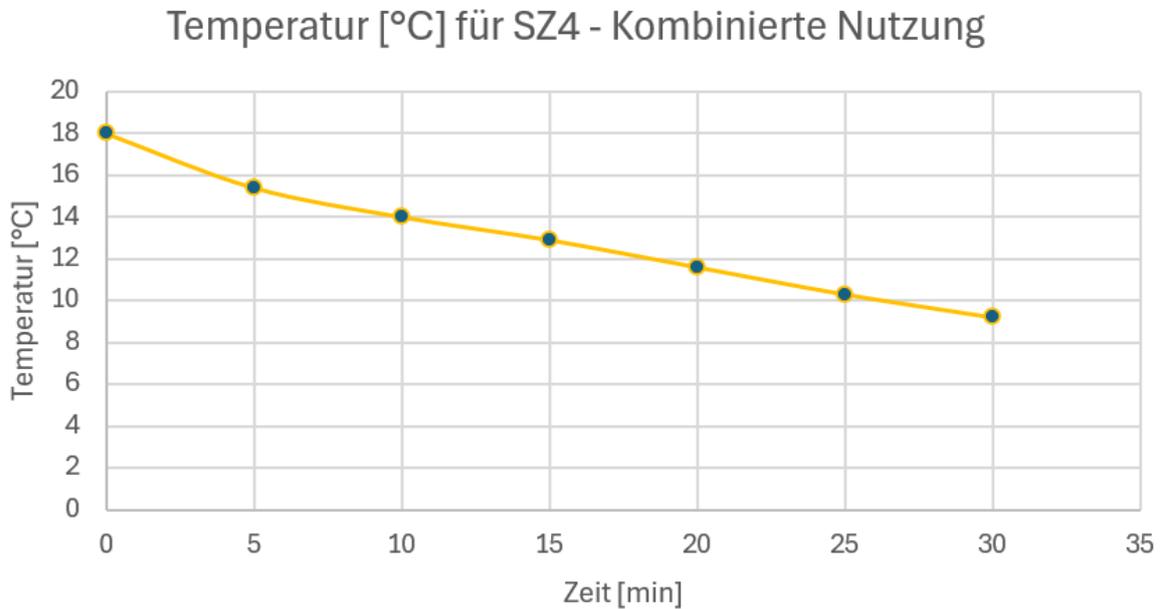


Abbildung 21: Graph des Temperaturverlaufs Szenario 4

Berechnung des experimentellen COP für SZ4:

**Abgeführte Wärmemenge:**

$$Q_{SZ4} = m_w \cdot c_p \cdot \Delta T_{SZ4} \quad (31)$$

$m_w$ ...Masse des Wassers

$c_p$ ...spezifische Wärmekapazität Wasser

$\Delta T_{SZ4}$ ...Temperaturänderung des Wassers

$$Q_{SZ4} = 0,170 \text{ kg} \cdot 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 8,8 \text{ K} = 6,28 \text{ kJ} \quad (32)$$

**Aufgewendete elektrische Energie:**

$$W = P \cdot t \quad (17)$$

$P$ ...elektrische Leistungsaufnahme des Kühlschranks

$t$ ...Versuchszeitraum

$$W = 0,06 \text{ kW} \cdot 0,5 \text{ h} = 0,03 \text{ kWh} = 108 \text{ kJ} \quad (17.1)$$

### COP- Berechnung:

$$COP_{SZ4,exp} = \frac{Q_{SZ4}}{W} = \frac{6,28 \text{ kJ}}{108 \text{ kJ}} = 0,058 \quad (33)$$

Da sich dieser COP-Wert, siehe Gleichung (33), ausschließlich auf das gekühlte Wasservolumen von 170 ml bezieht, wurde im nächsten Schritt ein idealisierter Vergleichswert des COP für das gesamte Innenraumvolumen des Kühlschranks (5,8 l) ermittelt. Dabei wurde angenommen, dass sich der spezifische Energieaufwand bei Kühlung einer größeren Masse analog verhält und keine zusätzlichen thermischen Verluste auftreten. Unter dieser idealisierten Annahme ergibt sich ein finaler COP-Wert für den gesamten Innenraum, der im Folgenden für dieses Szenario dargestellt wird:

$$\frac{5,8 \text{ l}}{0,17 \text{ l}} = 34,1 \quad (19)$$

$$Q_{SZ4,Innenvolumen} = 6,28 \text{ kJ} \cdot 34,1 = 214,15 \text{ kJ} \quad (34)$$

$$COP_{SZ4} = \frac{214,15 \text{ kJ}}{108 \text{ kJ}} = \mathbf{1,98} \quad (35)$$

Aufgrund des hohen theoretischen COP-Werts von 7,44 für Szenario 4 (*Kapitel 3.3.4*) waren die Erwartungen an eine signifikante experimentelle Effizienzsteigerung groß. Der experimentelle COP-Wert von 1,98 liegt jedoch nur marginal über dem von Szenario 2 (COP = 1,71) und überraschend unter dem von Szenario 3 (COP = 2,01). Im Vergleich zum experimentellen Referenzszenario mit einem COP von 1,62 (*Kapitel 4.3*) entspricht dies einer Verbesserung von +22,2 %, während die theoretische Steigerung von Szenario 4 gegenüber dem theoretischen Referenzszenario (COP = 4,00) +86 % beträgt. Somit blieb die erwartete hohe Effizienzsteigerung aus, und das Ergebnis ähnelt dem von Szenario 3. Die geringe experimentelle Effizienz lässt sich durch mehrere Faktoren erklären. Ein wesentlicher Grund ist die gegenseitige thermische Beeinträchtigung der warmen (+38 °C) und kalten (-18 °C) Luftströme aufgrund der kompakten Bauweise des Kühlschranks. Im schmalen Zwischenraum zwischen der Rückwand des Kühlschranks und der außenliegenden Hitzeschutzmatte kam es aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten beider Luftströme zu gegenseitigen Beeinflussungen. Die entstehenden Interferenzen führten zu Vermischungen beider Ströme, die den gezielten Wärmeübergang an den vorgesehenen Stellen (Verdampfer und Verflüssiger) erschwerten.

Zudem hat die warme Luft nicht nur den Verdampfer, sondern auch den Kühltankinnenraum ungewollt erwärmt, insbesondere in Bereichen mit geringer Dämmwirkung der aluminisierten Hitzeschutzmatte, was die Kühlleistung negativ beeinflusste.

Obwohl die Kombination der Ansätze aus Szenario 2 und 3 theoretisch hohe Effizienzsteigerungen versprach, zeigt das Experiment, dass die praktische Umsetzung komplex ist. Eine präzise Abstimmung von Luftmenge, Temperatur, Strömungsrichtung und Anstromfläche ist erforderlich, um das volle Potenzial auszuschöpfen. Zwar lässt sich eine Effizienzsteigerung theoretisch begründen, jedoch konnte der vorliegende Versuchsaufbau die erwartete theoretische COP-Steigerung nicht umsetzen.

## 4.7 Vergleichende Darstellung der Temperaturverläufe

Um nun die Ergebnisse aus allen Experimenten der jeweiligen Szenarien gut miteinander vergleichen zu können, wurden die Graphen der Szenarien in der folgenden Abbildung übereinandergelegt.

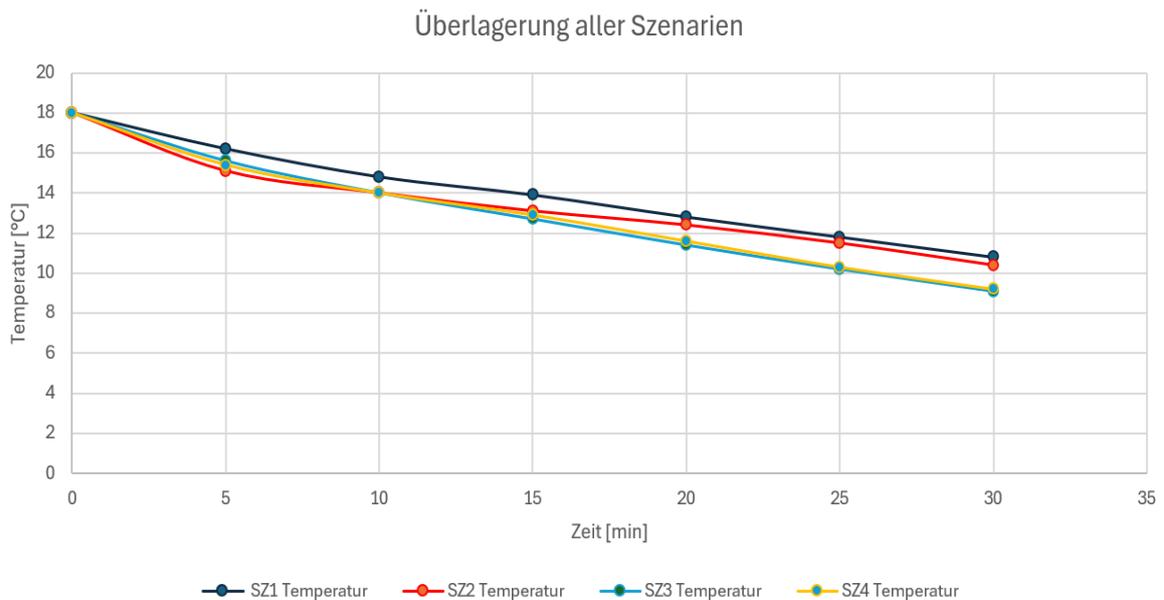


Abbildung 22: Messpunkte für Temperaturverläufe aller Szenarien

Die Grafik zeigt die Temperaturverläufe aller vier Szenarien beginnend mit dem gleichen Ausgangswert (18 °C) über einen Zeitraum von 30 Minuten.

Am deutlichsten erkennbar ist der langsame und praktisch lineare Temperaturabfall von dem Referenzszenario (SZ1, dunkelblau). Die anderen drei Szenarien mit dem Vortex Tube, zeigen alle eine deutlich schnellere Abkühlung, was auf eine gestiegene Effizienz des thermodynamischen Prozesses deutet. Man erkennt, dass obwohl der hellblaue Graph von Szenario 3 bis zur ca. 15. Minute die langsamste Abkühlung hat, danach jedoch den stärksten Temperaturabfall zeigt und auch das Experiment mit der tiefsten Temperatur beendet. Folglich wurde bei Szenario 3 die höchste experimentelle COP-Steigerung erreicht. Szenario 2 (SZ2, rot), bei dem die warme Luft auf den Verdampfer gerichtet wurde, erreicht zwar in den ersten 10 Minuten die stärkste Abkühlung, jedoch flacht die Abkühlrate dann rasch ab und erreicht nur eine geringe Effizienzsteigerung verglichen mit dem Referenzszenario.

Szenario 4 (SZ4, gelb), also die kombinierte Nutzung von Warmluft (auf Verdampfer) und Kaltluft (auf Verflüssiger) liegt nur marginal hinter dem Szenario 3. Trotz der theoretischen

Erwartungen, dass dieses Szenario das beste Ergebnis liefern wird, hat dieses Experiment nur den zweitbesten Kühleffekt erzielt.

Die Grafik bestätigt somit den Trend, dass der Einsatz des Vortex Tube zu einer Verbesserung in der Kühlung des Kühlschranks führen kann. Gleichzeitig zeigt sich auch, dass die simultane Nutzung beider Luftströme (SZ4) nicht automatisch zu einer Erhöhung der Effizienz führt, sondern eine präzise Abstimmung unterschiedlicher Parameter notwendig ist, um unerwünschte Wechselwirkungen zu minimieren, die sich auf das Ergebnis auswirken können.

Tabelle 6: COP-Werte experimenteller Szenarien

<b>Szenario</b>	<b>COP</b>
1.Klassischer Kreislauf	1,62
2.Warmstrom auf Verdampfer	1,71
3.Kaltstrom auf Kompressor	2,01
4.Kombinierte Nutzung	1,98

## 5 Schlussfolgerung und Ausblick

### 5.1 Schlussfolgerung

Die vorliegende Masterarbeit untersucht die Integration von einem Vortex Tubes in einen thermodynamischen Kühlkreislauf, sowohl auf theoretischer als auch praktischer Ebene, mit dem Ziel, dessen Effizienz zu steigern. Die theoretische Analyse zeigt, dass die gezielte Nutzung der warmen und kalten Luftströme des Vortex Tubes, den Coefficient of Performance, unter idealisierten Bedingungen signifikant verbessern kann, wobei das Szenario 4 (kombinierte Nutzung beider Luftströme) mit einem COP von 7,44, das beste Resultat erzielt. Die anschließende experimentelle Untersuchung bestätigt die theoretischen Berechnungen der Effizienzsteigerung in allen Szenarien mit der VT-Integration, wobei hier das Szenario 3 lediglich eine Steigerung von +24,2 % gegenüber dem Referenzszenario erreicht, also deutlich geringer als theoretisch prognostiziert. Szenario 4 erreicht hingegen nur das zweitbeste Ergebnis mit einer Effizienzsteigerung von +22,2 %, was vorwiegend auf thermische Wechselwirkungen der beiden Luftströme, thermische Verluste und unzureichende Isolierung zurückzuführen ist.

Die zentrale Erkenntnis dieser Arbeit ist, dass der notwendige Energieaufwand für die Druckluftherzeugung, die theoretischen Vorteile einer VT-Implementierung zur Gänze relativiert. Damit beantwortet die Arbeit die zu Beginn gestellten Forschungsfragen wie folgt:

- (1) Die VT-Integration verbessert die Effizienz eines Kühlsystems, jedoch nur unter spezifischen idealisierten Bedingungen.
- (2) Szenario 3 (Kaltluft auf Verflüssiger) liefert die besten Ergebnisse und stellt die effizienteste Variante dar.
- (3) Die zusätzlichen, aber notwendigen Energieaufwände für die Druckluftherzeugung machen den Einsatz des Vortex Tubes in Haushaltskühlsystemen unwirtschaftlich.

Diese Studie zeigt deutlich, dass die Integration des Vortex Tubes in thermodynamischen Kreisläufen vielversprechend ist, jedoch stark von der Verfügbarkeit einer kosteneffizienten Druckluftversorgung abhängt. Die erzielten Ergebnisse dieser Masterarbeit bieten eine fundierte Grundlage für die Bewertung der Praxistauglichkeit und liefern wertvolle Hinweise über weiterführende Optimierungsmöglichkeiten in spezifischen Anwendungsbereichen.

## 5.2 Diskussion

Die vorliegende Arbeit konnte zeigen, dass die Integration eines Vortex Tubes unter experimentellen Bedingungen zu einer merklichen Verbesserung der Kühlleistung führen kann. Im experimentellen Szenario 3 wurde der höchste COP-Wert von 2,01 erreicht, was einer Steigerung von +24,2 % gegenüber dem Referenzszenario entspricht. Dennoch blieben Fragen zur Reproduzierbarkeit, zu systematischen Grenzen und zur praktischen Anwendbarkeit in realen Kühlsystemen offen, die in diesem Kapitel beantwortet werden.

Eine besondere Herausforderung stellte sich in der Stabilität der jeweiligen Versuchsbedingungen dar. Die eingesetzte Druckluftversorgung des Labors der Fachhochschule war zwar grundsätzlich leistungsfähig, zeigte aber nach ungefähr 15 min Laufzeit eine merkliche Schwankung des Druckniveaus um etwa  $\pm 1$  bar. Um den Solldruck von 7 bar zu halten, war eine manuelle Justierung des Nadelventils erforderlich. Diese Druckabweichungen, auch wenn nur sehr kurz, beeinflussen den Luftmassenstrom und damit auch den thermodynamischen Effekt des Vortex Tubes und wirkte sich auf die Effizienz des gesamten Szenarios aus. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor betrifft die Temperaturmessung. Der verwendete Temperatursensor weist eine Toleranz von  $\pm 1$  K auf, was insbesondere bei kleinen Temperaturdifferenzen eine Rolle spielt. Diese beiden Aspekte schränken die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse ein und sollten in einer zukünftigen Untersuchung durch konstantere Druckregelung (z.B. Druckregler, stärkerer Kompressor) und hochauflösendere Sensorik verbessert werden.

Neben den genannten Einflussfaktoren wäre auch eine präzise Erfassung der elektrischen Leistungsaufnahme des Kühlschranks wünschenswert gewesen. In der vorliegenden Arbeit wurde der Wert über die Nennleistung angesetzt. Eine Echtzeitmessung über die gesamte Dauer des jeweiligen Experiments mittels Energiezähler hätte die Genauigkeit der COP-Berechnung weiter erhöht.

In Bezug auf die praktische Übertragbarkeit des Systems stellt sich die Frage, inwiefern der Einsatz eines Vortex Tubes auch in realen Kühl- und Klimaanlageanlagen technisch und wirtschaftlich sinnvoll sein kann. Der große Vorteil des Vortex Tubes liegt in seiner Einfachheit (keine beweglichen Teile, kein Stromverbrauch im VT selbst), doch dieser Vorteil wird durch den hohen Energieaufwand der Druckluftherzeugung relativiert. Zwar wurde dieser Energieaufwand in der vorliegenden Arbeit bei der COP-Berechnung berücksichtigt, dennoch bleibt der Vergleich mit anderen etablierten Effizienzsteigerungsmaßnahmen notwendig.

Darüber hinaus sollte bei der Bewertung der Gesamteffizienz auch der ökologische Aspekt berücksichtigt werden. Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck eines Systems mit Vortex Tube hängt

maßgeblich von der Stromquelle ab, mit der die Druckluft erzeugt wird. Wird der Strom aus fossilen Quellen bereitgestellt, kann die Umweltbilanz trotz neugewonnenen thermodynamischen Nutzens ungünstig ausfallen. Die Nutzung von überschüssiger erneuerbarer Energie, etwa aus Photovoltaikanlagen oder Prozesswärme, würde die Nachhaltigkeit eines Vortex Tube gestützten Systems deutlich verbessern.

Ein Vergleich mit anderen Effizienzsteigerungsmaßnahmen lässt sich beispielsweise mit der Methode des Subcoolings (Unterkühlung) anstellen. Subcooling bezeichnet die Abkühlung des Kältemittels unterhalb seiner Kondensationstemperatur nach dem Verflüssiger. Dies stellt sicher, dass sich im nun flüssigen Kältemittel keinerlei Dampf befindet, verbessert so die vorzeitige Verdampfung vor dem Expansionsventil und führt zu einer effizienteren Verdampfung im Verdampfer [29]. Studien zeigen, dass Subcooling den COP eines Systems um etwa 5-15 % steigern kann [30]. Es handelt sich hierbei um eine etablierte und vielfach angewandte Technik, die insbesondere durch den Einsatz eines Liquid-Suction-Heat-Exchangers (LSHX) aktiv realisiert werden kann [31]. Im Vergleich dazu bietet der VT eine deutlich höhere theoretische Effizienzsteigerung (+86 %, Szenario 4), die in der Praxis aber stark vom Druckluftsystem abhängig ist.

Ein denkbarer Zukunftsansatz könnte darin bestehen, den VT nicht nur zur direkten Luftkühlung, sondern auch zur Erzeugung eines Subcooling-Effekts einzusetzen. Wenn der kalte Strom des Vortex Tubes gezielt auf den Flüssigkeitsabschnitt des Verflüssigerrohres kurz vor dem Expansionsventil geleitet würde, könnte das Kältemittel aktiv unterkühlt werden, ohne dass ein zusätzlicher Wärmetauscher erforderlich ist. Damit ließe sich möglicherweise ein höherer COP erzielen, während gleichzeitig auf bestehende Systemkomponenten zurückgegriffen werden kann.

Neben Subcooling existieren weitere Technologien zur Effizienzsteigerung oder direkten Kühlung, etwa Peltier-Elemente, die auf dem thermoelektrischen Effekt basieren [32]. Diese Systeme sind besonders kompakt und einfach zu steuern, weisen jedoch eine vergleichsweise geringe energetische Effizienz auf [32]. Klassische Wärmetauscher bieten in vielen Anwendungen nach wie vor eine robuste und effektive Lösung. Im Vergleich dazu ist das Vortex Tube mechanisch wartungsarm, aber auf eine leistungsfähige Druckluftversorgung angewiesen. Aus diesem Grund muss je nach vorliegendem Anwendungsfall die individuelle Technologie zur Kühlung angewendet werden.

## 5.3 Ausblick

Die vorliegende Masterarbeit führt zu der Conclusio, dass die Integration des Vortex Tubes in einen haushaltsüblichen Kühlschrank, aufgrund der hohen Energiekosten für die Druckluftbereitstellung, derzeit nicht wirtschaftlich ist. Dennoch bieten die erreichten Ergebnisse wertvolle Ansätze für zukünftige Forschung, insbesondere in der Industrie.

Zukünftige Untersuchungen könnten sich verstärkt mit der Optimierung der Vortex Tube-Geometrie befassen. Aspekte wie Düsenform, Rohrlänge, Anzahl der Generatoren sowie deren einfachere und präzisere Steuerung beeinflussen die Temperaturtrennung und damit die Energieeffizienz signifikant. Eine gezielte geometrische Anpassung könnte dazu beitragen, die benötigte Druckluftmenge bei gleicher oder verbesserter Wirkung zu senken. Ein besonders vielversprechender Ansatz liegt in der Integration des VT in bestehende industrielle Druckluftinfrastrukturen. In Produktionsstätten, Laborumgebungen oder industriellen Anlagen, in denen Druckluft ohnehin vorhanden ist, könnte die Nutzung eines VT zur gezielten Kühlung von Maschinenkomponenten, Werkzeugen oder empfindlichen Prozessen führen, ohne dass ein zusätzlicher energetischer Aufwand für die Druckluftherzeugung anfällt. In der Lebensmittelverarbeitung oder bei thermisch empfindlichen Fertigungsschritten wären lokal begrenzte Kühleffekte durch den Einsatz des VT denkbar.

Ein weiterer Forschungsansatz betrifft die Nutzung regenerativer oder ungenutzter Energiequellen zur Druckluftherzeugung. Der Einsatz von überschüssiger Photovoltaikenergie, Produktionswärme oder Rückgewinnungssystemen könnte die Effizienz des Gesamtsystems erheblich steigern und den ökologischen Fußabdruck verringern.

Die Entwicklung miniaturisierter Vortex Tubes würde ebenfalls ein interessantes Forschungsfeld bieten. Kompakte Varianten könnten in der Elektronik- oder Automobilindustrie zur gezielten Kühlung von Steuergeräten, Sensoren oder Batteriemodulen eingesetzt werden, vor allem dort, wo klassische Flüssigkeitskühlsysteme zu komplex oder zu groß sind.

Darüber hinaus sollte die Interaktion zwischen den kalten und warmen Luftströmen innerhalb des Vortex Tubes, insbesondere bei komplexeren Einbauten wie in Szenario 4, noch detaillierter analysiert werden (z.B. im Rahmen einer CFD-Analyse). Ziel solcher Simulationen könnte sein, die interne Strömungstrennung, Druckverteilung und Temperaturgradienten zu untersuchen, sowie die Wirkung unterschiedlicher Düsengeometrien und Einlasswinkel zu quantifizieren. Eine genauere numerische Strömungs- und Temperaturfeldanalyse könnte helfen, experimentelle Abweichungen

besser zu verstehen, das Design zu optimieren und den Einsatz des VT in komplexeren Systemen vereinfachen.

Langfristig erscheint auch eine kombinierte Nutzung des Vortex Tubes in etablierten Effizienzmaßnahmen wie dem Subcooling sinnvoll. Das Vortex Tube könnte etwa als aktives Subcooling-Modul fungieren, indem sein kalter Luftstrom gezielt zur Abkühlung des Kältemittels nach dem Verflüssiger eingesetzt wird. Eine solche Kopplung könnte neue Konzepte ermöglichen, die klassische und relativ große Wärmetauscher in kompakten Systemen ersetzen und den COP des Gesamtsystems weiter steigern.

Insgesamt zeigt sich, dass das Vortex Tube als thermodynamisches Werkzeug über bisherige Nischenanwendungen hinaus Potenzial bietet, vorausgesetzt Integration, Regelung und Energieversorgung werden in zukünftigen Forschungsvorhaben gezielt weiterentwickelt.

## 6 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit war es, einen handelsüblichen Kühlschrank dahingehend zu modifizieren, dass ein Vortex Tube implementiert werden konnte und es in weiterer Folge möglich war, den thermodynamischen Kühlkreislauf des Kühlschranks zu analysieren. Die Idee dahinter war es, die potenziellen Effizienzsteigerungen in Folge von einer gezielten Nutzung der warmen und kalten Luftströme des Vortex Tubes in vier Szenarien sowohl theoretisch als auch experimentell zu analysieren.

Zu Beginn wurde die Schaumisolierung eines handelsüblichen Kühlschranks („Bomann“ KB7235) entfernt, um die Auswirkungen der warmen und kalten Luft in vier Szenarien zu analysieren: (1) Referenzszenario ohne VT, (2) Warmluft auf Verdampfer, (3) Kaltluft auf Verflüssiger und (4) kombinierte Nutzung beider Luftströme.

Anschließend wurde eine umfangreiche theoretische Berechnung des Coefficient of Performance (COP) für jedes Szenario durchgeführt, wobei von idealisierten thermodynamischen Annahmen ausgegangen wurde. Die Ergebnisse der Berechnungen haben deutliche Effizienzsteigerungen für jedes Szenario ergeben, insbesondere für Szenario 4 (COP = 7,44 also +86 % gegenüber der Referenz).

Im Zuge der Validierung der experimentellen Umsetzung hat sich gezeigt, dass, obwohl das grundsätzliche Prinzip der Implementierung des Vortex Tubes in den thermodynamischen Kühlkreislauf funktionierte, die Ergebnisse deutlich von den davor berechneten und dementsprechend auch zu erwarteten Werten abwichen. Szenario 3 (COP = 2,01) erreichte die beste Effizienzsteigerung bei den experimentellen Untersuchungen, aber fiel dennoch erheblich geringer aus als in der theoretischen Analyse. Szenario 4 enttäuschte und erreichte lediglich +22,2 % (COP = 1,98). Die Ursachen dafür lagen vorwiegend in praktischen Einschränkungen und im Versuchsaufbau, wie zum Beispiel in der unzureichenden Isolierung des Kühlschranks, Luftverlusten, als auch der begrenzten Wirksamkeit des Luftkontakts an den jeweiligen Komponenten des Kühlschranks.

Die Arbeit kommt schlussendlich zu der Conclusio, dass der Einsatz des Vortex Tubes in einem Haushaltskühlsystem nur unter speziellen Bedingungen energetisch sinnvoll erscheint. Dennoch haben die experimentellen Untersuchungen die theoretischen Berechnungen in der Tendenz bestätigt und es kam zu Verbesserungen in der Kühleffizienz bei allen Szenarien.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] S. Eiamsa-ard und P. Promvonge, „Review of Ranque-Hilsch effects in vortex tubes,“ Bangkok 10530, Thailand, 2007.
- [2] G. J. Ranque, „Experiments on Expansion in a Vortex with Simultaneous Exhaust of Hot and Cold Air,“ *Le Journal De Physique et le Radium*, Nr. 4, 1933.
- [3] G. Agarwal, Z. P. McConkey und J. Hassard, „Optimisation of vortex tubes and the potential for use in atmospheric separation,“ *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020.
- [4] v. Schoonhoven, „FAQ Vortex Wirbelrohr,“ [Online]. Available: [https://docs.google.com/document/d/1S6BRZW\\_UcjEU\\_rShcUT7HOdppFW5sa-yfAL\\_G70ga-Q/preview?hgd=1,%202012&tab=t.0](https://docs.google.com/document/d/1S6BRZW_UcjEU_rShcUT7HOdppFW5sa-yfAL_G70ga-Q/preview?hgd=1,%202012&tab=t.0). [Zugriff am 08 12 2024].
- [5] B. Farno, „EXAIR Blog,“ EXAIR, 29 01 2020. [Online]. Available: <https://blog.exair.com/2020/01/29/discovery-of-the-vortex-tube/>. [Zugriff am 10 03 2025].
- [6] R. Hilsch, „The use of expansion of gases in a centrifugal field as a cooling proces,“ *Rev Sci Instrum, AIP Publishing*, 1947.
- [7] „Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations,“ [Online]. Available: <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/vortex-tube>. [Zugriff am 09 12 2024].
- [8] Primairo, [Online]. Available: <https://www.primairo.de/luftduesen/wirbelrohr-vortex-tube/>. [Zugriff am 31 12 2024].
- [9] N. Poshernev und I. Khodorkov, *Experience from the Operation of a Conical Vortex Tube with Natural Gas*, Springer, 2003.
- [10] „Clausius-Rankine-Prozess,“ [Online]. Available: <https://www.peterjunglas.de/fh/vorlesungen/thermodynamik2/html/kap4-1.html>. [Zugriff am 08 01 2025].
- [11] J. Keller, M. U. Göbel und R. Staudt, „Bemerkungen zu den Grundlagen und neuen energietechnischen Anwendungen,“ *Inst. Fluid- & Thermodynamik, Universität Siegen*, 57068 Siegen.

- [12] J. Simões-Moreira, „An air-standard cycle and a thermodynamic perspective on operational limits of Ranque–Hilsh or vortex tubes,“ *International Journal of Refrigeration-revue Internationale Du Froid*, 2010.
- [13] J. Meinert, „Technische Universität Dresden,“ 31 08 2009. [Online]. Available: [https://www.thm.de/me/images/user/moeller-63/Download/TTD\\_Formelsammlung.pdf](https://www.thm.de/me/images/user/moeller-63/Download/TTD_Formelsammlung.pdf). [Zugriff am 31 12 2024].
- [14] „Chemie,“ [Online]. Available: <https://www.chemie.de/lexikon/Joule-Thomson-Effekt.html>. [Zugriff am 03 01 2025].
- [15] R. Hilsch, „Die Expansion von Gasen im Zentrifugalfeld als Kälteprozeß,“ *Zeitschrift für Naturforschung A*, Nr. 0406, 1946.
- [16] Redaktion, „Wirtschaftswiki,“ 01 11 2023. [Online]. Available: <https://wirtschaftswiki.de/massenstrom-und-volumenstrom-in-der-industriellen-fertigung/?utm>. [Zugriff am 13 01 2025].
- [17] „Energiewiki,“ [Online]. Available: [https://wiki.energiem.de/Spezifische\\_Gaskonstante](https://wiki.energiem.de/Spezifische_Gaskonstante). [Zugriff am 13 01 2025].
- [18] „Ingenieurkurse,“ [Online]. Available: <https://www.ingenieurkurse.de/physik/thermodynamik/thermische-zustandsgroessen/temperatur/einheiten-kelvin-und-celsius.html>. [Zugriff am 13 01 2025].
- [19] www.topmotors.ch, „Druckluft-Kompressoren,“ 2016. [Online]. [Zugriff am 26 03 2025].
- [20] eputec, „eputec,“ [Online]. Available: <https://www.eputec.de/downloads/catalog/Vortex%20Tubes/Vortex%20Tube.pdf?utm>. [Zugriff am 16 01 2025].
- [21] A. Jahnke, „Formelsammlung für den Kälteanlagenbauer,“ 28 01 2012. [Online]. Available: [https://www.andreasjahnke.de/index\\_htm\\_files/Formelsammlung%20Kaelte\\_Klima\\_Elektro%201.0\\_AJ.pdf](https://www.andreasjahnke.de/index_htm_files/Formelsammlung%20Kaelte_Klima_Elektro%201.0_AJ.pdf). [Zugriff am 05 04 2025].
- [22] „Thermal Engineering,“ [Online]. Available: <https://www.thermal-engineering.org/de/was-ist-der-leistungskoeffizient-cop-kuhlschrank-klimaanlage-definition/>. [Zugriff am 09 01 2025].

- [23] „Leifiphysik,“ [Online]. Available: <https://www.leifiphysik.de/waermelehre/innere-energie-waermekapazitaet/grundwissen/spezifische-waermekapazitaet>. [Zugriff am 09 01 2025].
- [24] H. Consulting. [Online]. Available: [https://www.einfachbesserberaten.de/ratgeber/cop-coefficient-of-performance/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.einfachbesserberaten.de/ratgeber/cop-coefficient-of-performance/?utm_source=chatgpt.com). [Zugriff am 15 01 2025].
- [25] M. Kühner und V. Hammerstingl, „Formelsammlung für Thermodynamik 1,“ [Online]. Available: [https://manuelkuehner.de/wp-content/uploads/2016/03/formelsammlung\\_thermodynamik\\_1\\_tum\\_manuel\\_kuehner\\_2016-03-18.pdf](https://manuelkuehner.de/wp-content/uploads/2016/03/formelsammlung_thermodynamik_1_tum_manuel_kuehner_2016-03-18.pdf). [Zugriff am 09 01 2025].
- [26] „DocCheckFlexikon,“ [Online]. Available: [https://flexikon.doccheck.com/de/Universelle\\_Gaskonstante](https://flexikon.doccheck.com/de/Universelle_Gaskonstante). [Zugriff am 09 01 2025].
- [27] „Atlas Copco,“ [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/de-at/compressors/products/air-compressor>. [Zugriff am 13 01 2025].
- [28] G. Raghavendra, M. Gupta und R. Bahubalendruni, „Recent Advances in Mechanical Engineering, Volume 2,“ Springer, 2023.
- [29] J. Delahunt, „Building Engines,“ 30 11 2021. [Online]. Available: <https://www.buildingengines.com/blog/knowledge-superheat-and-subcooling/>. [Zugriff am 13 05 2025].
- [30] Y. Qiao, T. Cao, Y. Hwang und R. Radermacher, „Investigation on Phase change material (PCM)-to-refrigerant Heat Exchanger in Air-conditioning Systems,“ Purdue e-Pubs, Purdue University, 2021.
- [31] R. I. Tritjahjono, K. Sumeru, A. Setyawan und M. F. Sukri, „Evaluation of Subcooling with Liquid-Suctions Heat Exchanger on the Performance of Air Conditioning System Using R22/R410A/R290/R32 as Refrigerants,“ *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, Bd. 1, Nr. 55, p. 11, 2019.
- [32] W. Jonigkeit, „Quick-Ohm,“ Küpper & Co. GmbH, 15 08 2022. [Online]. Available: <https://www.quick-ohm.de/pdf/bibliothek/peltierelement/51-goldene-Regeln-zum-thema-peltierelement.pdf>. [Zugriff am 19 05 2025].

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Funktionsweise von Counterflow- Vortex Tube (a) und Uni-Flow Vortex Tube (b). Quelle:[1] .....	8
Abbildung 2: Schematische Funktionsweise Vortex Tube Quelle [6].....	9
Abbildung 3: Graphen, unterschiedlicher Drücke, mit Beziehung zwischen Massenstromanteil-Kaltluft und Strömungsgeschwindigkeit im VT. Quelle: [8] .....	10
Abbildung 4: Graphen, unterschiedlicher Drücke, mit Beziehung zwischen Massenstromanteil-Kaltluft und Heizeffekt. Quelle: [8] .....	11
Abbildung 5: Graph mit Beziehung zwischen Massenstromanteil-Kaltluft und Abkühlung bei Vortex Tube-Länge von 1000mm. Quelle: [4] .....	11
Abbildung 6: Aufteilung der Luftströme nach dem Vortex Tube, Quelle [12] .....	15
Abbildung 7: Szenario 1: Klassischer CRP ohne Vortex Tube .....	16
Abbildung 8: Nutzung Warmstrom aus dem Vortex Tube.....	16
Abbildung 9: Nutzung Kaltstrom aus dem Vortex Tube .....	17
Abbildung 10: Kombinierte Nutzung von warmer und kalter Luft aus dem Vortex Tube.....	17
Abbildung 11: „BOMANN“ KB7235 Kühlschranks .....	35
Abbildung 12: Freigelegte Kühlmittelrohre auf Kühlschranks-Rückseite .....	36
Abbildung 13: „EXAIR“ Vortex Tube. Quelle: [19].....	37
Abbildung 14: Explosionsansicht EXAIR Vortex Tube. Quelle: [19].....	38
Abbildung 15: Versuchsaufbau mit Vortex Tube und aluminiumbeschichteten Hitzeschutzmatten .....	41
Abbildung 16: Graph des Temperaturverlaufs Szenario 1 .....	43
Abbildung 17: Einfaches Schlauchende für warmen Luftstrom.....	47
Abbildung 18: Versuch mit Schlauchende für warmen Luftstrom mit Querbohrungen .....	48
Abbildung 19: Graph des Temperaturverlaufs Szenario 2 .....	49
Abbildung 20: Graph des Temperaturverlaufs Szenario 3 .....	52
Abbildung 21: Graph des Temperaturverlaufs Szenario 4 .....	56
Abbildung 22: Messpunkte für Temperaturverläufe aller Szenarien .....	59

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse der COP-Werte von theoretischer Ausarbeitung.....	32
Tabelle 2: Temperaturmesspunkte Szenario 1 .....	43
Tabelle 3: Temperaturmesspunkte Szenario 2 .....	48
Tabelle 4: Temperaturmesspunkte Szenario 3 .....	52
Tabelle 5: Temperaturmesspunkte Szenario 4 .....	55
Tabelle 6: COP-Werte experimenteller Szenarien .....	60

## Abkürzungsverzeichnis

CRP	Clausius-Rankine-Prozess
COP	Coefficient of Performance
FH	Fachhochschule
LSHX	Liquid Suction Heat Exchanger
SZ	Szenario
VT	Vortex Tube

# Variablenverzeichnis

$c_p$	spezifische Wärmekapazität Wasser
$c_{p,L}$	spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck
$\Delta P$	Druckdifferenz über das Ventil
$\Delta T$	Temperaturänderung des jeweiligen Stroms
$\Delta T_{kalt}$	Temperaturdifferenz des Kaltstroms
$\Delta T_{SZ1}$	Temperaturänderung von Wasser Szenario 1
$\Delta T_{SZ2}$	Temperaturänderung von Wasser Szenario 2
$\Delta T_{SZ3}$	Temperaturänderung von Wasser Szenario 3
$\Delta T_{SZ4}$	Temperaturänderung von Wasser Szenario 4
$\Delta T_{warm}$	Temperaturdifferenz des Warmstroms
$\mu_c$	Kalter Luftstrom vom gesamten Massenstrom des Vortex Tube
$\mu_{JZ}$	Joule-Thomson-Koeffizient
$\dot{m}$	Massenstrom
$\dot{m}_{kalt}$	Massenstrom von Kaltluft
$\dot{m}_{Kühlmittel}$	Massenstrom des Kältemittels im Kühlschranks
$\dot{m}_{Luft\dots}$	Massenstrom der Luft im VT
$\dot{m}_{warm}$	Massenstrom von Warmluft
$\dot{Q}_{kalt}$	Wärmemenge von Kaltluftstrom
$\dot{Q}_{SZ2,Gesamt}$	Gesamtwärmeaufnahme Szenario 2
$\dot{Q}_{SZ3,Gesamt}$	Gesamtwärmeaufnahme Szenario 3
$\dot{Q}_{SZ4,Gesamt}$	Gesamtwärmeaufnahme Szenario 4
$\dot{Q}_{Verdampfer}$	Wärmeaufnahme von Verdampfer
$\dot{Q}_{warm}$	Wärmemenge von Warmluftstrom
$\dot{W}_{Druckluft}$	Kompressionsarbeit für Druckluftbereitstellung

$\dot{W}_{Gesamt}$	Gesamtenergieaufwand
$\dot{W}_{Verdichter}$	Kompressionsarbeit von Kühlschranksverdichter
$\eta$	Wirkungsgrad von Kompressor
$m_w$	Masse von Wasser
$P$	elektrische Leistungsaufnahme des Kühlschranks
$\frac{p_2}{p_1}$	Druckverhältnis von Druckluft
$Q$	Wärmemenge
$Q_{SZ1}$	Abgeführte Wärmemenge Szenario 1
$Q_{SZ2}$	Abgeführte Wärmemenge Szenario 2
$Q_{SZ3}$	Abgeführte Wärmemenge Szenario 3
$Q_{SZ4}$	Abgeführte Wärmemenge Szenario 4
$Q_{SZ2,Innenvolumen}$	Abgeführte Wärmemenge von Innenvolumen Szenario 2
$Q_{SZ3,Innenvolumen}$	Abgeführte Wärmemenge von Innenvolumen Szenario 3
$Q_{SZ4,Innenvolumen}$	Abgeführte Wärmemenge von Innenvolumen Szenario 4
$R$	Spezifische Gaskonstante
$T$	Umgebungstemperatur
$T_1$	Eintrittstemperatur der Luft bei Umgebungstemperatur
$t$	Versuchszeitraum
$W$	Aufgewendete elektrische Energie
$COP_{SZ1}$	COP-Wert Szenario 1 auf gesamten Kühlschranksinnenraum hochgerechnet
$COP_{SZ1,exp}$	Experimenteller COP-Wert Szenario 1
$COP_{SZ2}$	COP-Wert Szenario 2 auf gesamten Kühlschranksinnenraum hochgerechnet
$COP_{SZ2,exp}$	Experimenteller COP-Wert Szenario 2
$COP_{SZ2,mit\ Druckluft}$	COP-Wert von Szenario 2 mit Druckluftaufwand

$COP_{SZ2,ohne Druckluft}$	COP-Wert von Szenario 2 ohne Druckluftaufwand
$COP_{SZ3}$	COP-Wert Szenario 3 auf gesamten Kühlschrankinnenraum hochgerechnet
$COP_{SZ3,exp}$	Experimenteller COP-Wert Szenario 3
$COP_{SZ3,mit Druckluft}$	COP-Wert von Szenario 3 mit Druckluftaufwand
$COP_{SZ3,ohne Druckluft}$	COP-Wert von Szenario 3 ohne Druckluftaufwand
$COP_{SZ4}$	COP-Wert Szenario 4 auf gesamten Kühlschrankinnenraum hochgerechnet
$COP_{SZ4,exp}$	Experimenteller COP-Wert Szenario 4
$COP_{SZ4,mit Druckluft}$	COP-Wert von Szenario 4 mit Druckluftaufwand
$COP_{SZ4,ohne Druckluft}$	COP-Wert von Szenario 4 ohne Druckluftaufwand

## Anhang: Dokumentationstabelle für verwendete KI-Tools

KI-basierte Hilfsmittel	Verwendungszweck	Prompt, Quelle, Seite, Absatz
Grok	Hilfe bei Kürzung der Kurzfassung	Kurzfassung auf Seite i
DeepL Translate	Übersetzung der Kurzfassung in englische Sprache	Abstract auf Seite ii
Grok, ChatGPT 4o	Zur sprachlichen und strukturellen Unterstützung wurde während der Erstellung dieser Arbeit ChatGPT von OpenAI und Grok von xAI verwendet. Die inhaltliche Ausarbeitung, Analyse, Interpretation und alle wissenschaftlichen Schlussfolgerungen wurden eigenständig vorgenommen. Es wurde keine KI-generierten Inhalte ohne Prüfung und eigene Anpassung übernommen.	