BACHELOR-THESIS

Private Fachhochschule Nordhessen

Studiengang Mechatronik

Auswertung verschiedener Methoden zur Wärmerückgewinnung aus Abluft und die Erstellung eines Konzeptes zur Wärmerückgewinnung für die Gießerei des Volkswagenwerkes Kassel.

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering (B.Eng.)

vorgelegt von:	Jan-Jakob Otto
Matrikelnummer:	900818
Studienzentrum:	Virtuell
Bearbeitungszeit:	24 Wochen
Abgabe am:	14.12.2020
Betreuer:	Prof. Dr.-Ing. Michael Namokel

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen (einschließlich elektronischer Quellen und dem Internet) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind ausnahmslos als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht physisch oder elektronisch veröffentlicht.

_____ _____

Ort, Datum Unterschrift

Sperrvermerk

Die nachfolgende Bachelor-Thesis enthält vertrauliche Daten der Volkswagen Aktiengesellschaft.

Veröffentlichungen oder Vervielfältigungen der Bachelor-Thesis – auch nur auszugsweise – sind ohne ausdrückliche Genehmigung der Volkswagen Aktiengesellschaft nicht gestattet.

Die Bachelor-Thesis ist nur den Gutachtern, sowie den Mitgliedern des Prüfungsausschusses zugänglich zu machen.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung 1

Sperrvermerk 1

Abkürzungen 5

1. Einleitung 6

1.1 Motivation 7

1.2 Aufgabenstellung 7

1.3 Struktur der Thesis 8

1.4 Firmenvorstellung 9

2. Grundlagen 12

2.1 Einführungen zur Rekuperation 12

2.1.1 Definition Rekuperation 12

2.1.2 Rekuperationsverfahren 13

2.1.3 Anwendung im Produktionsprozess 14

2.1.4 Anwendungen bei der Volkswagen AG im Rahmen der Thesis 15

2.2 Grundbegriffe der Lüftungstechnik 16

2.2.1 Zuluft- und Abluftstrom 16

2.2.2 Abwärme, Fortwärme und Rückwärme 17

2.3 Systeme zur Rekuperation 17

2.3.1 Plattenwärmetauscher 18

2.3.2 Wärmerohr 19

2.3.3 Rotationswärmetauscher 20

2.3.4 Umschaltspeicher 21

2.3.5 Kreislaufverbundsystem 23

2.4 Berechnung der CO_2-Einsparung 24

2.4.1 Wärmekapazität 24

2.4.2 CO_2-Emissionsfaktoren 25
2.5 Statistische Auswertung der Temperaturwerte 26
2.5.1 Statistische Auswertung der Außentemperaturwerte 27
2.5.2 Statistische Auswertung der Ablufttemperaturwerte 29
3. Rahmenbedingungen 30
3.1 Der Aufbau der Gießerei 30
3.1.1 Das Belüftungssystem der Halle 5 30
3.1.2 Luftvolumen 32
3.2 Temperaturen 33
3.2.1 Messaufbau 33
3.2.2 Temperaturverlauf Zuluft 34
3.2.3 Temperaturverlauf Abluft 37
4. Analyse 39
4.1 Anforderungen der Gießerei 39
4.1.1 Bauliche Vorgaben der Gießerei 39
4.1.2 Gefördertes Luftvolumen 39
4.1.3 Staub und Verschmutzung der Abluft 40
4.1.4 Schadstofffreiheit der Zuluft 40
4.2 Analyse Wärmerückgewinnungssysteme 40
4.2.1 Merkmale des Plattenwärmetauschers 40
4.2.2 Merkmale des Wärmerohrs 41
4.2.3 Merkmale des Rotationswärmetauschers 42
4.2.4 Merkmale des Umschaltspeichers 43
4.2.5 Merkmale des Kreislaufverbundsystems 44
4.3 Analyse Temperaturverläufe 45
4.3.1 Verlauf Ablufttemperatur 46

4.3.2 Verlauf Außentemperatur 49
5. Auswertung 57
5.1 Auswahl Wärmerückgewinnungssystem 57
5.2 Berechnung der Temperaturdifferenzen 57
5.2.1 Auslegung der Pumpe 61
5.3 Berechnung der CO_2-Einsparung 63
6. Schlussfolgerungen 65
6.1 Betrachtung der Ergebnisse 65
6.2 Kritische Reflexion 66
7. Zusammenfassung und Ausblick 69
8. Abbildungsverzeichnis 70
9. Tabellenverzeichnis 71
10. Literaturverzeichnis 72
10.1 Bücherquellen 72
10.2 Internetquellen 72
11. Anhang 74

Abkürzungen

AG	Aktiengesellschaft
ArbStättV	Arbeitsstättenverordnung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
TW	technische Wärme
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VW	Volkswagen
VWAG	Volkswagen Aktiengesellschaft
VWN	Volkswagen Nutzfahrzeuge
WRG	Wärmerückgewinnung
kJ	Kilojoule
MWh	Megawattstunde
σ	Standartabweichung
CO_2	Kohlenstoffdioxid

1. Einleitung

Eine nachhaltige Nutzung von Ressourcen ist unumgänglich.

Diese Aussage kann jeder nachvollziehen. Grade mit Blick auf den fortschreitenden Klimawandel, eine wachsenden Weltbevölkerung, die Verschiebung von politischen Verhältnissen und der sich schneller ändernden Wirtschaftsbedingungen, ist der nachhaltige Einsatz von Ressourcen unumgänglich. Der Zwang zu nachhaltigem Ressourceneinsatz betrifft, neben privat- und öffentlichen Haushalten auch Unternehmen. Nur wenn ein Unternehmen effizient und nachhaltig mit den verfügbaren Ressourcen umgeht, kann es dauerhaft erfolgreich wirtschaften. Die Strategie eines Unternehmens muss also einen nachhaltigen Ressourceneinsatz berücksichtigen. Dieser Feststellung kann sich auch die Volkswagen Aktiengesellschaft, als global agierendes Unternehmen, nicht entziehen.

Um zukünftig erfolgreich zu sein hat die Volkswagen Aktiengesellschaft, nachfolgend Volkwagen AG, im Jahr 2019 die Konzernstrategie „TOGETHER 2025+“[1], unter dem Motto „Shaping mobility – for generations to come.“, eingeführt. Die Konzernstrategie besteht aus vier Zieldimensionen. Die vier Dimensionen sind „Begeisterte Kunden“, „Exzellenter Arbeitsgeber“, „Wettbewerbsfähige Ertragskraft“ und „Vorbild bei Umwelt, Sicherheit und Integrität“.

Im Rahmen der Zieldimension „Vorbild bei Umwelt, Sicherheit und Integrität“ wurde die strategische Initiative „go to zero“ entwickelt.

„Für alle unsere Produkte und Mobilitätslösungen streben wir danach, Umweltauswirkungen entlang des gesamten Lebenszyklus - von der Rohstoffgewinnung bis zum Lebensende - zu minimieren, um Ökosysteme intakt zu halten und einen positiven Impact für die Gesellschaft zu schaffen. Compliance mit Umweltregulierungen, Standards und freiwilligen Selbstverpflichtungen ist eine Grundvoraussetzung für unser Handeln.“ [2]

Das Leitbild Umwelt ist Kern der strategischen Initiative „go to zero“.

---

[1] https://www.volkswagenag.com/de/group/strategy.html (06.09.2020)
[2] https://www.volkswagenag.com/de/sustainability/environment/mission-statement.html (28.07.2020)

Ziel der strategischen Initiative „go to zero“ ist eine Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus um 30% bis 2025, im Vergleich zu 2015, und bis 2050 ein bilanziell CO2-neutrales Unternehmen zu werden.[3]

Damit die Volkswagen AG dieses Ziel erreichen kann, müssen sämtliche Prozesse im gesamten Konzern betrachtet werden. Es müssen bei jedem einzelnen die Potentiale identifiziert und bewertet werden.

Nachfolgend werden die Hintergründe der Bachelorthesis erläutert, die konkrete Aufgabenstellung definiert und die Struktur der Thesis erklärt. Abschließend wird das Firmenprofil der Volkswagen AG vorgestellt.

1.1 Motivation

Im Rahmen der strategischen Initiative „go to zero“ wurde im Jahr 2019 ein eigener Carbon-Fund gegründet. Dieser, jährlich mit 25 Millionen Euro ausgestattete, Investitionsfond dient der Finanzierung unterschiedlicher Klimaschutzprojekte.[4]

Als mögliches Projekt wurde die Luftversorgung der Gießerei des Volkswagens Werk Kassel identifiziert. Ziel ist es, die zur Erwärmung der Frischluft genutzt Energie nicht mehr über eine externe Quelle, aktuell über die Werkheizung, zuzuführen, sondern die Wärmeenergie der Abluft zu nutzen.

Ein Anhaltpunkt, ob eine Umsetzung dieses Projektes sinnvoll ist, soll diese Bachelorthesis liefern. Neben der reinen CO_2-Einsparung sind auch wirtschaftliche und technische Rahmenbedingungen zu betrachten.

1.2 Aufgabenstellung

Das Ziel der Bachelorthesis ist es ein Wärmerückgewinnungssystem für die Gießerei Kassel zu ermitteln.

Dazu müssen zuerst die verschiedenen Typen von Wärmerückgewinnungsanlagen analysiert werden. Ziel der Analyse ist die Ermittlung einer geeigneten technischen

[3] Volkswagen Aktiengesellschaft, Umwelterklärung 2019 Standort Kassel, 2019 (S.4 ff)
[4] https://www.volkswagenag.com/de/news/2020/01/volkswagen_group_carbon_fund.html (22.07.2020)

Lösung. Bei der Auswahl des Konzeptes sind verschiedene Rahmenbedingungen und betrieblichen Anforderung zu berücksichtigen.

Mit diesem Wärmerückgewinnungskonzept muss anschließend die zu erwartende CO_2-Einsparung berechnet werden. Diese zu erwartende CO_2-Einsparung soll im Anschluss an diese Bachelor-Thesis als Argumentationsgrundlage dienen.

1.3 Struktur der Thesis

Diese Bachelorarbeit ist in sieben Kapitel gegliedert.

Das erste Kapitel ist die Einleitung. Hier wird die Motivation für diese Bachelorthesis erklärt, die Aufgabenstellung der Thesis erläutert, die Struktur der Thesis erklärt und das Firmenprofil vorgestellt.

Daran anschließend werden im zweiten Kapitel, nach einer Erläuterung der technischen Grundlagen und Darstellung der grundsätzlichen Arbeitsweise einer Wärmerückgewinnungsanlage, verschieden Lösungskonzepte vorgestellt. Dabei werden auch die notwendigen Umgebungsanforderungen zum Betrieb dieser aufgeführt. Im Anschluss an die technischen Grundlagen werden die genutzten mathematischen Vorgehensweisen vorgestellt.

Im dritten Kapitel werden in die Rahmenbedingungen und betrieblichen Anforderungen an die Zu- und Abluftkanäle der Volkswagen Gießerei Kassel erläutert und die Messungen der Temperatur beschrieben.

In der darauf folgenden Analyse, in Kapitel vier, werden die verschiedenen technischen Wärmerückgewinnungskonzepte mit den Umgebungsanforderungen abgeglichen. Anschließend werden die Temperaturwerte mit den bereits erläuterten mathematischen Vorgehensweisen analysiert.

Im Anschluss an die Analyse folgt das fünfte Kapitel, die Auswertung der Analyseergebnisse. Dabei wird die geeignetste technische Lösung gewählt. Auf Grundlage dieser technischen Lösung wird mit den Ergebnissen der Temperaturwertanalyse eine zu erwartende CO_2-Einsparung berechnet, die bei einer Umsetzung des Konzeptes realisiert werden könnte.

Im Kapitel sechs „Schlussfolgerungen“ wird mit den Ergebnissen der Auswertung eine Aussage getroffen. Diese wird in der kritischen Reflexion auf Gültigkeit geprüft.

Im siebten Kapitel werden die Ergebnisse der Bachelor-Thesis zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf mögliche Folgen der Thesis gegeben.

1.4 Firmenvorstellung

Die Volkswagen AG, ist der weltweit führende Automobilhersteller. Im Jahr 2019 wurden 11 Millionen Fahrzeuge ausgeliefert. Damit hatte der Konzern einen Weltmarktanteil von 12,9%. Der Umsatz lag bei 252,6 Milliarden Euro, das Ergebnis nach Steuern betrug 19,3 Milliarden Euro[5]. Der Volkswagen Konzern umfasst 12 Marken: Volkswagen PKW, Audi, Seat, Skoda, Bentley, Bugatti, Lamborghini, Porsche, Ducati, Volkswagen Nutzfahrzeuge, MAN und Scania. 2019 wurde zudem die Volkswagen Konzern Komponente als dreizehnte eigenständige Konzernmarke etabliert. Zusätzlich wird ein breites Spektrum an Finanz- und Mobilitätsdienstleitungen angeboten.

Die aktuelle Konzernstrategie ist „TOGETHER 2025+“ unter dem Motto „Shaping mobility – for generations to come.“. Grundlage der Konzernstrategie sind die Grundwerte der Volkswagen AG. Die Grundwerte sind im Compliance-Programm „Together4Integrity“ enthalten. Die Konzernstrategie beinhaltet die vier Zieldimensionen „Begeisterte Kunden“, „Exzellenter Arbeitsgeber“, „Vorbild bei Umwelt, Sicherheit und Integrität“ und „Wettbewerbsfähige Ertragskraft“. Ziel ist es, den Konzern zukunftssicher aufzustellen, die Transformation vom Verbrennungsmotor zur Elektromobilität zu meistern und zum Anbieter eines ganzheitlichen Mobilitätskonzepts zu werden.

Insgesamt sind mehr als 671.205 Mitarbeiter[6] in weltweit 123 Fertigungsstätten für die Volkswagen AG tätig. Der Stammsitz mit dem größten Automobilwerk der Welt ist Wolfsburg.

---

[5] https://www.volkswagenag.com/de/InvestorRelations/news-and-publications/Annual_Reports.html (06.12.2020)
[6] https://geschaeftsbericht2019.volkswagenag.com/konzernlagebericht/geschaeftsverlauf/belegschaft.html (06.12.2020)

Das Volkswagen Werk Kassel ist mit ca. 17.000 Mitarbeitern, nach dem Stammsitz in Wolfsburg, die zweitgrößte Produktionsstätte der Volkswagen AG. In dem reinen Komponentenwerk befindet sich neben den Bereichen Getriebebau, Abgasanlagenbau und der Fertigung von formgehärteten Strukturteilen auch die größte Aluminiumgießerei Europas.

Abb. 1: Volkswagen Werk Kassel[7]

[7] https://www.google.de/maps/@51.2530873,9.4393678,2885m/data=!3m1!1e3 (24.09.2020)

In der Gießerei arbeiten 1.150 Mitarbeiter. Arbeitstäglich können im Schmelzwerk ca. 500t Aluminium produziert werden. Mehr als 90% des Metalls ist Recyclingmaterial. Mit 69 Druckgussmaschinen und 212 Industrierobotern werden jährlich ca. 7 Millionen Gussteile aus Aluminium und Magnesium gefertigt.

Gegossen werden:

- Getriebegehäuse,
- Strukturteile,
- Scharnieraufnahmen,
- Tunnelquerträger oder Schweller,
- Zylinderkurbelgehäuse,
- Zwischengehäuse
- Motorgehäuse für Elektromotoren

Diese Gussteile werden in Fahrzeugen der Marken Lamborghini, Audi, Volkswagen, Porsche, Seat und Skoda verbaut.

Die Gießerei umfasst die Abteilungen Druckgießerei, Schmelzbetrieb, Instandhaltung, mechanische Bearbeitung, Werkzeugbau Planungs- und Entwicklungsabteilung.

Neben der Gießerei wird am Standort Kassel unter anderem auch ein Heizkraftwerk[8] durch die VW Kraftwerk GmbH betrieben. Dieses Kraftwerk hat eine elektrische Leistung von 78 MW und eine Wärmeleistung von 312 MW. Durch das Kraftwerk wird das Volkswagen Werk mit Strom und Wärme versorgt.

---

[8] http://www.vw-kraftwerk.de/(15.11.2020)

2. Grundlagen

In den Grundlagen wird zuerst das Themengebiet Rekuperation erläutert. Dazu werden nach der Definition, den genutzten Verfahren und den Einsatzgebieten für Rekuperation aufgezeigt. Anschließend wird an das Thema Lüftungstechnik herangeführt und es werden die in der Lüftungstechnik eingesetzten Rekuperationssysteme erklärt. Im Anschluss daran werden die für diese Bachelor-Thesis genutzten Kennzahlen und statistischen Auswertungsmethoden aufgezeigt.

2.1 Einführungen zur Rekuperation

Rekuperation, aus dem lateinischen „recuperatio“ für „das Wiedergewinnen“[9], wird als technischer Begriff für das Verfahren der Energierückführung, gemeinhin „Energierückgewinnung“, genutzt. [10]

Im Gegensatz zum Begriff „Energierückführung ist der für Rekuperation allgemein gebräuchliche Begriff „Energierückgewinnung“ falsch. Dem Prinzip des Energieerhaltungssatz folgend kann Energie nicht verloren gehen oder gewonnen werden. Energie kann allerdings eine andere Form annehmen. Der technisch richtige Term ist daher „Energierückführung“. Im normalen Sprachgebrauch hat sich dennoch „Energierückgewinnung“ durchgesetzt. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird daher, zum leichteren Verständnis, auch der Begriff „Energierückgewinnung“ genutzt.

2.1.1 Definition Rekuperation

Rekuperation bezeichnet das Verfahren um Energie, die aus einem System herausgeleitet wird, in eine technisch nutzbare Form zu wandeln und erneut in einem System zu nutzen.

Rekuperation findet Anwendung in technischen Systemen. Ziel des Einsatzes von Rekuperationsverfahren ist es, die Effizienz der eingesetzten Energie zu steigern. Dabei ist Effizienz als das Verhältnis von Ergebnis zu Aufwand definiert. Um eine höhere Effizienz zu erlangen, kann also entweder das Ergebnis verbessert werden, oder der Aufwand verringert werden.

---

[9] https://de.pons.com/%C3%BCbersetzung/latein-deutsch/recuperatio (06.09.2020)
[10] https://www.energie-lexikon.info/rekuperation.html (24.09.2020)

Bei vielen technischen Systemen ist allerdings das Ergebnis vorgegeben. Eine Maschinenkühlung soll eine Anlage auf 20°C kühlen, eine Kühlung auf 5°C ist nicht möglich oder nicht gewünscht. Daher bleibt als einzige Möglichkeit zur Effizienzsteigerung die Verringerung des Aufwands. Um also einer Effizienzsteigerung in einem technischen System zu realisieren, muss der Ressourcenaufwand zum Betrieb dieses verringert werden.

Ressourcenaufwand ist in diesem Zusammenhang demnach, die in ein System eingeleitete Energie. In dem genannten Beispiel könnte also, durch Rekuperation, der aus der Maschine geleitete Enthalpiestrom gewandelt und an anderer Stelle wieder in das System geleitet werden. Der Aufwand zum Betrieb der Maschine, in Form von extern eingeleiteter elektrischer Energie würde sinken.

2.1.2 Rekuperationsverfahren

Zwei häufig eingesetzte Rekuperationsverfahren sind elektrische Rekuperation und thermische Rekuperation.

Bei elektrischer Rekuperation wird Wärmeenergie oder Bewegungsenergie in elektrische Energie umgewandelt. Kinetische Energie kann mittels eines Generators direkt in elektrische Energie gewandelt werden. Bei elektrischer Rekuperation von Wärmeenergie wird diese, z.B. durch Turbinen, zuerst in Bewegungsenergie gewandelt. Anschließend wird mit der Bewegungsenergie ein Generator betrieben. Die dabei entstehende elektrische Energie kann direkt in Maschinen eingespeist, oder in einer Batterie gespeichert werden.

Bei thermischer Rekuperation findet keine Umwandlung der Energieart statt. Stattdessen wird in diesem Verfahren ein gasförmiges oder flüssiges Medium an einem Trägermedium vorbeigeleitet. Die Wärmeenergie wird von dem Gas oder der Flüssigkeit auf den Träger übertragen. An einer anderen Stelle wird nun ein anderes Gas oder eine andere Flüssigkeit an dem Träger vorbeigeleitet. Die dabei von dem Gas oder der Flüssigkeit aufgenommene Wärmeenergie kann nun erneut im Prozess genutzt werden.

2.1.3 Anwendung im Produktionsprozess

Die Anwendung von Rekuperationsverfahren in Produktionsprozessen ist besonders sinnvoll. Anders als im Bereich eines Privathaushaltes werden in Produktionsprozessen, zum Beispiel aufgrund 3-schichtiger Arbeitssysteme, technische Anlagen dauerhaft betrieben. Daraus ergibt sich, dass in die Anlagen konstant Energie eingeleitet und herausgeleitet wird. Aufgrund des konstanten Energiestroms der Produktionsanlagen, können auch Rekuperationssysteme dauerhaft betrieben werden. Da die Anschaffung von Energierückführungsanlagen eine relativ hohe Investition ist, wird eine Amortisation einer Energierückführungsanlage bei dauerhafter Nutzung schneller erreicht.

Häufige Anwendungen von Wärmerückführung findet man bei Verbrennungsprozessen. Dabei wird eingeleitete Verbrennungsluft mit Abgaswärme vorgewärmt. Das Vorwärmen sorgt dafür, dass weniger Energie für den Verbrennungsvorgang benötigt wird und mehr Wärmeenergie in den Ofen abgegeben werden kann.

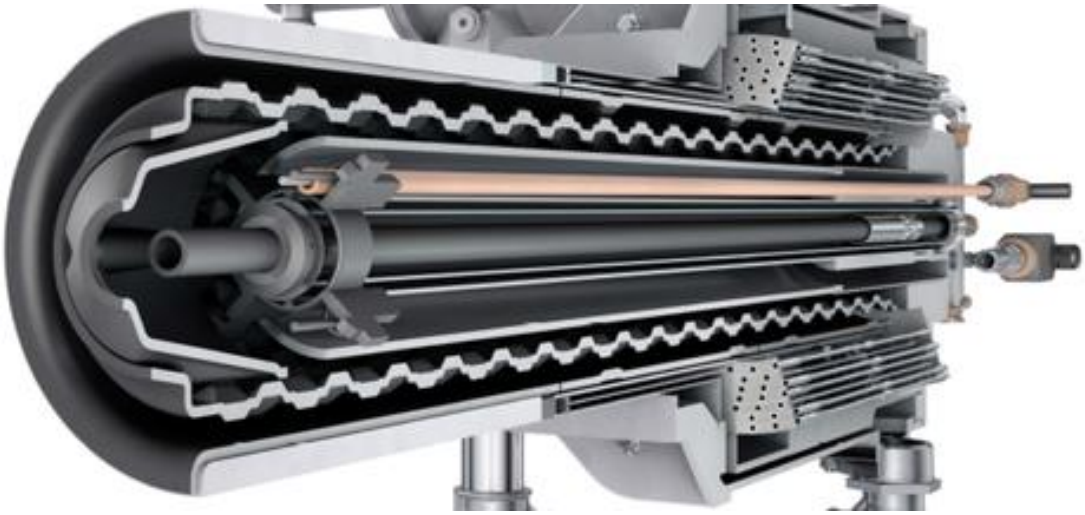

Abb. 2: Gasbrenner CX200[11]

Beim abgebildeten Gasbrenner CX200 der Firma WS wird das heiße Abgas an der Außenseite des Keramikrekumaten entlanggeführt. Das Abgas erwärmt dabei den Rekumat, der wiederum Wärme an die eingeleitete Verbrennungsluft abgibt. Die

[11] https://www.newcast.de/vis/v1/de/exhibitors/GMTN2019.2574026 (12.09.2020)

vorgewärmte Verbrennungsluft vermischt sich an der Keramikglocke mit dem eingeleiteten Gas und entzündet sich. Durch die Vorwärmung kann der Wirkungsgrad im Vergleich zum konventionellen Verbrennungsprozess erhöht werden.[12]

Anstelle eines Keramikrekumaten können auch kleine Metallröhrchen zum Einleiten der Verbrennungsluft genutzt werden. Bei einem Spaltstrombrenner ist die Oberfläche des Übertragungsmediums größer als bei einem Rekumaten, damit ist ein höherer Wirkungsgrad möglich.

Abb. 3: Rekumat „S“ Spaltstrombrenner[13]

2.1.4 Anwendungen bei der Volkswagen AG im Rahmen der Thesis

Im Volkswagenwerk Kassel werden bereits verschiedene Systeme zur Rekuperation eingesetzt. Neben dem Einsatz von Rekuperationssystemen in Produktionsprozessen wird Rekuperation auch im Bereich der Hallenbelüftungen bzw. Hallenbeheizung eingesetzt.

Im Rahmen der Thesis wird der Einsatz von Rekuperation in der Lüftungstechnik betrachtet. Daher folgt im nächsten Abschnitt die Erläuterung der Grundlagen der Lüftungstechnik.

[12] https://flox.com/documents/de_CX200%20Eta.pdf (12.09.2020)
[13] https://flox.com/documents/de_CX200%20Eta.pdf (12.09.2020)

2.2 Grundbegriffe der Lüftungstechnik

Zweck des Einsatzes von Lüftungstechnik ist die kontrollierte Führung von Luftströmen. Die Steuerung der Luftströme erfolgt durch eine lufttechnische Anlage. Mittels einer lufttechnischen Anlage kann die Quantität, die Qualität und die Beschaffenheit von Luftströmen geregelt werden.

Durch eine lufttechnische Anlage ist es möglich, soweit die technischen Voraussetzungen vorhanden sind, die eingeleitete Luft aufzubereiten. Einige Möglichkeiten der Aufbereitung sind die Filtration der Luft, das Abkühlen des Luftstroms, das Erwärme des Luftstrom oder das Beimengen von Zusätzen, etwa Duftstoffen. Die Notwendigkeit der Aufbereitung des Luftstroms wird durch spezifische Systemanforderungen vorgegeben.

Diese Systemanforderungen können ihre Ursache im technischen Bereich haben, etwa Herstellervorgaben von Anlagen, die durch die lufttechnische Anlage versorgt werden. Grundlage für die Aufbereitung der Luftströme können aber auch gesetzliche Vorgaben und Richtlinien sein.

Wichtige Richtlinien und Gesetzte in diesem Zusammenhang sind etwa die Energy Performance of Buildings Directive, das Bundes-Immissionsschutzgesetz, das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz oder die Energieeinsparverordnung oder die Arbeitsstättenverordnung.

2.2.1 Zuluft- und Abluftstrom

Grundsätzlich unterscheidet man in einer lufttechnischen Anlage zwischen dem Zuluftstrom und dem Abluftstrom.

Der Zuluftstrom ist der Luftstrom, der von einer lufttechnischen Anlage in ein System eingeleitet wird. Ein solches System kann zum Beispiel eine Halle, ein Raum, aber auch eine einzelne Maschine sein.

Der Abluftstrom ist der Luftstrom, der aus einem System herausgeleitet wird. Ebenso wie beim Zuluftstrom, kann auch der Abluftstrom, in einer lufttechnischen Anlage aufbereitet werden.

2.2.2 Abwärme, Fortwärme und Rückwärme

Die im Abluftstrom enthaltene Wärmeenergie wird Abwärme genannt. Abwärme wird in Fortwärme und Rückwärme unterteilt.

Fortwärme ist der Teil des Enthalpiestroms, der in die Umwelt abgegeben wird. Dieser Anteil der Wärmeenergie kann im Rahmen der lufttechnischen Anlage nicht weiter genutzt werden.

Im Gegensatz zur Fortwärme, ist die Rückwärme der Teil der Abwärme, der dem Zuluftstrom des Lüftungssystems hinzugefügt wird. Dieser Teil der Wärmeenergie kann von dem lufttechnischen System erneut genutzt werden. Die Rückführung der Rückwärme erfolgt mittels eines Rekuperationssystems.

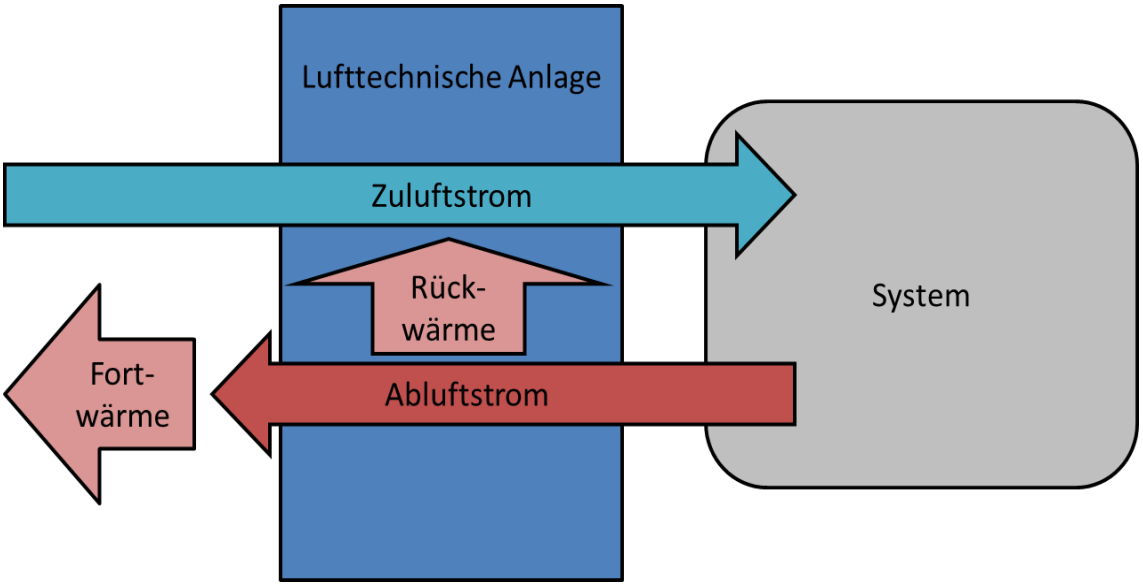

Abb. 4: Schema einer Lufttechnischen Anlage mit Wärmerückgewinnung[14]

2.3 Systeme zur Rekuperation

Zur Rekuperation können verschiedene technische Systeme genutzt werden. Grundsätzlich wird dabei der Abluftstrom an einem Trägermedium mit möglichst großer Oberfläche vorbeigeführt. Die Wärmeenergie des Abluftstroms überträgt sich dabei auf das Trägermedium und gibt diese dann als Rückwärme an den Zuluftstrom ab. Nachfolgend wird die technische Arbeitsweise folgender System erläutert:

---

[14] Eigenes Schema Wärmerückgewinnung

- Plattenwärmetauscher
- Wärmerohr
- Rotationswärmetauscher
- Umschaltspeicher
- Kreislaufverbundsystem

2.3.1 Plattenwärmetauscher

Ein Plattenwärmetauscher besteht aus einem Gehäuse. In diesem Gehäuse befinden sich dünne Platten aus einem wärmeleitenden Material. Als Material kann zum Beispiel Aluminium, Edelstahl oder auch Kunststoff genutzt werden. Die einzelnen Platten können miteinander verklebt, verschweißt oder mechanisch verbunden sein.

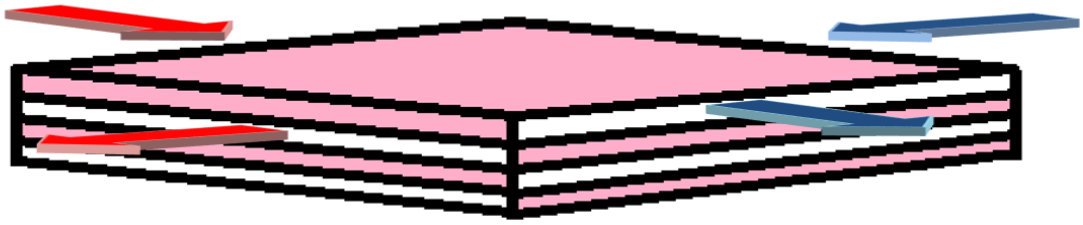

Abb. 5: Schema Plattenwärmetauscher[15]

Während des Betriebs werden Zuluftstrom und Abluftstrom aneinander vorbeigeleitet. Getrennt werden die Luftströme durch die Platten. Zu- und Abluftstrom können sowohl gleichgerichtet, aber auch gegengerichtet durch den Plattenwärmetauscher geleitet werden. Die Wärmeenergie der Abluft wird durch die Wärmeleiter in den Zuluftstrom geleitet. Durch Geometrieveränderung der Platten, etwa Wellen, kann die Oberfläche zwischen den Luftströmen vergrößert werden und die Effizienz eines Plattenwärmetauschers verbessert werden.

[15] Eigenes Schema Plattenwärmetauscher

2.3.2 Wärmerohr

Beim Wärmerohr werden Zuluftstrom und Abluftstrom in einem Gehäuse, durch eine Trennfläche separiert, zusammengeführt. Die Wärmerückführung wird über Wärmerohre realisiert. Die Wärmerohre können eine Anzahl einzeln abgeschlossene Rohre sein, oder aus einer Schlange bestehen. Die Wärmerohre sind mit einem Wärmeträger befüllt. Dieser Wärmeträger muss für den jeweiligen Temperaturbereich geeignet sein.

Als Bauformen wird zwischen den Gravitationswärmerohren und den Kapillarkraft-wärmerohren unterschieden.

Bei Gravitationswärmerohren wird, durch die im Abluftstrom enthaltene Wärme, der in dem Wärmerohr enthaltene Wärmeträger verdampft. Er einzieht dem Wärmestrom Energie. Der dampfförmige Wärmeträger steigt nun in den von der Zuluft umströmten Teil des Wärmerohrs. Dort gibt der Wärmeträger seine Wärmeenergie an den Luftstrom ab und kondensiert. Der Wärmeträger sinkt nun wieder in den Bereich den unteren Bereich des Wärmerohrs.

Die Kapillarkraftwärmerohre arbeiten nach dem gleichen Prinzip. Der Unterschied zu Gravitationswärmerohren besteht in zusätzlich eingebauten Kapillarstrukturen. Dies können z.B. Dochte, Gazegewebe oder poröse Strukturen sein. Durch die Kapillareinbauten kann die Oberflächenbenetzung, das Reaktionsverhalten und der Rückfluss des Wärmeträgers verbessert werden.

Die Wärmerohre können mit einer Kippregelung ausgestattet werden. Damit ist eine Leistungsanpassung der Wärmerohre möglich. Bei stehenden Rohren ist es notwendig den Wärmeluftstrom unterhalb des Kaltluftstroms entlangzuführen.

Bei der Auswahl des passenden Wärmeträgers ist auf den temperaturbezogenen Arbeitsbereich des Wärmtauschers und die gesetzlichen Vorgaben zum Einsatz von Kältemittel zu achten.[16]

---

[16] VDI (04.2013): Richtlinie 3803 Blatt 5-1. Raumlufttechnik, Geräteanforderungen, Wärmerückgewinnungssysteme. Beuth, 2013, (S.22 f)

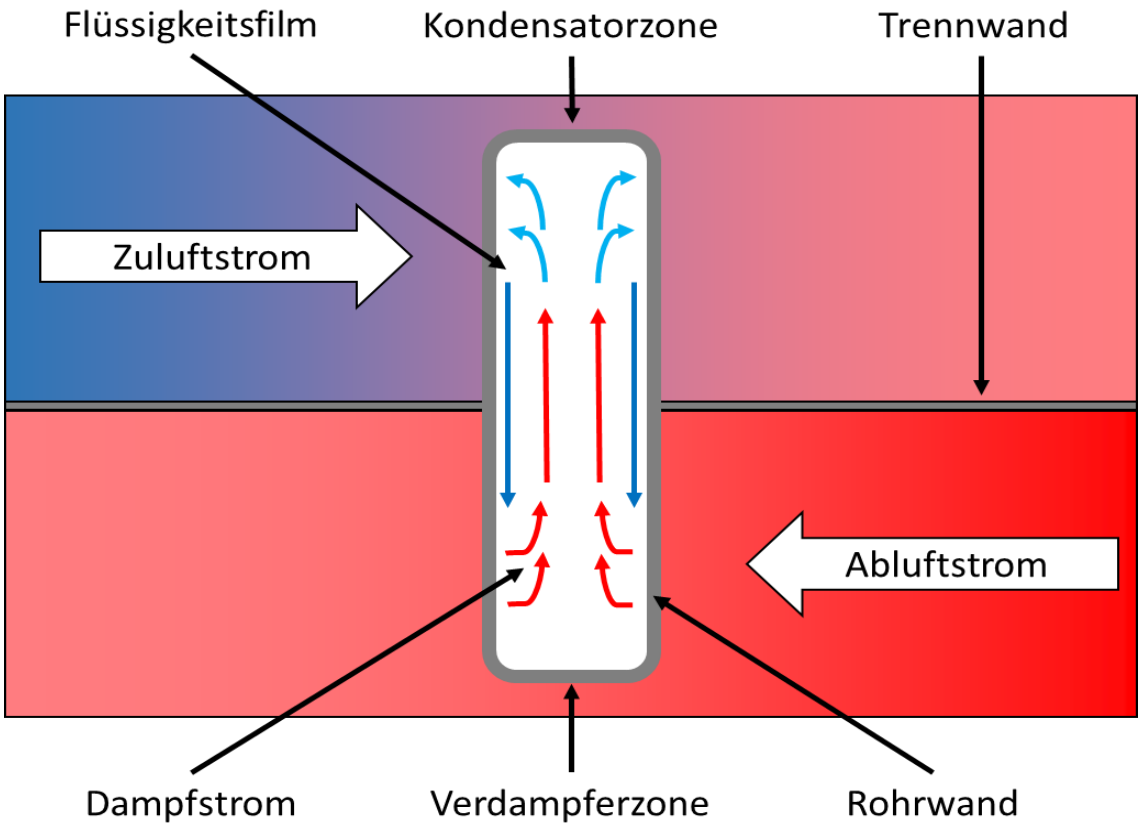

Abb. 6: Schema Wärmerohr[17]

2.3.3 Rotationswärmetauscher

Bei einem Rotationswärmetauscher werden Zuluftstrom und Abluftstrom in einem Gehäuse zusammengeführt. In diesem Gehäuse wird eine drehende Speichermasse axial durchströmt. Dabei befindet sich jeweils eine Hälfte der Speichermasse im Zuluftstrom und eine Hälfte im Abluftstrom. Die Wärme des Abluftstroms wird auf die Speichermasse übertragen. Nachdem sich der Rotor weitergedreht hat, wird die gespeicherte Wärmeenergie vom Zuluftstrom aufgenommen.

Die Rotation der Speichermasse kann Verschleppung und Leckagen zur Folge haben. Dabei kann Abluft in den Zuluftstrom gelangen. Durch einen Spülbereich kann eine Verschleppung unterbunden werden.[18]

---

[17] Eigenes Schema Wärmerohr
[18] VDI (04.2013): Richtlinie 3803 Blatt 5-1. Raumlufttechnik, Geräteanforderungen, Wärmerückgewinnungssysteme. Beuth, 2013, (S.23 f)

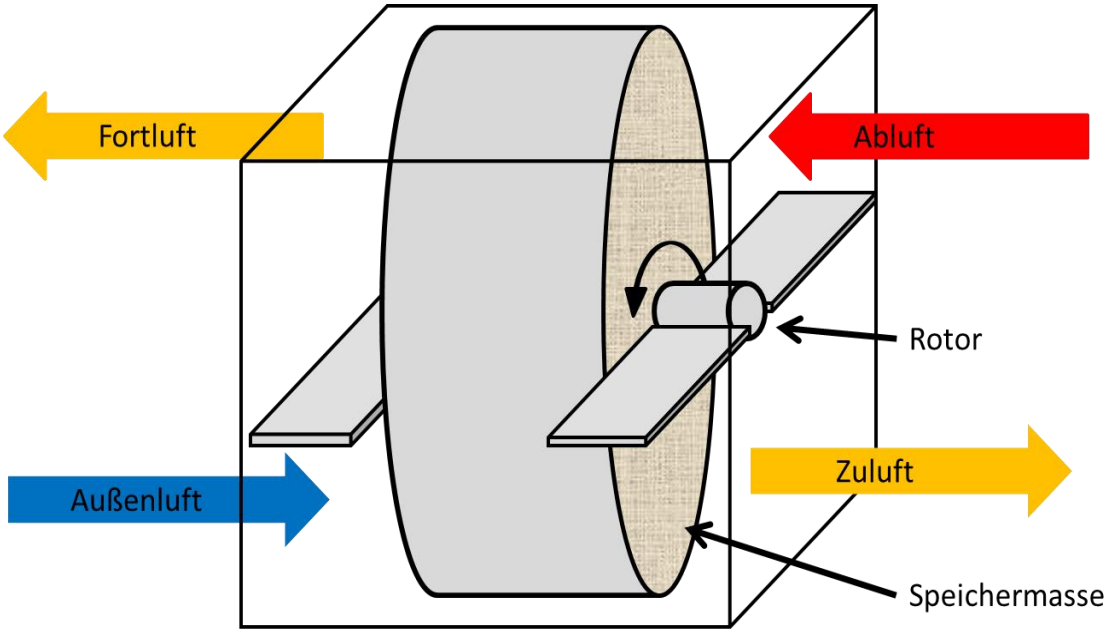

Abb. 7: Schema Rotationswärmetauscher[19]

2.3.4 Umschaltspeicher

Der Umschaltspeicher besteht aus einem Gehäuse in dem parallel zueinander Zuluftstrom und Abluftstrom entlanggeführt werden. Der Abluftstrom überträgt die in ihm enthaltende Wärmeenergie auf einen Wärmespeicher. Nach einem festgelegten Zyklus werden Klappen verstellt. Dadurch werden die Kanäle von Zuluft- und Abluftstrom getauscht. Der Zuluftstrom nimmt nun den Weg auf dem vorher der Abluftstrom entlanggeführt wurde. Der Zuluftstrom wird durch den aufgeladenen Wärmespeicher geführt und nimmt die darin enthaltene Wärmeenergie auf. Der Abluftstrom überträgt nun Energie auf den Wärmespeicher im vorherigen Zuluftkanal. Nach einem weiteren Zyklus werden die Klappen wieder in die Grundstellung gestellt.[20]

[19] Eigenes Schema Rotationswärmetauscher
[20] VDI (04.2013): Richtlinie 3803 Blatt 5-1. Raumlufttechnik, Geräteanforderungen, Wärmerückgewinnungssysteme. Beuth, 2013, (S.25 ff)

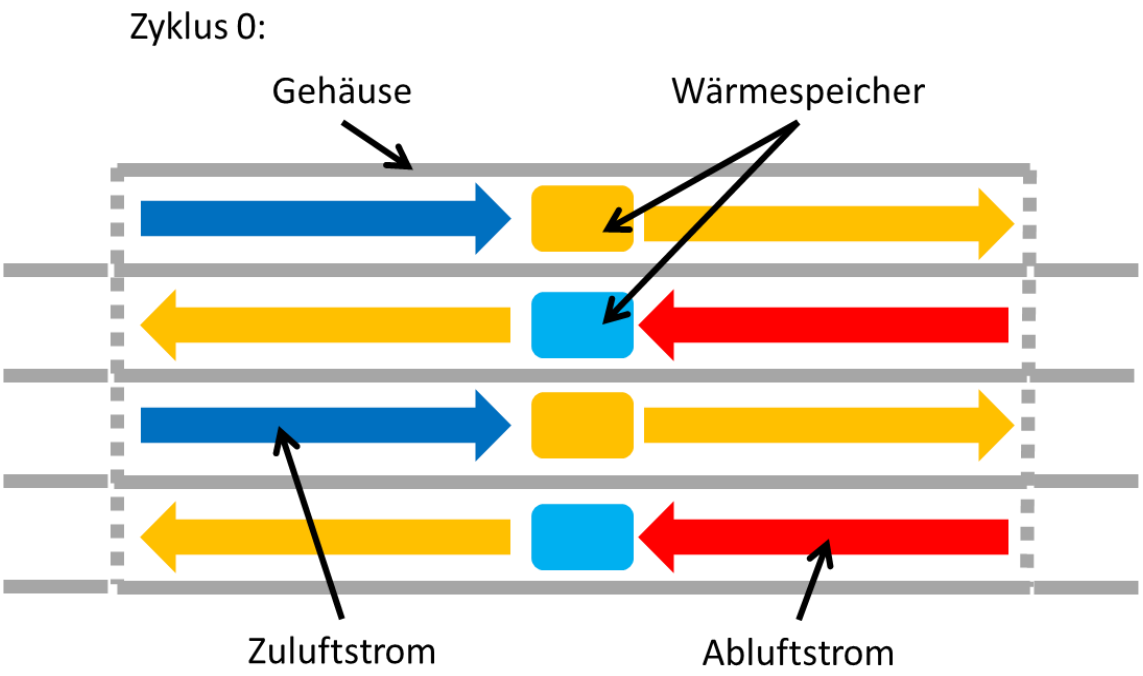

Abb. 8: Umschaltspeicher Stellung 1[21]

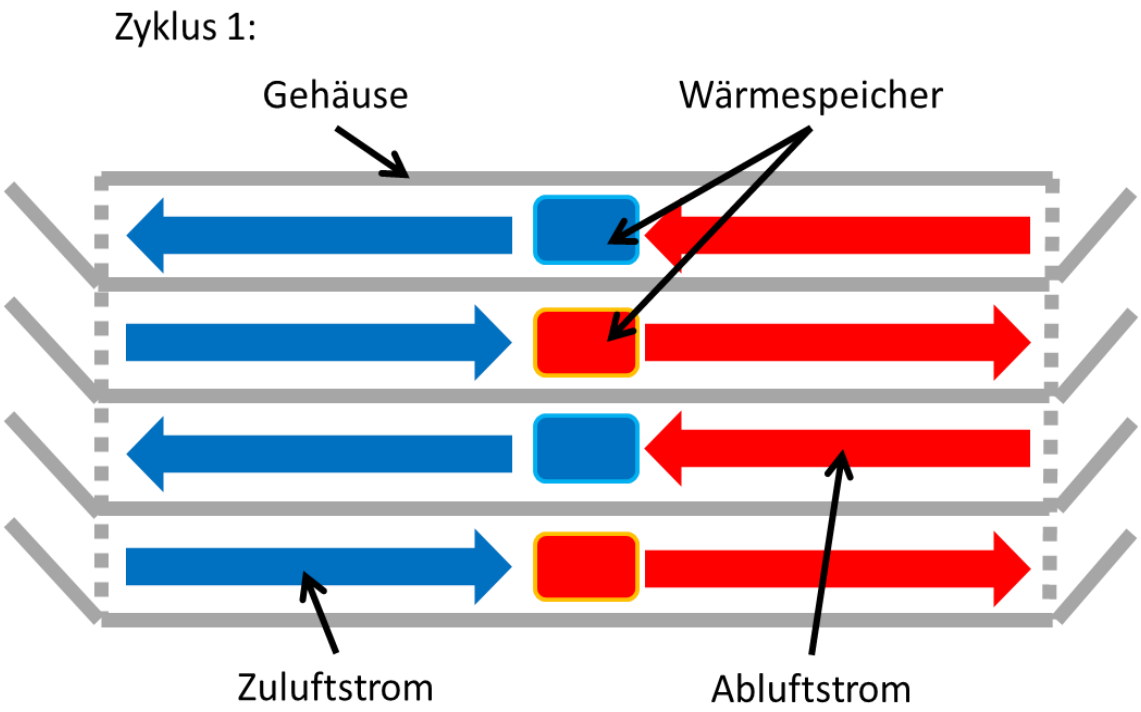

Abb. 9: Umschaltspeicher Stellung 2[22]

[21] Eigenes Schema Umschaltspeicher Stellung 1

2.3.5 Kreislaufverbundsystem

Ein Kreislaufverbundsystem besteht aus zwei aneinander gekoppelten Wärmeüberträgern. Diese Kopplung besteht aus Rohrleitungen. Die Rohrleitungen sind mit einem Wärmeträger befüllt. Ein Wärmeüberträger befindet sich im Zuluftstrom, der andere Wärmeüberträger im Abluftstrom. Als Wärmeüberträger können zum Beispiel Plattenwärmetauscher eingesetzt werden.

Der Wärmeüberträger auf der Abluftseite überträgt die im Abluftstrom enthaltene Wärme auf das Trägermedium. Durch eine Pumpe wird das Trägermedium zu dem anderen Wärmeüberträger im Zuluftstrom gefördert. Dort gibt das Wärmeträgermedium die enthaltene Wärmeenergie an den Luftstrom ab. Das erkaltete Medium wird in den Wärmeüberträger im Abluftstrom zurückgeleitet. Zur Regelung kann ein Kreislaufverbundsystem mit einem Steuerungsventil ausgestattet werden.

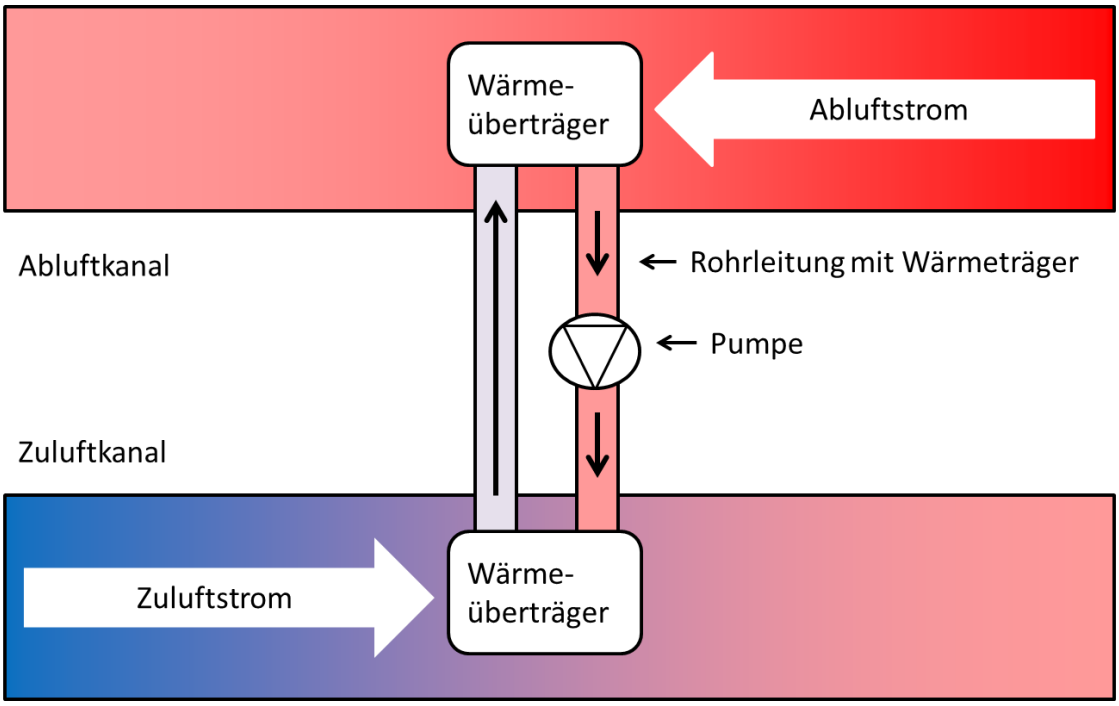

Abb. 10: Schema Kreislaufverbundsystem[23]

[22] Eigenes Schema Umschaltspeicher Stellung 2
[23] Eigenes Schema Kreislaufverbundsystem

2.4 Berechnung der CO_2-Einsparung

Die CO_2-Einsparung einer Anlage durch den Einsatz von Rekuperation ergibt sich aus der Differenz der Kohlendioxidemission des Systems vor und nach Einsatz der Anlage. Daher muss zuerst die in das bisherige System eingeleitete Energie ermittelt werden. Für diese Energiemenge muss die dabei entstandene CO_2-Emission berechnet werden. Anschließend muss die in das umgerüstete System eingeleitet Energie ermittelt werden. Auch in dem umgerüsteten System muss die CO_2-Emission der eingesetzten Energiemenge berechnet werden. Einzubeziehen sind dabei die für den Betrieb der Rekuperationsanlage eingesetzte Energie und der dafür verwendete Energieträger. Aus der Differenz der CO_2-Emissionen der alten Systems und der neuen Systems, inklusive des Betriebsaufwands der Rekuperationsanlage, ergibt sich die CO_2-Einsparung. Zur Berechnung der Differenz der CO_2-Emissionen kann folgende Formel genutzt werden:

$$Einsparung_{CO_2} = Emission_{CO_2Alt} - Emission_{CO_2Neu} \qquad (1)$$

2.4.1 Wärmekapazität

Zur Ermittlung der eingeleitet Energie muss die Energiemenge berechnet werden, die benötigt wird um die eingeleitete Außenluft auf die gewünscht Temperatur zu erwärmen. Um diese Energiemenge, nachfolgend "Q_L" zu berechnen, muss die Wärmekapazität des betrachtenden Mediums ermittelt werden. Das in diesem Fall betrachtete Medium ist Außenluft, also ein Gas.

Bei der Ermittlung von Wärmekapazität von Gasen ist eine Definition der Rahmenbedingungen notwendig. Sie ist notwendig, da sich die Wärmekapazität von Gasen bei konstantem Druck von der Wärmekapazität von Gasen bei konstanten Volumen unterscheidet.[24] Da das Belüftungssystem offen ist, ist der Druck konstant.

Daraus folgt, dass die spezifische Wärmekapazität bei $c_p = 1{,}005 \frac{kJ}{kg \times K}$ liegt.[25]

Die Dichte "ρ" von Luft beträgt $\rho = 1{,}293 \frac{kg}{m^3}$.[26]

---

[24] https://www.chemie.de/lexikon/Spezifische_W%C3%A4rmekapazit%C3%A4t.html (15.11.2020)
[25] Gomeringer, et al., Tabellenbuch Metall, 47. Auflage, Europa Lehrmittel, 2017, (S.121)

Die benötigte Energiemenge "Q_L" zur Erwärmung von Luft lässt sich demnach mit folgender Formel berechnen:

$$Q_L = c_p \times \rho \times V_{m^3} \times \Delta T_K \text{ in kJ} \quad (2)$$

Umgeformt nach MWh ergibt sich die Formel:

$$Q_L = \frac{c_p \times \rho \times V_{m^3} \times \Delta T_K}{3{,}6 \times 10^6} \text{ in MWh} \quad (3)$$

Damit lässt sich die eingesetzt Energiemenge zur Erwärmung der Außenluft berechnen.

2.4.2 CO_2-Emissionsfaktoren

Die CO_2-Emission der eingesetzten Energie kann durch CO_2-Emissionfaktoren ermittelt werden. Der Emissionsfaktor, in Kilogramm CO_2 pro Kilowattstunde, wird mit der Energiemenge, in Kilowattstunde, multipliziert.

Die in Deutschland durchschnittlich gültigen CO_2-Emissionsfaktoren können der folgenden Tabelle entnommen werden. Mit diesen Faktoren ließen sich die gewünschten Werte berechnen.

Brennstoff	CO_2-Emission in kg CO_2/kWh
Steinkohlebrikett	0,335
Braunkohlebrikett	0,364
Erdgas	0,202
Strom mix	0,753
Heizöl leicht	0,266

Tabelle 1: CO2-Emissionsfaktoren[27]

Da das Werk Kassel seine Wärme und seinen Energiebedarf durch ein Kraftwerk der VW Kraftwerk GmbH deckt[28], werden zur Berechnung der Einsparungen die individuellen Emissionsfaktoren genutzt Diese Werte liefern für die betrachtete Anlage individuellere und damit genauere Werte. Die Emissionsfaktoren für 2020 sind:

---

[26] Gomeringer, et al., Tabellenbuch Metall, 47. Auflage, Europa Lehrmittel, 2017, (S.121)
[27] https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf (S.45 ff)
[28] http://www.vw-kraftwerk.de/ (15.11.2020)

Emissionsfaktoren	$kgCO_2/MWh$	tCO_2/MWh
Strom	722,00	0,7220
Raumwärme	367,10	0,3671
Erdgas H_o *)	181,60	0,1816

Abb. 11: Emissionsfaktoren CO_2[29]

Daraus ergibt sich folgende Formel zur Berechnung der CO_2-Emission:

$$Emission_{CO_2} = EnergieRaum_{MWh} \times EmissionfaktorRaum_{CO_2} + EnergieStrom_{MWh} \times EmissionfaktorStrom_{CO_2} \quad (4)$$

Durch das Einsetzten der Formel (3) aus Kapitel 2.4.1 folgt:

$$Einsp._{CO_2} = \frac{1{,}005\,\frac{kJ}{kg \times K} \times 1{,}293\,\frac{kg}{m^3} \times V_{m^3} \times \Delta T_K}{3{,}6 \times 10^6} \times 0{,}3671\,\frac{tCO_2}{MWh} - Q_{el} \times 0{,}7220\,\frac{tCO_2}{MWh} \quad (5)$$

Wenn nun die Temperaturwerte der Außenluft und der Abluft, die Volumenströme und die elektrische Stromaufnahme gegeben sind, lässt sich mit dieser Formel die CO_2-Einsparung bei Einsatz einer Wärmerückführungsanlage im Lüftungssystem berechnen.

2.5 Statistische Auswertung der Temperaturwerte

Der Enthalpiestrom der Wärmerückführung ergibt sich aus der Differenz zwischen der Zulufttemperatur und Ablufttemperatur und dem Übertragungsgrad des Rekuperationssystems. Daher ist die statistische Auswertung der erfassten Temperaturwerte notwendig, um den möglichen Enthalpiestrom durch die Wärmerückführung berechnen zu können. Für die statistische Auswertung müssen die erfassten Messwerte in Kennzahlen gewandelt werden, die miteinander verglichen werden können.

[29] VW Intranet, VW Kraftwerk GmbH, Emissionsfaktoren CO_2, (15.11.2020)

2.5.1 Statistische Auswertung der Außentemperaturwerte

Da das Belüftungssystem Außenluft nutzt, ist es sinnvoll Standardwerte aus der Meteorologie zu nutzen. Diese Standartwerte der Lufttemperaturwerte sind der täglichen Mittelwert, der monatlichen Mittelwert und der jährlichen Mittelwert.[30] Um diese Werte zu ermitteln, wird der etablierte Berechnungsweg des Deutschen Wetterdienstes genutzt. Genutzt wird daher ein Berechnungsweg der Lufttemperatur des Deutschen Wetterdienstes.

Je nach Anzahl der täglichen Messwerte kann eine andere Formel genutzt werden. Für eine stündliche Messwerterfassung gilt[31]:

$$T_L = \frac{1}{24}(T_0 + T_1 + T_2 + \cdots + T_{23}) \text{ in °C} \tag{6}$$

Bei der zu betrachtenden Messwertaufzeichnung stehen nur 3 Messwerte pro Tag zur Verfügung. Daher wird auf die Auswertungsmethode der „Mannheimer Stunden“[32] zurückgegriffen. Die Formel auf die zurückgegriffen wird ist:

$$T_L = \frac{1}{4}(T_7 + T_{15} + 2 \times T_{23}) \text{ in °C} \tag{7}$$

Der Monatsmittelwert wird berechnet, in dem die täglichen Mittelwerte eines Monats addiert werden und durch die Anzahl der Tage geteilt werden.[33] Die folgende Formel findet dazu Anwendung:

$$T_{Mon} = \frac{1}{Ln}(T_{L1} + T_{L2} + T_{L3} + \cdots + T_{Ln}) \text{ in °C} \tag{8}$$

Um den Jahresmittelwert zu berechnen werden die Monatsmittelwerte addiert und durch Zwölf geteilt. Folgende Formel kommt dabei zur Anwendung:

$$T_{Jahr} = \frac{1}{12}\left(T_{Jan} + T_{Feb} + T_{Mrz} + \cdots + T_{Dez}\right) \text{ in °C} \tag{9}$$

---

[30] Norm: DIN EN ISO 15927-1 (02.2004): Wärme- und feuchteschutztechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung und Darstellung von Klimadaten - Teil 1: Monats- und Jahresmittelwerte einzelner meteorologischer Elemente, Beuth, 2004, (S.8 ff)
[31] Norm: DIN EN ISO 15927-1 (02.2004): Wärme- und feuchteschutztechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung und Darstellung von Klimadaten - Teil 1: Monats- und Jahresmittelwerte einzelner meteorologischer Elemente, Beuth, 2004, (S.9)
[32] https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/j/jahresmitteltemperatur.html (06.11.2020)
[33] https://www.wetter.de/cms/wetterlexikon-monatsmitteltemperatur-2400111.html (05.11.2020)

Die reinen Mittelwerte sind wissenschaftlich betrachtet allerdings nur Orientierungswerte. Eine allgemeingültige Aussage über den Erwartungswert des Temperaturmittels oder belastbare Schlussfolgerungen lassen sich aus den Mittelwerten nicht treffen. Daher ist es notwendig auf stochastische Rechenmodelle zurückzugreifen.

Vor einer statistischen Auswertung müssen die gemessenen Werte auf Normalverteilung geprüft werden. Hierzu wird der Anderson Darling-Test[34] angewandt, da dieser auch besonders kritische Werte berücksichtigt.

Eingesetzt werden bei dem Anderson Darling-Test folgende Formeln[35]:

$$S = \sum_{i}^{n} (2k-1)\left[lnF(Y_k) + \ln\left(1 - F(Y_{n+1-k})\right)\right] \tag{10}$$

$$AD = (-n) - \frac{S}{n} \tag{11}$$

$$z = AD \times \left(1 + \frac{0{,}75}{n} + \frac{2{,}25}{n^2}\right) \tag{12}$$

Mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von:

$p = e^{(1{,}2937 - 5{,}709z + 0{,}0186z^2)}$ wenn z > 0,6

$p = e^{(0{,}9177 - 4{,}279z - 1{,}38z^2)}$ wenn 0,34 < z ≤ 0,6

$p = 1 - e^{(-8{,}318 + 42{,}796z - 59{,}938z^2)}$ wenn 0,2 < z ≤ 0,34

$p = 1 - e^{(-13{,}436 + 101{,}14z - 223{,}73z^2)}$ wenn z ≤ 0,2

Vorausgesetzt, dass eine Normalverteilung gegeben ist, wird die Varianz der Messwerte ermittelt. Die Varianz, bzw. mittleren quadratischen Abweichung des Mittelwerts[36], ist ein Maß für die Breite einer Verteilung. Im dieser Bachelorthesis wird sie genutzt um die Temperaturschwankungen der einzelnen Tages- und Monatsmittel zu ermitteln. Mit folgender Formel kann die Varianz berechnet werden:

---

[34] https://www.statistik-nachhilfe.de/ratgeber/statistik/induktive-statistik/signifikanztests-hypothesentests/pruefung-auf-verteilung-anpassungstests/anderson-darling-test (15.11.2020)
[35] https://www.sixsigmablackbelt.de/test-auf-normalverteilung-excel/ (19.11.2020)
[36] Gerhard Bohm, Günter Zech: Statistische Datenanalyse für Physiker, 1. Auflage, Springer Spektrum, 2020 (S.20 f.)

$$var(x) = E[(x - E(x))^2] = \sigma^2 \tag{11}$$

Da die Varianz aufgrund des Quadrierens eine Wertedimension aufweist, die nicht mit dem Ursprungswert vergleichbar ist, muss durch das Ziehen der Wurzel die Standartabweichung "σ" gebildet werden. Als Temperaturauswertungsbereich wird ein Temperaturkorridor von zwei Standartabweichungen gewählt. Damit ist ein möglicher Temperaturwert, eine Normalverteilung der Messwerte vorausgesetzt, mit über 95% in dem berechneten Temperaturkorridor.

Ergibt der Anderson Darling-Test das Nichtvorliegen einer Normalverteilung, so müssen die getesteten Messwerte weiter Analysiert werden. Als nächster Schritt wird ein Box-Plot Diagramm eingesetzt. Damit sollen statistische Ausreißerwerte ermittelt werden. Als Extremwerte gelten Werte die weiter als der 1,5fache Interquartilsabstand vom oberen bzw. unteren Quartil entfernt sind. Anschließend werden diese Werte aus der Auswertung entfernt und es wird erneut auf Normalverteilung geprüft.

Sollte sich trotz Ausschluss der Ausreißerwerte keine Normalverteilung nachweisen lassen, bzw. lassen sich keine Ausreißerwerte ermitteln, so werden die erfassten Werte am Median geteilt und erneut mit dem Anderson Darling-Test analysiert. Damit sollen Erkenntnisse über die Werteverteilung gewonnen werden, um nachvollziehbare Aussagen treffen zu können.

2.5.2 Statistische Auswertung der Ablufttemperaturwerte

Anders als bei der Erfassung der Außentemperatur kann das Tagesmittel der Ablufttemperatur mit folgender Formel berechnet werden:

$$T_L = \frac{1}{n}(T_1 + T_2 + T_3 + \cdots + T_n) \text{ in °C} \tag{12}$$

Die Anwendung dieser Formel ist möglich, da alle zehn Minuten ein Messwert erfasst wurde. Die Berechnung des Monatsmittels erfolgt nach der Formel, die auch bereits bei der Berechnung des Monatsmittels der Außentemperatur Anwendung findet:

$$T_{Mon} = \frac{1}{Ln}(T_{L1} + T_{L2} + T_{L3} + \cdots + T_{Ln}) \tag{13}$$

Die statistische Auswertung der Ablufttemperaturwerte erfolgt nach der gleichen Vorgehensweise wie die statistische Auswertung der Außentemperaturwerte.

3. Rahmenbedingungen

Zur Durchführung einer fundierten Analyse müssen die vorgegebenen Rahmenbedingungen definiert sein. Zu diesen Rahmenbedingungen gehören:

- der Aufbau der Gießerei
- die Struktur des betrachteten Belüftungssystems
- das geförderte Luftvolumen
- die Temperaturverläufe der Zuluft
- die Temperaturverläufe der Abluft
- die geforderten Hallentemperaturen

In diesem Kapitel werden daher die gegeben Rahmenbedingungen aufgezeigt.

3.1 Der Aufbau der Gießerei

Die Gießerei des Volkswagens Werks Kassel umfasst sechs Hallen. Die sechs Hallen sind Halle 5, Halle 5A, Halle 5B, Halle 5C, das Technologiezentrum und die neue Magnesiumgießerei.

Das im Rahmen der Bachelorthesis betrachtet Belüftungssystem befindet sich unter der Halle 5 und der direkt an Halle 5 angeschlossenen Halle 5A. In der Halle 5 werden Gussteile mit Druckgussmaschinen produziert. In der Halle 5A befindet sich die Aluminiumschmelze.

3.1.1 Das Belüftungssystem der Halle 5

Das Belüftungssystem der Halle 5A/5B der Gießerei Kassel basiert auf unterirdischen Luftkanälen, sogenannten Füchsen. Zu unterscheiden sind dabei Zuluftfüchse und Abluftfüchse.

Die Zuluftfüchse saugen Außenluft an und leiten diese durch Luftfilter und Heizregister. Anschließend wird die Luft in die Halle bzw.in die verschiedenen Anlagen geleitet. Zusätzlich verfügt die Halle 5A über einen extra Abluftfuchs in der die Abluft der Schmelzöfen gesammelt wird.

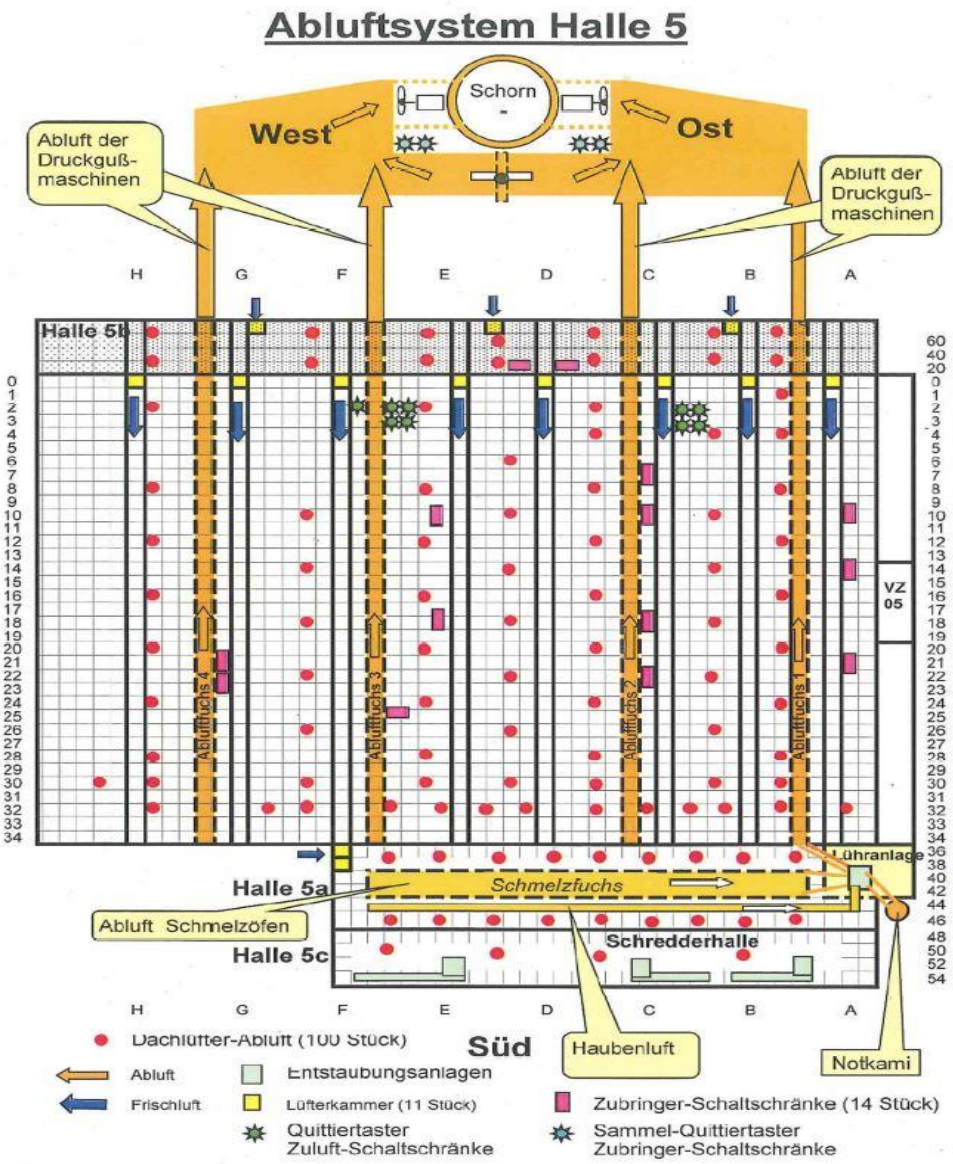

Abb. 12: Schema Abluftsystem der Halle 5 [37]

Die Abluftfüchse führen die Abluft der Maschinen zum Schornstein der Gießerei. Von dort wird die Abluft über den Schornstein abgeleitet. Dem Abluftfuchs 1 ist der Schmelzfuchs sowie eine Anlage zur technischen Nachverbrennung, die Lühranlage, vorgeschaltet. Insgesamt besteht die Belüftungsanlage aus acht Zuluftfüchsen und vier Abluftfüchsen. Ein Abluftfuchs liegt jeweils zwischen zwei Zuluftfüchsen.

[37] VW Intranet, Technisches Büro Infrastruktur, Abluftsystem Halle 5 , (15.11.2020)

3.1.2 Luftvolumen

Im bestehenden Belüftungssystem ist keine Volumenstrommessung vorhanden. Es gibt also sowohl für den Zuluftstrom, als auch für den Abluftstrom keinen Wert über das stündlich bewegte Luftvolume der mit Messungen belegt werden könnte. Daher muss das Luftvolumen, das jede Stunde durch die Kanäle geleitet wird, abgeschätzt werden. Als Grundlage für die Schätzung können verschiedene Ansätze gewählt werden. Bei den folgenden drei Ansätzen ist eine technische Grundlage der Schätzung gegeben.

Der erste Ansatz stützt sich auf die Fördervolumen der Ventilatoren der Zuluftkanäle. Durch Addition der Förderleistung der acht einzelnen Ventilatoren kann ein Gesamtfördervolumen ermittelt werden und als Volumenstrom angenommen werden.

Der zweite Ansatz beruht auf dem Schornsteinventilator. Da sämtliche Abluftkanäle beim Schornstein zusammengeführt werden, entspricht die Förderleistung des Schornstein-ventilators dem gesamten Luftvolumenstrom der Abluft.

Der dritte Ansatz orientiert sich an den Abluftsystemen der an das Belüftungssystem angeschlossenen Anlagen. Durch Addition der Förderleistung der einzelnen Abluftanlagen der Maschinen und der Hallen kann ein Gesamtvolumenstrom der Abluft ermittelt werden.

Zur Abschätzung des stündlich bewegten Luftvolumens wurde der zweite Ansatz gewählt. Der zweite Ansatz, die Förderleistung des Schornsteinventilators als Ansatzpunkt zu verwenden, bietet gegenüber den anderen Ansätzen mehrere Vorteile.

Anders als bei den Ansätzen eins und drei, muss nur die Förderleistung eines Ventilators berücksichtigt werden. Bei den anderen Ansätzen müssten mehrere Förderleistungen ermittelt werden. Der Aufwand wäre größer und die Möglichkeit unbekannter Einflüsse, etwa Verschmutzung, höher.

Ein weiterer Vorteil des zweitens Ansatzes ergibt sich durch den zweiten Schornsteinventilator. Da immer einer der beiden baugleichen Ventilatoren in Betrieb ist, liegt immer ein konstantes Fördervolumen vor, bei den anderen Ansätzen ist dies nicht der Fall. Bei diesen Ansätzen müssten Stillstände berücksichtigt werden.

Das maximale Fördervolumen des Schornsteinventilators beträgt 1.000.000 m^3 pro Stunde. Der Schornsteinventilator läuft konstant unter Volllast, damit wird konstant das maximale Fördervolumen bewegt. Da das aus den Hallen geleitet Luftvolumen auch in die Hallen eingeleitet werden muss, beträgt somit die auch der gesamte Volumenstrom der Zuluft 1.000.000 m^3 pro Stunde. Im Verlauf der Analyse werden also sämtliche Berechnungen auf Grundlage von einem Volumenstrom der Zuluft und der Abluft von 1.000.000 m^3 pro Stunde zu Grunde gelegt.

3.2 Temperaturen

Neben dem Luftvolumen sind auch die Temperaturen der Zuluft und der Abluft notwendig um die Effektivität einer Wärmerückführungsanlage ermitteln zu können. Im Rahmen der Bachelorthesis wird für jeden der vier Abluftkanäle eine durchschnittliche Temperatur ermittelt. Da an den vier Abluftkanälen unterschiedliche Maschinen angeschlossen sind, ist es notwendig für jeden Abluftkanal einen eigenen Durchschnittswert zu ermitteln. Der Durchschnittswert ergibt sich aus messtechnisch erfassten Temperaturverläufen.

Für die Zuluft ist es ausreichend einen Durchschnittswert zu ermittelt, da Außenluft in alle Zuluftkanäle eingeleitet wird. Dieser Durchschnittswert entspricht dem Jahresdurchschnitt der Außentemperatur.

3.2.1 Messaufbau

Die Ermittlung der Temperaturverläufe der eingeleiteten Außenluft erfolgt über ein bereits vorhandenes Messsystem der Gebäudeleittechnik. Das Messsystem der Gebäudeleittechnik umfasst fünf Orte an denen feste Messstationen aufgebaut wurden. Diese Messstationen sind über das gesamte Werkgelände verteilt. Eine Messstation befindet sich bei der Gießerei. Im Rahmen der Bachelorthesis werden die Messwerte dieser Messstation als maßgebliche Temperatur der Außenluft angenommen. Die Messstation zeichnet alle acht Stunden den aktuellen Temperaturwert auf.

In den Abluftkanälen ist kein festinstalliertes Temperaturerfassungssystem vorhanden. Um für das Abluftsystem verwertbare Temperaturwerte zu bekommen, wurde in jedem der vier Abluftfüchse eine Messung aufgebaut.

Der Messaufbau besteht aus je einem 175-T2 Datenlogger der Firma Testo SE & Co. KGaA. An jeden Datenlogger wurde eine Temperaturmesssonde angeschlossen.

Abb. 13: Datenlogger 175-T2 Fa. Testo[38]

Die Messsonden wurden in den jeweiligen Abluftfuchs gehängt, die Datenlogger wurden außerhalb der Abluftfüchse installiert. Die Erfassung der gemessenen Temperatur erfolgte in einem 10 Minuten Intervall.

3.2.2 Temperaturverlauf Zuluft

Die ausgewerteten Messewerte der Außentemperatur wurden vom 15.10.2017 bis zum 16.10.2020 erfasst. Zwischen dem 09.11.2018 und dem 18.02.2019 konnten keine Daten erfasst werden. Zur Auswertung und Darstellung der Temperaturen wurde aus

[38] eigene Aufnahme Datenlogger

den täglich drei erfassten Temperaturwerten der Tagesmittelwert[39] berechnet. Dazu wurde der Rechenweg der „Mannheimer Stunde“ angewandt (s.2.5.1 Statistische Auswertung der Außentemperaturwerte). Die Wertetabelle ist im Anhang zu finden.

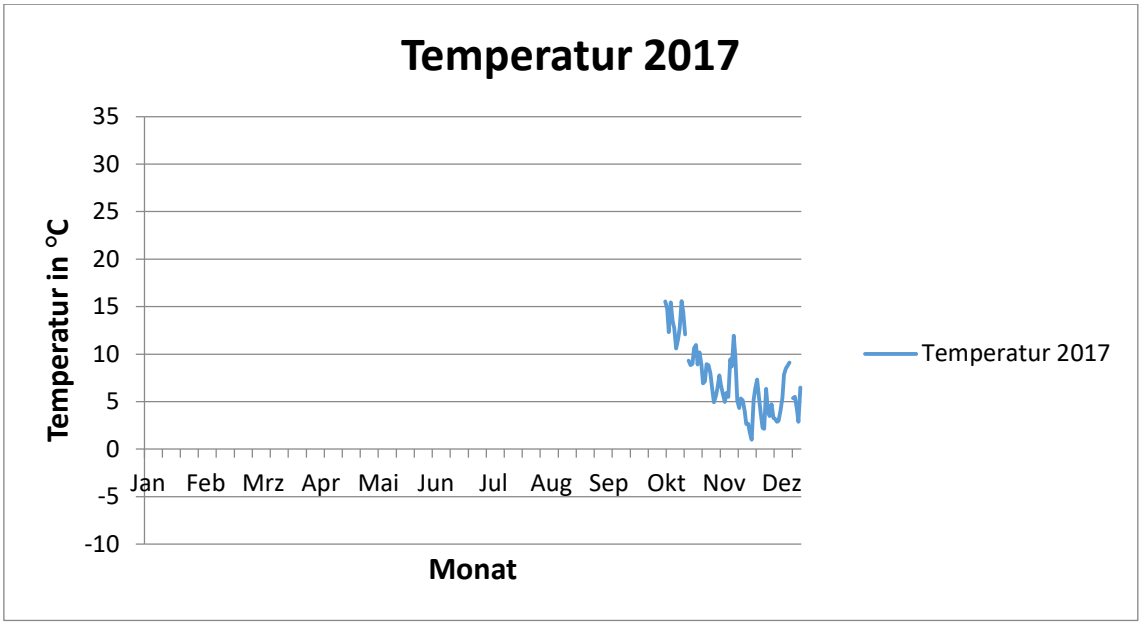

Abb. 14: Temperaturverlauf 2017[40]

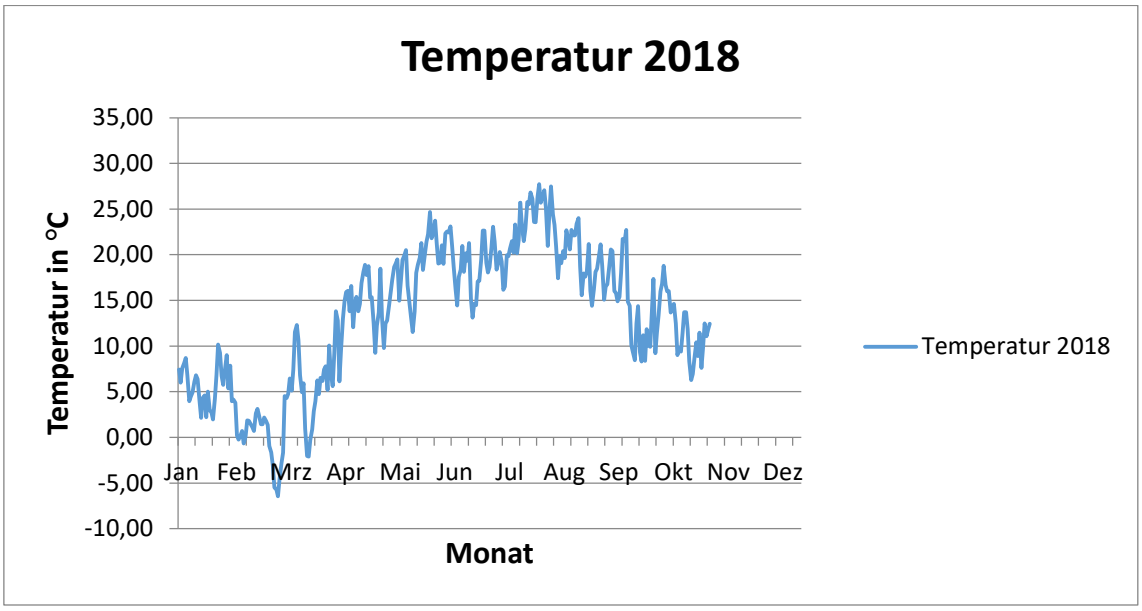

Abb. 15: Temperaturverlauf 2018[41]

[39] https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/j/jahresmitteltemperatur.html (06.11.2020)
[40] Eigene Grafik basierend auf Werten der Gebäudeleittechnik Volkswagen Werk Kassel

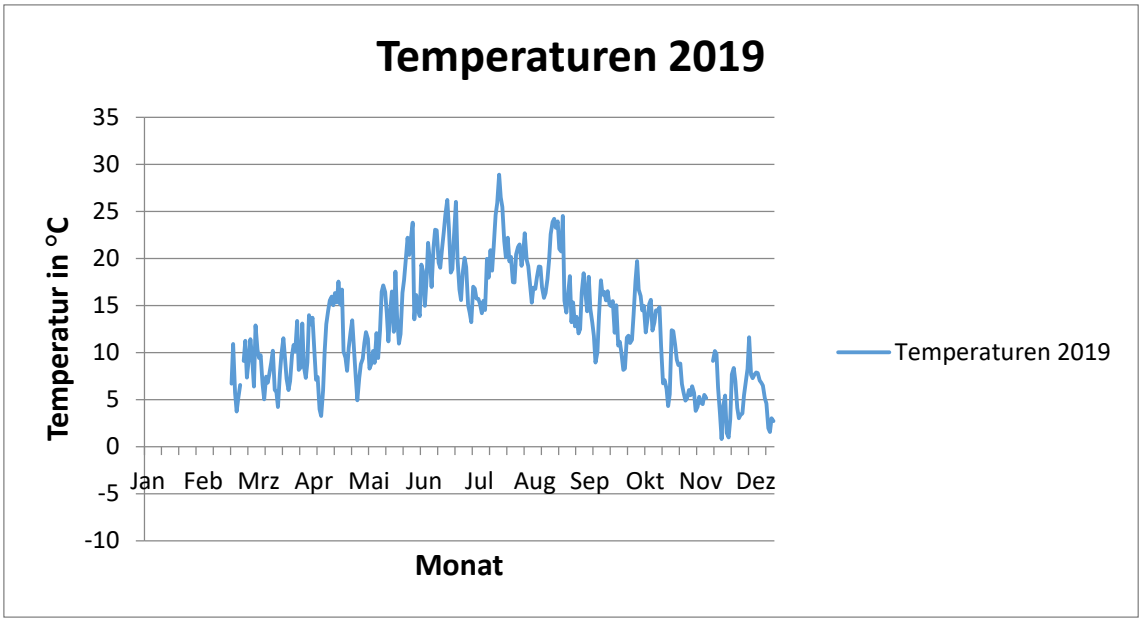

Abb. 16: Temperaturverlauf 2019[42]

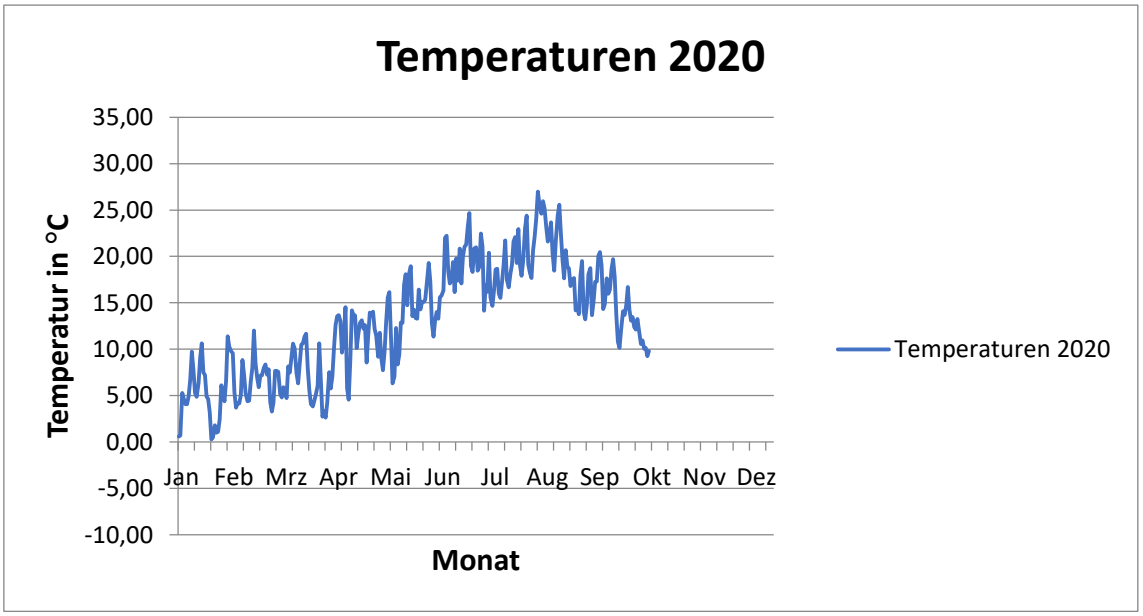

Abb. 17: Temperaturverlauf 2020[43]

[41] Eigene Grafik basierend auf Werten der Gebäudeleittechnik Volkswagen Werk Kassel
[42] Eigene Grafik basierend auf Werten der Gebäudeleittechnik Volkswagen Werk Kassel
[43] Eigene Grafik basierend auf Werten der Gebäudeleittechnik Volkswagen Werk Kassel

3.2.3 Temperaturverlauf Abluft

Die ausgewerteten Messwerte wurden vom 06.09.2020 bis 06.10.2020 erfasst. Aus den im Intervall von zehn Minuten erfassten Temperaturwerten wurde der Tagesmittelwert[44] berechnet. Die Einzelmesswerte sind im Anhang zu finden. Da der Datenlogger des Abluftfuchses 3 nach der Datenerfassung am 23.10.2020 verschwunden ist, konnten für den Abluftfuchs 3 keine weiteren Messwerte erfasst werden.

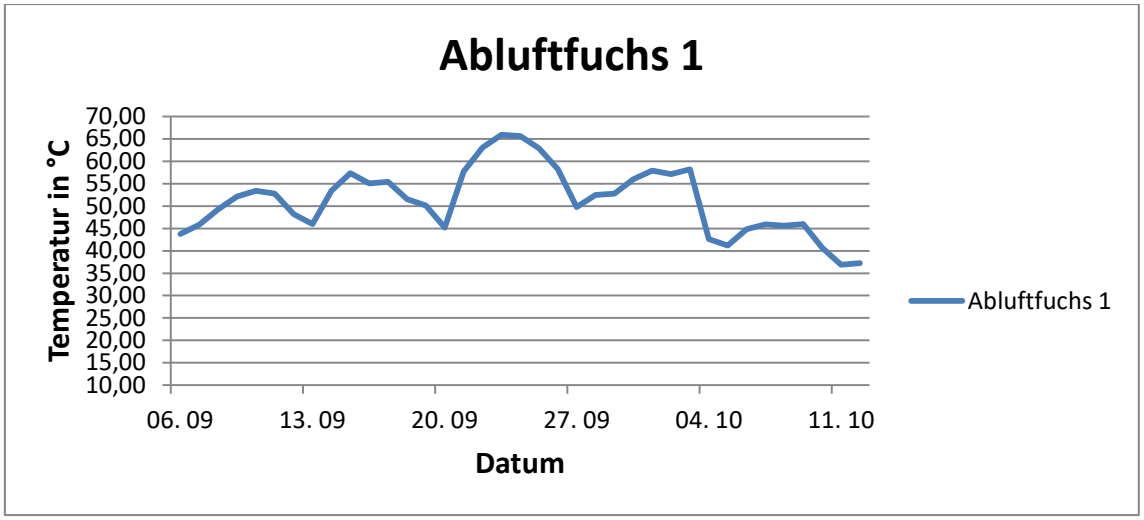

Abb. 18: Temperaturverlauf Abluftfuchs 1[45]

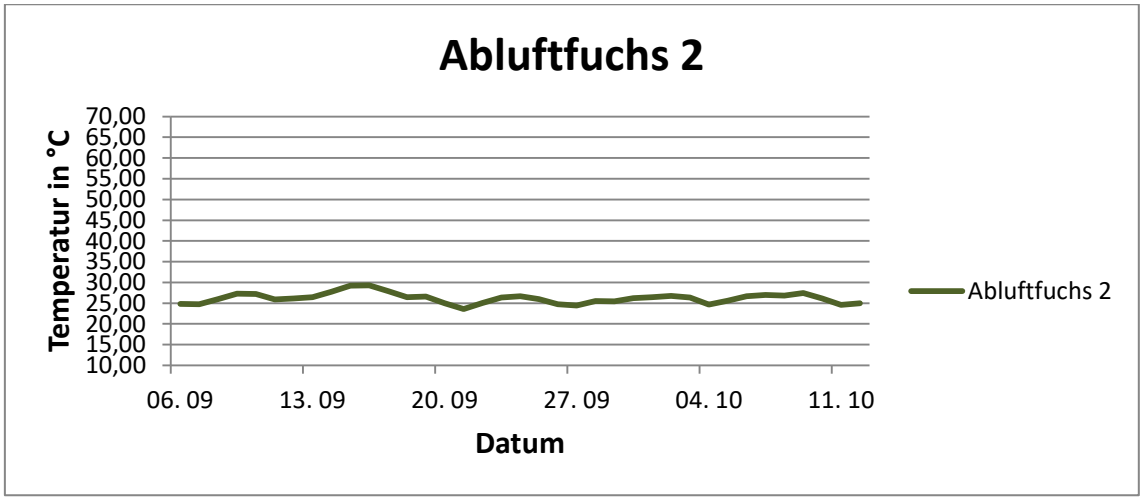

Abb. 19: Temperaturverlauf Abluftfuchs 2[46]

---

[44] Norm: DIN EN ISO 15927-1 (02.2004): Wärme- und feuchteschutztechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung und Darstellung von Klimadaten - Teil 1: Monats- und Jahresmittelwerte einzelner meteorologischer Elemente, Beuth, 2004, (S.9)

[45] Eigene Grafik basierend auf Werten der Temperaturerfassung durch Datenlogger Abluftfuchs 1

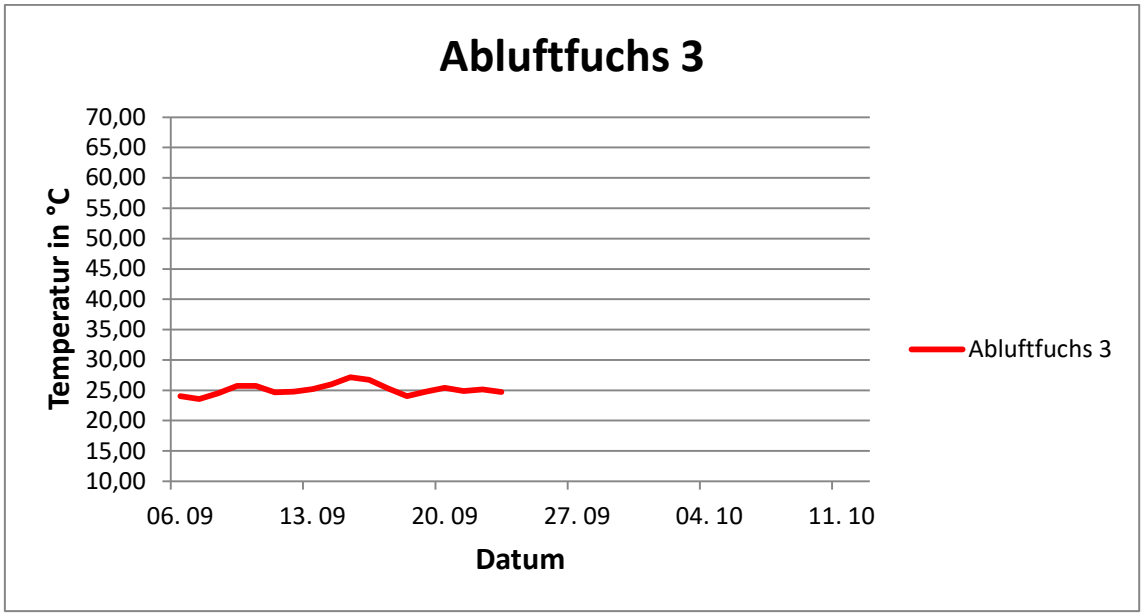

Abb. 20: Temperaturverlauf Abluftfuchs 3[47]

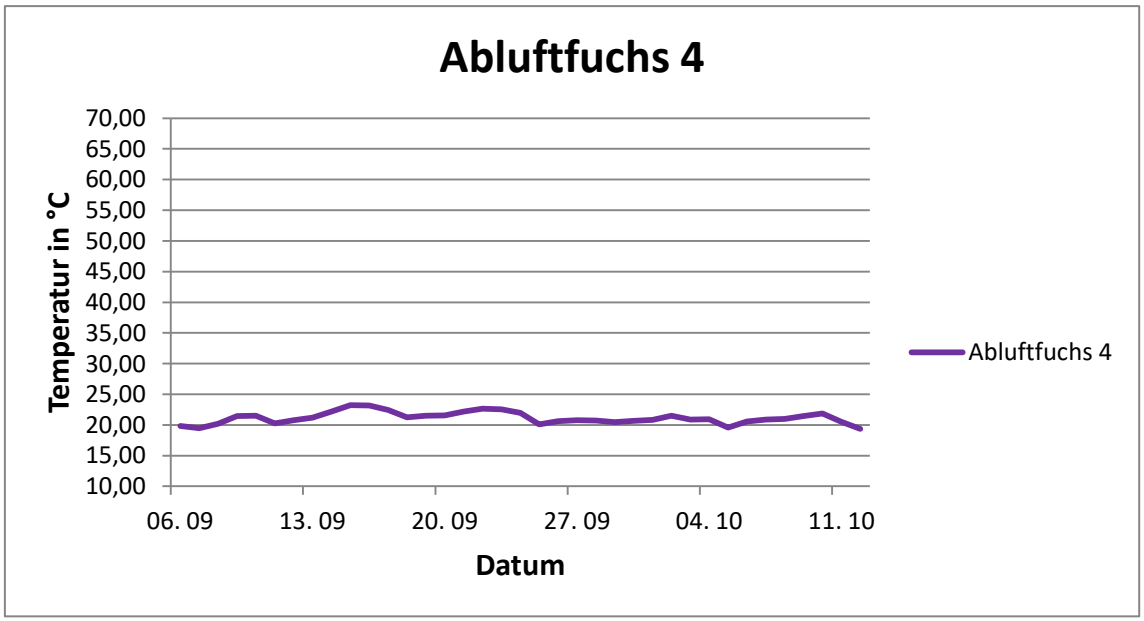

Abb. 21: Temperaturverlauf Abluftfuchs 4[48]

[46] Eigene Grafik basierend auf Werten der Temperaturerfassung durch Datenlogger Abluftfuchs 2
[47] Eigene Grafik basierend auf Werten der Temperaturerfassung durch Datenlogger Abluftfuchs 3
[48] Eigene Grafik basierend auf Werten der Temperaturerfassung durch Datenlogger Abluftfuchs 4

4. Analyse

Zur Feststellung, ob der Einsatz eines Wärmerückführungssystems sinnvoll ist, müssen zwei Fragestellungen beantwortet werden.

Es muss erstens geklärt werden, welches Wärmerückgewinnungssystem sich am besten für den Einsatzort Gießerei eignet. Dazu müssen die Vor- und Nachteile jedes Systems betrachtet werden und mit den Anforderungen der Gießerei abgeglichen werden.

Als zweites muss festgellt werden, wie hoch die mögliche Wärmerückführung ist. Hierfür müssen die Temperaturen der Zuluft und der Abluft analysiert werden.

4.1 Anforderungen der Gießerei

Die Anforderungen bezüglich eines Wärmerückgewinnungssystems in der Luftversorgung der Gießerei haben vier Eckpunkte. Diese Eckpunkte sind:

- Bauliche Vorgaben
- gefördertes Luftvolumen
- Staub und Verschmutzung der Abluft
- Schadstofffreiheit der Zuluft

4.1.1 Bauliche Vorgaben der Gießerei

Die Gießerei verfügt über ein funktionierendes Belüftungs- und Entlüftungssystem. In dem bestehenden System sind die Zuluftkanäle und die Abluftkanäle räumlich voneinander getrennt. Aufgrund von Brandschutzvorgaben müssen die Abluftkanäle feuerbeständig sein und mit Feuerschutzklappen ausgestattet sein. Das bestehende System verfügt über diese Sicherheitseinrichtungen. Ein kompletter Neubau des Belüftungssystems ist daher weder sinnvoll, noch wirtschaftlich. Ein Wärmerückgewinnungssystem muss also in das bestehende System integrierbar sein und die räumliche Trennung der Luftkanäle kompensieren können.

4.1.2 Gefördertes Luftvolumen

Das Belüftungssystem der Gießerei besteht aus vier Abluftkanälen und acht Zuluftkanälen. Der ermittelte Luftvolumenstrom beträgt jeweils 1.000.000 m³/h in der Abluft und in der Zuluft. Pro Zuluftkanal beträgt das geförderte Luftvolumen demnach 125.000 m³/h. Pro Abluftkanal beträgt das Luftvolumen 250.000 m³/h. Das eingesetzt

System zur Wärmerückführung muss in der Lage sein dieses Luftvolumen bewältigen zu können.

4.1.3 Staub und Verschmutzung der Abluft

Die Abluft ist sehr stark mit Staubpartikeln versetzt. Diese Staubpartikel stammen von Trennmittel, dass die Druckgussanlagen während des Produktionsprozesses auf die Gussformen auftragen. Jeder Abluftfuchs wird aufgrund der starken Verschmutzungen im Rhythmus von vier Wochen gereinigt.

Ein Wärmerückführungssystem muss daher sowohl unempfindlich gegenüber Verschmutzung sein als auch einen geringen Reinigungsaufwand haben.

4.1.4 Schadstofffreiheit der Zuluft

Die Abluft der Gießerei ist mit Schadstoffen belastet. Die Schadstoffbelastung resultiert aus Zusätzen die beim Schmelzen des Aluminiums verwendet werden müssen. Aufgrund der hohen Schadstoffbelastung ist Abluftkanal Vier sogar eine Anlage zur technischen Nachverbrennung vorgeschaltet.

Die Zuluft wird für Verbrennungsprozesse und für die Belüftung der Hallen genutzt. Aufgrund der Arbeitsstättenverordnung muss die eingeleitete Luft frei von Schadstoffen sein. Das eingesetzt Wärmerückführungssystem muss daher eine Trennung beider Luftströme sicherstellen können.

4.2 Analyse Wärmerückgewinnungssysteme

Durch die Analyse der Wärmerückführungssysteme sollen die Merkmale jedes der Systeme aufgezeigt werden. Gleichzeitig soll die Kompatibilität von jedem System im Bezug zu den bereits analysierten Anforderungen der Gießerei geprüft werden. Ziel der Analyse ist die Antwort auf die Frage, welches Systeme der Wärmerückführung sich für das Belüftungssystem der Gießerei eignen.

4.2.1 Merkmale des Plattenwärmetauschers

Voraussetzung für den Betrieb eines Plattenwärmetauschers ist das Zusammenführen von Zuluft-und Abluftstrom. Ein Plattenwärmetauscher eignet sich für kleine und mittlere Volumenströme. Abhängig von der Art und dem Material der Dichtungen ist es möglich, dass Abluft in den Zuluftstrom gerät. Das System Plattenwärmetausche weist

generell eine geringe Leckage auf. Bei einem Defekt der Platten ist allerdings mit einer Leckage zu rechnen. Der Betrieb eines Plattenwärmetauschers läuft autonom und benötigt keine Hilfsenergie. Der Aufwand zu Wartung dieses Systems ist als gering anzusehen. Im Falle eines Brandes ist eine Rauch-bzw. Brandübertragung in den anderen Luftstrom möglich.

Das System Plattenwärmetauscher bietet verschiedene Vorteile. Der erste Vorteil ist der Anschaffungspreis. Da Plattenwärmetauscher in vielen Anlagen Verwendung finden, ist die Zahl der Anbieter groß und damit der Anschaffungspreis im Vergleich zu den anderen Systemen niedrig. Aus wirtschaftlicher Sicht spricht auch der geringe Wartungsaufwand für das System Plattenwärmetauscher. Aufgrund der geringen Komplexität dieses Systems ist die Wartung eines Plattenwärmetauschers einfach und günstig. Eine weitere positive Eigenschaft diese System ist die Betriebsautonomie. Da für den Betrieb keine Hilfsenergie benötigt wird, ist die Energiebilanz besser. Plattenwärmetauscher sind zwar grundsätzlich für kleine und mittlere Volumen geeignet, können aber beliebig erweitert und in ihrer Form geändert werden, was auch bei großen Volumenströmen eine Einsatz theoretisch möglich macht.

Gegen den Einsatz eines Plattenwärmetauschers spricht die Notwendigkeit einer Luftstromzusammenführung. Durch die baulichen Gegebenheiten ist eine Zusammenführung nicht möglich. Als weiteren Nachteil dieses Systems ist die mögliche Leckage zu sehen. Aufgrund der Inhaltsstoffe der Abluft ist eine Kontamination der Zuluft durch Abluft zu unterbinden. Dies kann dieses System nicht garantieren. Des Weiteren ist die mögliche Rauch- und Brandübertragung eine negative Eigenschaft dieses Systems. Aufgrund der Brandschutzbestimmungen muss eine Brandübertragung technisch werden können.

Zusammenfassend eignet sich das System Plattenwärmetauscher nicht für den Einsatz in dem Belüftungssystem der Gießerei.

4.2.2 Merkmale des Wärmerohrs

Bei dem Wärmerückführungssystem Wärmerohr müssen Zuluftstrom und Abluftstrom in einem Gehäuse zusammengeführt werden. Eine räumliche Trennung der Luftströme ist daher nicht möglich. Grundsätzlich eignet sich ein Wärmerohr für kleine und mittlere

Volumenströme. Eine Kontamination des Zuluftstrom durch Abluft ist möglich. Die generelle Leckage ist als gering einzustufen. Bei einem Defekt ist allerdings eine größere Leckage möglich. Im Falle eines Brandes ist eine Rauch- bzw. Brandübertragung möglich. Der Wartungsaufwand eines Wärmerohrs ist gering. Für den Betrieb eines Wärmerohrs wird keine Hilfsenergie benötigt.

Für den Einsatz des Wärmerohrs als System der Wärmerückführung spricht der geringe Wartungsaufwand des Systems. Auch das für den Betrieb keine Hilfsenergie gebraucht wird stellt einen Vorteil dieses Systems dar.

Gegen den Einsatz spricht allerdings, die Notwendigkeit der Zusammenführung der Luftströme. Dies ist in dem bestehenden Belüftungssystem nicht möglich. Als zweiter Punkt spricht das Luftvolumen gegen den Einsatz eines Wärmerohrs. Das im System geförderte Luftvolumen ist als groß einzustufen und daher nicht für das System Wärmerohr ausgelegt. Auch die Möglichkeit einer Kontamination der Zuluft durch die Abluft spricht gegen das System Wärmerohr. Ebenso ist die Gefahr der Rauch- bzw. Brandübertragung ein Ausschlusskriterium dieser Alternative.

Zusammenfassend ist das Wärmerückführungssystem Wärmerohr nicht für den Einsatz im Belüftungssystem geeignet.

4.2.3 Merkmale des Rotationswärmetauschers

Bei dem Wärmerückführungssystem des Rotationswärmetauschers müssen Zuluftstrom und Abluftstrom in einem Gehäuse zusammengeführt werden. Eine räumliche Trennung der beiden Luftströme ist daher nicht möglich. Grundsätzlich eignet sich ein Rotationswärmetauscher für kleine bis große Luftvolumenströme. Eine Kontamination der Zuluft durch die Abluft ist möglich. Diese Kontamination kann allerdings durch einen Spülbereich eingeschränkt werden. Für den Betrieb eines Rotationswärmetauschers ist Hilfsenergie notwendig, da der Rotor angetrieben werden muss. Das System Rotationswärmetauscher weist eine deutliche Leckage auf. Bei einem Defekt kann diese noch verstärkt werden. Der Wartungsaufwand ist als mittel einzustufen. Im Brandfall ist eine Brand- bzw. Rauchübertragung möglich.

Ein Argument für den Einsatz eines Rotationswärmetauschers als System zur Wärmerückführung ist der Einsatz bei großen Volumenströmen. Auch der als mittel eingestufte Wartungsaufwand spricht nicht gegen dieses System.

Jedoch setzt das System Rotationswärmetauscher eine Zusammenführung der Luftströme voraus, eine räumliche Trennung dieser ist also nicht möglich. Das bestehende Belüftungssystem kann diese Vorrausetzung nicht erfüllen. Ein weiteres Gegenargument ist die Kontamination der Zuluft durch Abluft. Auch wenn diese durch einen Spülbereich verringert werden kann, kann eine Verunreinigung der Zuluft nicht ausgeschlossen werden, was gefordert wird. Die Möglichkeit der Rauch- bzw. Brandübertragung ist ein zusätzliches Ausschlusskriterium. Des Weiteren für den Betreib Hilfsenergie benötigt, dies verschlechtert die Energiebilanz dieses Systems.

Nach Analyse der Merkmale eines Rotationswärmetauschers zeigt sich, dass dieses System nicht für den Einsatz in dem bestehenden Belüftungssystem geeignet ist.

4.2.4 Merkmale des Umschaltspeichers

Das System Umschaltspeicher benötigt ein Gehäuse, bei dem Zuluftstrom und Abluftstrom zusammengeführt werden. Bei einer räumlichen Trennung ist ein Einsatz dieses Systems nicht möglich. Ein Umschaltspeicher kann bei kleinen, mittleren und großen Luftvolumenströmen eingesetzt werden. Durch das Nutzen der gleichen Luftkanäle für Zuluft und Abluft ist eine Kontamination des Zuluftstroms durch den Abluftstrom möglich. Während des Umschaltens der Klappen kann es zu deutlichen Leckage kommen. Auch bei einem Defekt der Anlage ist mit Leckagen zu rechnen. Für den Betrieb eines Umschaltspeichers ist Hilfsenergie zur Steuerung der Klappen notwendig. Der generelle Wartungsaufwand dieses Systems ist als mittel einzustufen. Im Falle eines Brandes ist eine Rauch- bzw. Brandübertragung möglich.

Für den Einsatz des Umschaltspeichers spricht der mögliche Luftvolumenstrom. Das Belüftungssystem der Gießerei bewirkt einen sehr großen Luftvolumenstrom. Diese wäre durch einen Umschaltspeicher zu bewältigen. Auch der im mittleren Bereich eingestufte Wartungsaufwand ist kein Gegenargument.

Gegen den Einsatz eines Umschaltspeichers spricht die Notwendigkeit der zusammengeführten Luftströme. Diese Notwendigkeit kann im bestehenden

Belüftungssystem nicht abgebildet werden. Ein weiteres Argument gegen den Einsatz diese Systems ist die Möglichkeit der Kontamination des Zuluftstroms durch Abluft. Aufgrund von potentiell gesundheitsschädlichen Inhaltsstoffen ist eine Kontamination der Zuluft zu vermeiden. Ein weiteres Gegenargument ist die Gefahr der Rauch- bzw. Brandübertragung. Wegen der hohen Brandgefahr in der Gießerei ist eine Übertragmöglichkeit zwischen den Luftströmen zu vermeiden. Auch wird für den Betrieb Hilfsenergie benötigt. Dies verringert den Einspareffekt.

Aufgrund der genannten Argumente ist ein Einsatz des Systems Umschaltspeicher nicht möglich.

4.2.5 Merkmale des Kreislaufverbundsystems

Bei einem Kreislaufverbundsystem ist eine Zusammenführung des Zuluftstroms und des Abluftstroms nicht notwendig. Die Luftströme können räumlich voneinander getrennt sein. Der Einsatz dieses Wärmerückführungssystems eignet sich bei kleinen, mittleren und großen Luftvolumenströmen. Aufgrund der räumlichen Trennung ist eine Kontamination des Zuluftstroms durch den Abluftstrom ausgeschlossen. Auch bei einem Defekt ist eine Kontamination nicht möglich. Für den Betrieb eines Kreislaufverbundsystems ist Hilfsenergie notwendig. Der Wartungsaufwand ist als mittel einzustufen. Im Brandfall ist nicht mit einer Rauch- bzw. Brandübertragung zu rechnen.

Für den Einsatz eines Kreislaufverbundsystems sprechen die räumlichen Vorrausetzungen. Da bei diesem Wärmerückführungssystem keine Zusammenführung der Luftströme benötigt wird, ist der Einsatz in der Gießerei möglich. Das eine Kontamination der Zuluft, selbst bei einem Anlagendefekt, ausgeschlossen ist, ist ein weiteres Argument für das Kreislauf-verbundsystem. Ein weiteres Argument für den Einsatz ist das Brandverhalten. Da eine Rauch- bzw. Brandübertragung zwischen den Luftströmen nicht möglich ist, eignet sich dieses System für den Einsatzort.

Gegen den Einsatz eines Kreislaufverbundsystems spricht der Einsatz von Hilfsenergie zum Betrieb des Systems. Dadurch wird die Energiebilanz verschlechtert.

Das System Kreislaufverbundsystem eignet sich für den Einsatz im Belüftungssystem der Gießerei.

4.3 Analyse Temperaturverläufe

Für die Ermittlung der CO_2-Einsparung ist es notwendig, die Temperaturdifferenz ΔT_K (s. Formel (5); Kapitel 2.4.2 CO2-Emissionsfaktoren) zwischen dem Zuluftstrom und dem einzelnen Abluftstroms zu berechnen. Daher ist das Ziel der Analyse der Temperaturverläufe die Ermittlung von Temperaturreferenzwerten.

Grundsätzlich werden drei Referenzwerte benötigt. Der erste Referenzwert ist der Wert der geforderten Zulufttemperatur. Dieser Wert liegt ist vorgegeben und liegt bei 17°C. Übersteigt der Außenlufttemperaturwert diesen Referenzwert muss keine weitere Wärmeenergie dem Zuluftstrom zugeführt werden und eine Energierückführung ist nicht notwendig.

Der zweite Referenzwert ist der Temperaturwert des Abluftstroms. Da insgesamt vier Abluftfüchse betrieben werden und beim Vergleich der Mittelwertkennlinien klare Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Füchsen erkennbar sind, ist ein Referenzwert pro Abluftfuchs sinnvoll, um eine genauere Auswertung zu ermöglichen.

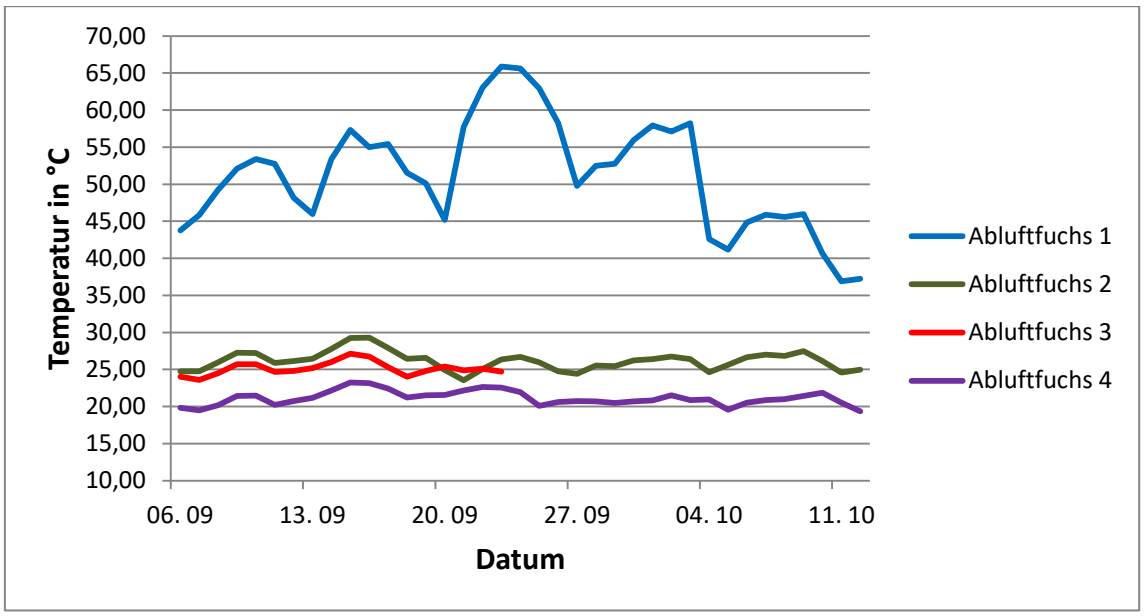

Abb. 22: Mittelwertkennlinien Abluftfüchse[49]

[49] Eigene Grafik basierend auf Werten der Temperaturerfassung durch Datenlogger Abluftfuchs 1-4

Vorausgesetzt, dass eine Normalverteilung der Messwerte der einzelnen Abluftfüchse vorliegt, wird als Referenzwert eines Abluftfuchses der niedrigere Wert der 2-fachen Standartabweichung genutzt. Mit eine Wahrscheinlichkeit von > 97% liegt der Temperaturwert des Abluftfuchses über diesem Wert.

Der dritte Referenzwert ist der Temperaturwert der Außenluft. Da eine Wärmerückführung nur bei einem Außentemperaturwert unter dem Wert der geforderten Zulufttemperatur notwendig ist, ist ein Jahresmittelwert nicht sinnvoll. Bei dem Jahresmittelwert würden auch die höheren Temperaturwerte der Sommermonate berücksichtigt werden, bei Monatsmittelwerten nicht. Daher werden für die Analyse und Auswertung die zwölf Monatsmittelwerte genutzt.

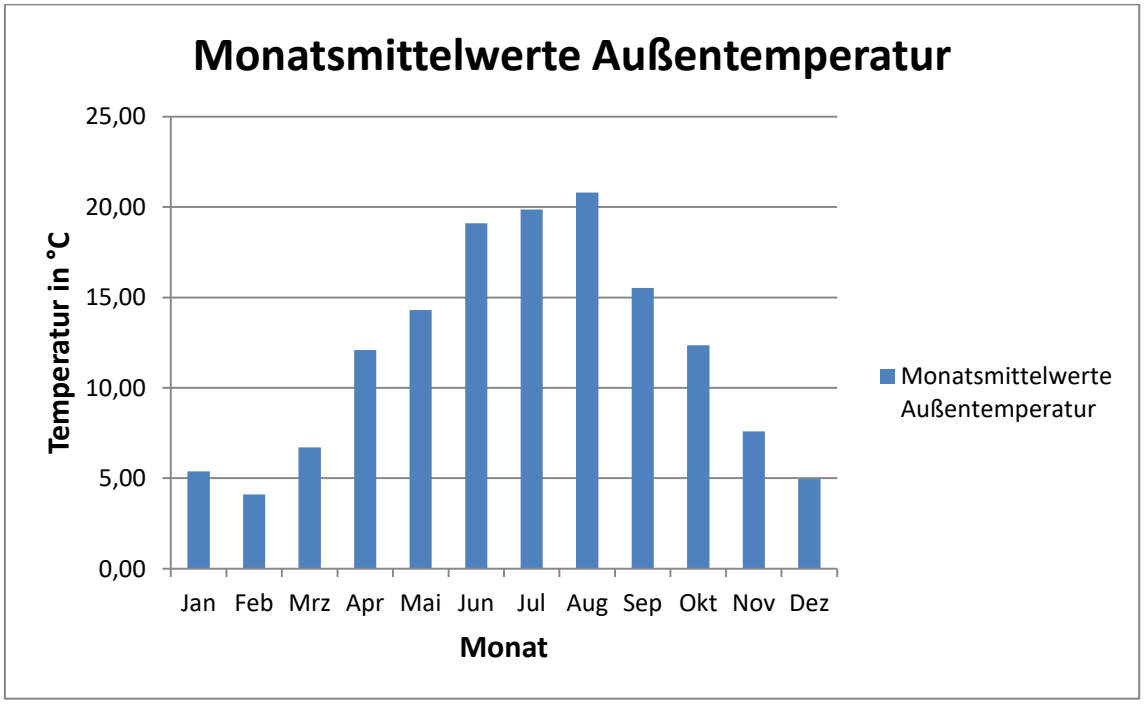

Abb. 23: Monatsmittelwerte Außentemperatur[50]

4.3.1 Verlauf Ablufttemperatur

Die Analyse der Temperaturwerte der Abluft erfolgt in zwei Schritten. Der erste Schritt der Analyse ist die Prüfung auf Normalverteilung. Der zweite Schritt ist die statistische Auswertung, die beantworten soll, ob die Temperaturen der Abluft für eine

[50] Eigene Grafik basierend auf Werten der Gebäudeleittechnik Volkswagen Werk Kassel

Wärmerückführung ausreichend hoch sind, bzw. welche Werte für die anschließende Auswertung genutzt werden können. Als Prüfverfahren auf Normalverteilung wird der Anderson Darling-Test genutzt. Geprüft werden die Tagesmittelwerte der einzelnen Abluftfüchse betragen:

Datum	Abluftfuchs 1	Abluftfuchs 2	Abluftfuchs 3	Abluftfuchs 4
06. 09	43,75	24,78	24,02	19,82
07. 09	45,84	24,74	23,57	19,47
08. 09	49,24	25,95	24,52	20,20
09. 09	52,09	27,27	25,72	21,44
10. 09	53,38	27,23	25,72	21,49
11. 09	52,74	25,88	24,68	20,24
12. 09	48,16	26,12	24,79	20,75
13. 09	45,95	26,44	25,19	21,18
14. 09	53,41	27,78	26,00	22,19
15. 09	57,34	29,25	27,15	23,23
16. 09	55,01	29,28	26,72	23,17
17. 09	55,42	27,93	25,32	22,43
18. 09	51,52	26,43	24,02	21,23
19. 09	50,13	26,56	24,78	21,51
20. 09	45,21	24,94	25,42	21,57
21. 09	57,71	23,56	24,87	22,17
22. 09	63,04	25,05	25,12	22,65
23. 09	65,89	26,34	24,73	22,53
24. 09	65,61	26,69		21,97
25. 09	62,92	25,97		20,10
26. 09	58,28	24,76		20,60
27. 09	49,75	24,39		20,75
28. 09	52,47	25,52		20,70
29. 09	52,73	25,46		20,46
30. 09	55,96	26,23		20,68
01. 10	57,93	26,41		20,83
02. 10	57,10	26,75		21,53
03. 10	58,22	26,39		20,86
04. 10	42,58	24,63		20,95
05. 10	41,19	25,61		19,58
06. 10	44,82	26,65		20,54
07. 10	45,89	26,99		20,86
08. 10	45,58	26,82		20,99
09. 10	45,98	27,46		21,43
10. 10	40,67	26,14		21,87
11. 10	36,91	24,59		20,50
12. 10	37,24	24,97		19,35

Tabelle 2: Tagesmittelwerte Abluft[51]

[51] Temperaturerfassung durch Datenlogger Abluftfuchs 1-4

Die Ergebnisse des Anderson Darling-Test und der statistischen Auswertung sind:

	Abluftfuchs 1	Abluftfuchs 2	Abluftfuchs 3	Abluftfuchs 4
Normalverteilt	JA	JA	JA	JA
Mittelwert	51,29	26,16	25,13	21,13
Varianz	55,78	1,60	0,83	0,94
σ	7,47	1,27	0,91	0,97
Oberer Wert	66,22	28,69	26,95	23,07
Unterer Wert	36,35	23,63	23,31	19,19
S	-1378	-1383	-329	-1379
p-wert	0,749	0,374	0,582	0,613

Tabelle 3: Statistische Auswertung Abluft[52]

Aufgrund der Ergebnisse der vier Anderson Darling-Tests kann man bei den erfassten Werten von einer Normalverteilung ausgehen. Daraus folgt, dass eine statistische Auswertung grundsätzlich möglich ist und eine weitere Auswertung der Daten über ein Box-Plot Diagramm nicht notwendig ist. Auch sind damit die berechneten Werte wissenschaftlich aussagekräftig und können für die folgenden Berechnungen in der Auswertung genutzt werden.

Vergleicht man die Mittelwerte der einzelnen Abluftfüchse miteinander fällt die große Mittelwertdifferenz zwischen Abluftfuchs 1 und Abluftfuchs 2 bis Abluftfuchs 4 auf. Dies ist auf die technische Nachverbrennung der Lühranlage zurückzuführen.

Für die Berechnungen der Auswertung wird als Temperaturwert jedes Abluftfuchses der jeweils untere Wert und oberer Wert ermittelt. Dieser Werte ergeben sich aus:

$$Unterer\ Wert = Mittelwert - 2 \times \sigma \tag{14}$$

$$Oberer\ Wert = Mittelwert + 2 \times \sigma \tag{15}$$

Aufgrund der vorliegenden Normalverteilung befindet sich ein tatsächlicher Temperaturwert mit mehr als 95% Wahrscheinlichkeit[53] zwischen diesen Temperaturwerten. Es ist also davon auszugehen, dass die im Abluftstrom enthaltene Wärmeenergie höher ist, als die Energiemenge bei dem unteren Wert und geringer als die Energiemenge bei dem oberen Wert. Ist der Ablufttemperaturwert also ausreichend

[52] Temperaturerfassung durch Datenlogger Abluftfuchs 1-4
[53] Prof. Dr. Rüdiger Erbrecht, et al., Das große Tafelwerk, 1. Auflage, Cornelsen, 2003, (S. 43)

hoch, das heißt über dem Wert der Außentemperatur so ist eine Energierückführung möglich und eine CO_2-Einsparung realisierbar.

Da alle vier Werte grade in den Wintermonaten über diesen Werten liegen kann bei sämtlichen Abluftfüchsen eine Energierückführung eingesetzt werden.

4.3.2 Verlauf Außentemperatur

Die Analyse der erfassten Außentemperaturwerte erfolgt nach der gleichen Vorgehensweise wie die Analyse der Ablufttemperaturwerte. Es wird also auch im ersten Schritt der Anderson Darling-Test genutzt um eine Normalverteilung der erfassten Messwerte zu beweisen. Ist dieser Beweis positiv, kann im zweiten Schritt die statistische Auswertung der Werte erfolgen. Diese werden, wie auch die Werte der Ablufttemperatur, in der anschließende Auswertung genutzt um eine CO_2-Einsparung zu berechnen.

Die Ergebnisse des Anderson Darling-Test und der statistischen Auswertung sind:

Monat	Mittel-wert	σ	Oberer Wert	Unterer Wert	Varianz	S	p-Wert	Normal-verteilt
Jan	5,37	2,66	10,69	0,05	7,07	-3859	0,751	JA
Feb	4,10	4,07	12,25	-4,05	16,59	-4244	0,604	JA
Mrz	6,70	3,56	13,81	-0,41	12,64	-8751	0,007	NEIN
Apr	12,09	3,70	19,49	4,69	13,69	-8195	0,009	NEIN
Mai	14,29	4,34	22,97	5,62	18,80	-8674	0,690	JA
Jun	19,10	3,25	25,60	12,59	10,58	-8138	0,322	JA
Jul	19,86	3,53	26,92	12,81	12,46	-8699	0,167	JA
Aug	20,79	3,18	27,16	14,43	10,13	-8693	0,232	JA
Sep	15,52	3,22	21,95	9,09	10,34	-8123	0,701	JA
Okt	12,36	3,06	18,48	6,25	9,35	-8297	0,921	JA
Nov	7,59	2,57	12,73	2,46	6,59	-4318	0,001	NEIN
Dez	4,96	2,45	9,86	0,06	6,00	-3762	0,075	JA

Tabelle 4: Ergebnis Anderson Darling-Test der Tagesmittelwerte Außen[54]

Das die Monate März, April und November keine Normalverteilung aufweisen müssen bei diesen weitere Analyse durchgeführt werden um Aufschluss über die Werteverteilung zur erhalten.

[54] Daten der Temperaturerfassung der Gebäudeleittechnik Volkswagen Werk Kassel

Analyse Temperaturen März

Zur weiteren Analyse der Temperaturwert des Monats März wurden die ermittelten Tagesmittelwerte zunächst mittels eines Box-Plots Diagramms auf Ausreißer-Werte geprüft.

Tagesmittelwerte in °C Monat März					
-4,55	4,32	5,8975	7,0725	8,415	10,6125
-2,83	4,505	5,9125	7,19	8,9375	10,6225
-2,1225	4,5125	5,995	7,33	9,095	10,625
-2,02	4,7175	5,9975	7,415	9,1075	10,6675
-1,7	4,7175	6,08	7,42	9,3675	10,81
-0,2875	4,7675	6,17	7,425	9,415	11,355
0,8825	4,7875	6,2275	7,4375	9,415	11,415
0,9375	4,935	6,3175	7,4825	9,7225	11,515
2,63	5,035	6,3875	7,56	9,7425	11,5475
2,7375	5,13	6,4575	7,655	9,845	11,6825
2,8575	5,1675	6,535	7,705	10,05	12,3125
3,3475	5,18	6,6075	7,7175	10,0975	12,88
3,84	5,2275	6,63	7,7925	10,12	13,345
3,96	5,5325	6,7775	8,01	10,195	
4,0825	5,605	6,815	8,145	10,305	
4,205	5,865	6,9725	8,1475	10,505	

Tabelle 5: Tagesmittelwerte März[55]

Nach Anwendung eines Box-Plot Diagramms konnten die niedrigsten vier Werte als Ausreißer-Werte identifiziert werden.

Monat	Anzahl Werte	Median	Erstes Quartil	Drittes Quartil	IQR	Untere Grenze	Obere Grenze
Mrz	93	6,815	4,861	9,415	4,554	-1,969	16,246

Tabelle 6: Ergebnis Box-Plot Diagramm Tagesmittelwerte März[56]

Nach Ausschluss dieser Werte konnte bei einem erneuten Anderson Darling-Test eine Normalverteilung festgestellt werden. Als Werte für März werden nun folgende Werte genutzt:

[55] Eigene Auswertung mit Daten der Temperaturerfassung der Gebäudeleittechnik Volkswagen Werk Kassel
[56] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 5

Angepasste Tagesmittelwerte in °C Monat März					
-1,7	4,7175	6,08	7,42	9,3675	10,81
-0,2875	4,7675	6,17	7,425	9,415	11,355
0,8825	4,7875	6,2275	7,4375	9,415	11,415
0,9375	4,935	6,3175	7,4825	9,7225	11,515
2,63	5,035	6,3875	7,56	9,7425	11,5475
2,7375	5,13	6,4575	7,655	9,845	11,6825
2,8575	5,1675	6,535	7,705	10,05	12,3125
3,3475	5,18	6,6075	7,7175	10,0975	12,88
3,84	5,2275	6,63	7,7925	10,12	13,345
3,96	5,5325	6,7775	8,01	10,195	
4,0825	5,605	6,815	8,145	10,305	
4,205	5,865	6,9725	8,1475	10,505	
4,32	5,8975	7,0725	8,415	10,6125	
4,505	5,9125	7,19	8,9375	10,6225	
4,5125	5,995	7,33	9,095	10,625	
4,7175	5,9975	7,415	9,1075	10,6675	

Tabelle 7: Angepasste Tagesmittelwerte März[57]

Für die Auswertung ergeben sich folgende Werte:

Monat	Mittel-wert	σ	Oberer Wert	Unterer Wert	Varianz	S	p-Wert	Normal-verteilt
März	7,13	2,97	13,07	1,19	8,81	-7955	0,388	JA

Tabelle 8: Ergebnis Anderson Darling-Test der angepassten Tagesmittelwerte März[58]

Aufgrund der vorliegenden Normalverteilung liegt ein möglicher Außentemperaturwert im März mit mehr als 95% Wahrscheinlichkeit zwischen 1,19°C und 13,07°C. Aufgrund der ausgeschlossenen Ausreißer-Werte ändert sich der angenommene Mittelwert für März auf 7,13°C.

[57] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 5
[58] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 7

Analyse Temperaturen April

Zur weiteren Analyse der Temperaturwert des Monats April wurden die ermittelten Tagesmittelwerte zunächst mittels eines Box-Plots Diagramms auf Ausreißer-Werte geprüft.

Tagesmittelwerte in °C Monat April					
3,25	8,4175	10,455	12,9925	13,8225	15,4
3,9725	8,5375	11,175	13,0025	13,945	15,5175
4,265	8,575	11,4875	13,0525	13,98	15,92
4,5575	8,7575	11,5875	13,1	14,0425	15,9325
5,6075	8,955	12,065	13,125	14,1775	16,0675
5,7775	9,18	12,185	13,165	14,47	16,3
5,8025	9,245	12,1975	13,555	14,495	16,5675
5,9725	9,45	12,235	13,565	14,53	16,695
6,12	9,55	12,25	13,6425	14,6125	16,9075
7,07	9,635	12,4675	13,665	14,895	17,5325
7,0975	10,0375	12,5875	13,6875	15,0325	17,7875
7,29	10,0625	12,6025	13,6875	15,105	18,1225
7,415	10,075	12,7975	13,6875	15,275	18,4875
7,51	10,1125	12,8075	13,81	15,3375	18,7525
8,0625	10,1725	12,98	13,82	15,3475	18,9125

Tabelle 9: Tagesmittelwerte April[59]

Bei der Anwendung eine Box-Plot Diagramms konnten keine Ausreißer-Werte festgellt werden.

Monat	Anzahl Werte	Median	Erstes Quartil	Drittes Quartil	IQR	Untere Grenze	Obere Grenze
Apr	90	12,986	9,348	14,571	5,224	1,512	22,407

Tabelle 10: Ergebnis Box-Plot Diagramm Tagesmittelwerte April[60]

Da mit dem Box-Plot Diagramm keine Ausreißer-Werte ermittelt werden konnten, werden im nächsten Schritt die Hälfte der niedrigeren Werte und die Hälfte der höheren Werte auf Normalverteilung geprüft. Ziel ist es, Schlüsse über die Werteverteilung ziehen zu können.

[59] Eigene Auswertung mit Daten der Temperaturerfassung der Gebäudeleittechnik Volkswagen Werk Kassel

[60] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 9

Tagesmittelwerte in °C Monat April (tiefe Werte)				
3,25	7,07	8,7575	10,075	12,1975
3,9725	7,0975	8,955	10,1125	12,235
4,265	7,29	9,18	10,1725	12,25
4,5575	7,415	9,245	10,455	12,4675
5,6075	7,51	9,45	11,175	12,5875
5,7775	8,0625	9,55	11,4875	12,6025
5,8025	8,4175	9,635	11,5875	12,7975
5,9725	8,5375	10,0375	12,065	12,8075
6,12	8,575	10,0625	12,185	12,98

Tabelle 11: Tagesmittelwerte April (tiefe Hälfte)[61]

Tagesmittelwerte in °C Monat April (hohe Werte)				
12,9925	13,665	14,0425	15,275	16,5675
13,0025	13,6875	14,1775	15,3375	16,695
13,0525	13,6875	14,47	15,3475	16,9075
13,1	13,6875	14,495	15,4	17,5325
13,125	13,81	14,53	15,5175	17,7875
13,165	13,82	14,6125	15,92	18,1225
13,555	13,8225	14,895	15,9325	18,4875
13,565	13,945	15,0325	16,0675	18,7525
13,6425	13,98	15,105	16,3	18,9125

Tabelle 12: Tagesmittelwerte April (hohe Hälfte)[62]

Nach Anwendung des Anderson Darling-Test auf die tiefere und höhere Wertehälfte der Tagesmittelwerte konnten folgende Ergebnisse ermittelt werden:

Monat	Mittel-wert	σ	Oberer Wert	Unterer Wert	Varianz	S	p-Wert	Normal -verteilt
April tief	9,16	2,72	14,61	3,72	7,40	-2053	0,104	JA
April hoch	15,01	1,68	18,37	11,66	2,82	-2086	0,001	NEIN

Tabelle 13: Ergebnis Anderson Darling-Test geteilte Werte April[63]

Da bei der Hälfte der höheren Werte keine Normalverteilung vorliegt, werden dort erneut die Werte in eine höhere und eine tiefere Hälfte geteilt. Der das aus den erneuten Anderson Darling-Tests resultierende Ergebnis ist aufgrund der jeweiligen Wertemenge statistisch aussagekräftig.

[61] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 9
[62] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 9
[63] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 12

Tagesmittelwerte in °C Monat April (hohe Werte)				
12,9925	13,165	13,6875	13,8225	14,47
13,0025	13,555	13,6875	13,945	14,495
13,0525	13,565	13,6875	13,98	
13,1	13,6425	13,81	14,0425	
13,125	13,665	13,82	14,1775	

Tabelle 14: Tagesmittelwerte April (tiefe Hälfte-2)[64]

Tagesmittelwerte in °C Monat April (hohe Werte)				
14,53	15,275	15,92	16,695	18,4875
14,6125	15,3375	15,9325	16,9075	18,7525
14,895	15,3475	16,0675	17,5325	18,9125
15,0325	15,4	16,3	17,7875	
15,105	15,5175	16,5675	18,1225	

Tabelle 15: Tagesmittelwerte April (hohe Hälfte-2)[65]

Nach Anwendung des Anderson Darling-Test konnten folgende Ergebnisse ermittelt werden:

Monat	Mittel-wert	σ	Oberer Wert	Unterer Wert	Varianz	S	p-Wert	Normal -verteilt
April tief-2	13,66	0,44	14,56	12,77	0,20	-495	0,183	JA
April hoch-2	16,31	1,36	18,91	13,46	1,86	-545	0,059	JA

Tabelle 16: Ergebnis Anderson Darling-Test geteilte Werte April-2[66]

Aufgrund der vorliegenden Normalverteilungen liegt ein möglicher Außentemperaturwert im April mit mehr als 95% Wahrscheinlichkeit zwischen 3,72°C und 18,91°C. Da sich keine Ausreißer-Werte ausschließen ließen, liegt der Mittelwert für April weiterhin bei 12,09°C.

[64] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 12
[65] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 12
[66] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 14 und 15

Analyse Temperaturen November

Zur weiteren Analyse der Temperaturwert des Monats November wurden die ermittelten Tagesmittelwerte zunächst mittels eines Box-Plots Diagramms auf Ausreißer-Werte geprüft.

Tagesmittelwerte in °C Monat November					
3,4675	5,13	5,775	7,155	8,95	10,785
3,81	5,14	5,825	7,6075	8,985	10,9675
4,0575	5,145	5,9225	7,7775	9,0975	11,0625
4,2375	5,31	6,02	7,95	9,245	11,4675
4,3225	5,325	6,265	8,6475	9,4525	11,83
4,4975	5,47	6,41	8,7075	9,6975	11,945
4,6925	5,5	6,4225	8,83	9,805	12,26
4,8725	5,52	6,51	8,84	9,8675	12,37
4,95	5,56	6,6575	8,88	10,145	12,43
4,96	5,5675	6,7075	8,9	10,195	12,48
5,1175	5,69	6,9225	8,9025	10,6375	

Tabelle 17: Tagesmittelwerte November[67]

Bei der Anwendung eine Box-Plot Diagramms konnten keine Ausreißer-Werte festgellt werden.

Monat	Anzahl Werte	Median	Erstes Quartil	Drittes Quartil	IQR	Untere Grenze	Obere Grenze
Apr	65	6,923	5,398	9,575	4,178	0,656	13,189

Tabelle 18: Ergebnis Box-Plot Diagramm Tagesmittelwerte November[68]

Da mit dem Box-Plot Diagramm keine Ausreißer-Werte ermittelt werden konnten, werden im nächsten Schritt die Hälfte der niedrigeren Werte und die Hälfte der höheren Werte auf Normalverteilung geprüft. Ziel ist es, Schlüsse über die Werteverteilung ziehen zu können.

Tagesmittelwerte in °C Monat November (tiefe Werte)					
3,4675	4,6925	5,14	5,52	5,9225	6,6575
3,81	4,8725	5,145	5,56	6,02	6,7075
4,0575	4,95	5,31	5,5675	6,265	6,9225
4,2375	4,96	5,325	5,69	6,41	
4,3225	5,1175	5,47	5,775	6,4225	
4,4975	5,13	5,5	5,825	6,51	

Tabelle 19: Tagesmittelwerte November (tiefe Hälfte)[69]

[67] Eigene Auswertung mit Daten der Temperaturerfassung der Gebäudeleittechnik Volkswagen Werk Kassel
[68] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 17

Tagesmittelwerte in °C Monat November (hohe Werte)					
7,155	8,83	8,985	9,8675	11,0625	12,43
7,6075	8,84	9,0975	10,145	11,4675	12,48
7,7775	8,88	9,245	10,195	11,83	
7,95	8,9	9,4525	10,6375	11,945	
8,6475	8,9025	9,6975	10,785	12,26	
8,7075	8,95	9,805	10,9675	12,37	

Tabelle 20: Tagesmittelwerte November (hohe Hälfte)[70]

Nach Anwendung des Anderson Darling-Test auf die tiefere und höhere Wertehälfte der Tagesmittelwerte konnten folgende Ergebnisse ermittelt werden:

Monat	Mittel-wert	σ	Oberer Wert	Unterer Wert	Varianz	S	p-Wert	Normal -verteilt
Nov tief	5,39	0,86	7,11	3,67	0,74	-1095	0,906	JA
Nov hoch	9,87	1,52	12,91	6,83	2,31	-1045	0,078	JA

Tabelle 21: Ergebnis Anderson Darling-Test geteilte Werte November[71]

Aufgrund der vorliegenden Normalverteilung liegt ein möglicher Temperaturwert im November mit mehr als 95% Wahrscheinlichkeit zwischen 3,67°C und 12,91°C. Da sich keine Ausreißer-Werte ausschließen ließen, liegt der Mittelwert für November weiterhin bei 7,59°C.

[69] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 17
[70] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 17
[71] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 19 und 20

5. Auswertung

Ziel der Auswertung ist die Berechnung der möglichen CO_2-Einsparung durch ein Wärmerückführungssystem. Dazu wird zuerst, ausgehend von den Ergebnissen der Analyse, das geeignete System ermittelt. Anschließend wird auf Grundlage des gewählten Systems die mögliche CO_2-Einsparung ermittelt.

5.1 Auswahl Wärmerückgewinnungssystem

Ausgehend von den Ergebnissen der Analyse ist nur das Kreislaufverbundsystem in der Lage den gegebenen Bedingungen zu entsprechen. Daher wird das Kreislaufverbundsystem als Wärmerückführungssystem ausgewählt.

Da eine vollständige Energierückführung technisch nicht möglich ist, ist die Wärmerückzahl festzustellen und bei der Berechnung einzubeziehen. Die Wärmerückzahl[72] eines Kreislaufverbundsystems kann mit $\Phi_t = 0{,}8$ angenommen werden.

5.2 Berechnung der Temperaturdifferenzen

Für die Berechnung wird Formel (5) (s. Kapitel 2.4.2 CO_2-Emissionsfaktoren) angewandt. Zur Berechnung der notwendigen Temperaturdifferenz ΔT_K muss zwischen 3 Fällen unterschieden werden:

1. Der Außentemperaturwert ist größer als der geforderte Zulufttemperaturwert. Dann wird $\Delta T_K = 0$ angenommen und es ist keine Energierückführung möglich.
2. Die Differenz des Außentemperaturwerts zum geforderten Zulufttemperaturwert $\Delta T_{K-Außen}$ ist kleiner als die Differenz des Ablufttemperaturwerts zum geforderten Zulufttemperaturwert $\Delta T_{K-Abluft}$. In diesem Fall wird $\Delta T_{K-Außen}$ als Wert für ΔT_K angenommen.
3. Die Differenz des Außentemperaturwerts zum geforderten Zulufttemperaturwert $\Delta T_{K-Außen}$ ist größer als die Differenz des Ablufttemperaturwerts zum geforderten Zulufttemperaturwert $\Delta T_{K-Abluft}$. Angenommen wird in diesem Fall:

[72] https://www.baunetzwissen.de/gebaeudetechnik/fachwissen/lueftung/waermerueckgewinnung-in-lueftungsanlagen-2468659 (29.11.2020)

$$\Delta T_K = (\Delta T_{K-Abluft} + \Delta T_{K-Außen}) \div 2 \quad (16)$$

Die Temperaturdifferenz $\Delta T_{K-Außen}$ ergibt sich aus der Differenz des Außenlufttemperaturwerts und dem geforderten Zulufttemperaturwert von 17°C. Die Temperaturdifferenz $\Delta T_{K-Abluft}$ ergibt sich aus der Differenz zwischen Ablufttemperaturwert und geforderter Zulufttemperaturwert.

In der Analyse wurden Monatsabhängig folgende Mittelwerte, obere und untere Werte für die Außentemperatur berechnet:

Monat	Mittelwert in °C	Oberer Wert in °C	Unterer Wert in °C
Jan	5,37	10,69	0,05
Feb	4,10	12,25	-4,05
Mrz	7,13	13,07	1,19
Apr	12,09	18,91	3,72
Mai	14,29	22,97	5,62
Jun	19,10	25,60	12,59
Jul	19,86	26,92	12,81
Aug	20,79	27,16	14,43
Sep	15,52	21,95	9,09
Okt	12,36	18,48	6,25
Nov	7,59	12,91	3,67
Dez	4,96	9,86	0,06

Tabelle 22: Temperaturspektrum Außenluft[73]

Um das Spektrum der möglichen CO_2-Einsparung zu berechnen, werden die minimal mögliche Einsparung und die maximal mögliche Einsparung ermittelt. Dazu wird die größte und kleinste Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und dem geforderten Zulufttemperaturwert berechnet.

Monat	$\Delta T_{K-Außen-Mittel}$	$\Delta T_{K-Außen-Min}$	$\Delta T_{K-Außen-Max}$
Jan	11,63	6,31	16,95
Feb	12,90	4,75	21,05
Mrz	9,87	3,93	15,81
Apr	4,91	-1,91	13,28
Mai	2,71	-5,97	11,38
Jun	-2,10	-8,60	4,41
Jul	-2,86	-9,92	4,19
Aug	-3,79	-10,16	2,57
Sep	1,48	-4,95	7,91

[73] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 4, 8, 16 und 21

Okt	4,64	-1,48	10,75
Nov	9,41	4,09	13,33
Dez	12,04	7,14	16,94

Tabelle 23: Spektrum Temperaturdifferenzen Außenluft[74]

Bei negativen Werten für $\Delta T_{K-Außen}$ wird $\Delta T_K = 0$ angenommen, da die Außenlufttemperatur höher ist, als die geforderte Temperatur des Zuluftstroms und eine Wärmeenergierückführung nicht notwendig ist.

Zur Ermittlung der Temperaturdifferenzen $\Delta T_{K-Abluft}$ müssen zwei Möglichkeiten Berücksichtigt werden. Die erste Möglichkeit ist, dass jeder Abluftfuchs über ein eigenes Kreislaufverbundsystem verfügt und damit nur die benachbarten zwei Zuluftfüchse versorgt. Die zweite Möglichkeit ist der Einsatz eines gekoppelten Verbundsystems. Dabei würden alle vier Abluftfüchse Wärme in ein System einspeisen. Mit diesem könnten dann alle acht Zuluftfüchse erwärmt werden.

Neben der Betrachtung der zwei Möglichkeiten der Konzeption eines Kreislaufverbundsystems muss auch die Wärmerückzahl $\Phi_t = 0{,}8$ in der Berechnung berücksichtigt werden. Da die ermittelten Temperaturdifferenzen der einzige variable Faktor der zu ermittelnden Energiemenge sind, gilt für $\Delta T_{K-Abluft}$:

$$\Delta T_{K-Abluft} = \Delta T_{K-Abluft-100} \times \Phi_t \qquad (17)$$

Ausgehend von den ermittelten Ablufttemperaturen und unter Einbeziehung der Wärmerückzahl ergeben sich folgenden Temperaturdifferenzen:

Abluftfuchs	$\Delta T_{K-Abluft-Mittel}$	$\Delta T_{K-Abluft-Min}$	$\Delta T_{K-Abluft-Max}$
Abluftfuchs 1	24,03	12,08	35,98
Abluftfuchs 2	3,93	1,90	5,95
Abluftfuchs 3	3,10	1,65	4,56
Abluftfuchs 4	-0,10	-1,65	1,46
Gekoppelt	7,74	3,50	11,99

Tabelle 24: Spektrum Temperaturdifferenzen Abluft[75]

[74] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 22
[75] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 3

Bei negativen Werten liegt die berechnete Temperaturdifferenz, unter Berücksichtigung der Wärmerückzahl unter 17°C. Eine Energierückführung ist trotzdem möglich, solange $\Delta T_{K-Außen} > 0$ gilt. Angenommen wird dann Formel (16). Nachfolgend die ermittelten Temperaturdifferenzen $\Delta T_{K-Mittel}$, ΔT_{K-Min}und ΔT_{K-Max}.

Monat	Differenz	Abluft 1	Abluft 2	Abluft 3	Abluft 4	Gekoppelt
Januar	$\Delta T_{K-Mittel}$	11,63	7,78	7,37	5,77	9,69
	ΔT_{K-Min}	6,31	4,11	3,98	2,33	4,90
	ΔT_{K-Max}	16,95	11,45	10,76	9,20	14,47
Februar	$\Delta T_{K-Mittel}$	12,90	8,41	8,00	6,40	10,32
	ΔT_{K-Min}	4,75	3,33	3,20	1,55	4,12
	ΔT_{K-Max}	21,05	13,50	12,81	11,25	16,52
März	$\Delta T_{K-Mittel}$	9,87	6,90	6,49	4,89	8,81
	ΔT_{K-Min}	3,93	2,92	2,79	1,14	3,71
	ΔT_{K-Max}	15,81	10,88	10,19	8,63	13,90
April	$\Delta T_{K-Mittel}$	4,91	4,42	4,01	2,41	4,91
	ΔT_{K-Min}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ΔT_{K-Max}	13,28	9,62	8,92	7,37	12,63
Mai	$\Delta T_{K-Mittel}$	2,71	2,71	2,71	1,31	2,71
	ΔT_{K-Min}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ΔT_{K-Max}	11,38	8,67	7,97	6,42	11,38
Juni	$\Delta T_{K-Mittel}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ΔT_{K-Min}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ΔT_{K-Max}	4,41	4,41	4,41	2,93	4,41
Juli	$\Delta T_{K-Mittel}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ΔT_{K-Min}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ΔT_{K-Max}	4,19	4,19	4,19	2,82	4,19
August	$\Delta T_{K-Mittel}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ΔT_{K-Min}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ΔT_{K-Max}	2,57	2,57	2,57	2,01	2,57
September	$\Delta T_{K-Mittel}$	1,48	1,48	1,48	0,69	1,48
	ΔT_{K-Min}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ΔT_{K-Max}	7,91	6,93	6,24	4,68	9,95
Oktober	$\Delta T_{K-Mittel}$	4,64	4,28	3,87	2,27	4,64
	ΔT_{K-Min}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ΔT_{K-Max}	10,75	8,35	7,66	6,10	10,75

November	$\Delta T_{K-Mittel}$	9,41	6,67	6,26	4,66	8,58
	ΔT_{K-Min}	4,09	3,00	2,87	1,22	3,79
	ΔT_{K-Max}	13,33	9,64	8,95	7,39	12,66
Dezember	$\Delta T_{K-Mittel}$	12,04	7,98	7,57	5,97	9,89
	ΔT_{K-Min}	7,14	4,52	4,39	2,75	5,32
	ΔT_{K-Max}	16,94	11,45	10,75	9,20	14,46

Tabelle 25: Temperaturdifferenzen Gesamt[76]

Zum direkten Vergleich mit einer gekoppelten Version eines Kreislaufverbundsystems wurde die jeweilige Summe der Temperaturdifferenzen der vier Abluftfüchse durch vier geteilt. Dies geschieht unter der Annahme, dass durch jeden Abluftfuchs das gleiche Luftvolumen gefördert wird.

5.2.1 Auslegung der Pumpe

Ausgehend von den ermittelten Maximalen Temperaturdifferenzen ΔT_{K-Max} kann die notwendige Pumpleistung ermittelt werden. Diese ist notwendig um die richtige Pumpe festzulegen. Damit kann in der anschließenden Berechnung der CO_2-Einsparung die zum Betrieb notwendige elektrische Leistung Q_{el} bestimmt werden.

Durch Nutzung der Formel (2) (s. Kapitel 2.4.1 Wärmekapazität) kann die Zu übertragende Wärmeenergie berechnet werden und das dafür notwendige Volumenstrom ermittelt werden. Formel (2) lauftet:

$$Q_L = c_p \times \rho \times V_{m^3} \times \Delta T_K \text{ in kJ} \qquad (2)$$

Für ΔT_K wird $\Delta T_{K-Max\,(Februar-Abluft\,1)} = 21{,}05$ (vgl. Tabelle 25) genutzt. Diese ΔT_K wird genutzt, da es den größten Wert hat. Mit dem damit ermittelten Volumenstrom lassen sich alle anderen Temperaturdifferenzen abdecken.

[76] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 23 und 24

Ausgehend von $c_{p\,Luft} = 1{,}005 \frac{kJ}{kg \times K}$, $\rho_{Luft} = 1{,}293\ \frac{kg}{m^3}$ und $V_{Luft} = 1.000.000\ m^3$ (vgl. Kapitel 2.4.1 Wärmekapazität) ergibt sich eine stündlich zu übertragenden Energiemenge von:

$$Q_L = 27.353.738{,}25\ kJ$$

Durch Umformen der Formel (2) nach V ergibt sich Formel (2.1):

$$V = \frac{Q_L}{c_p \times \rho \times \Delta T_K} \tag{2.1}$$

Angenommen werden:

- $\rho_{Wasser} = 1.000 \frac{kg}{m^3}$ [77]
- $c_{p\,Wasser} = 4{,}18 \frac{kJ}{kg \times K}$ [78].

Daraus ergibt sich ein maximaler Volumenstrom von $V_{m^3} = 310{,}877$ pro Stunde.

Bei einem gekoppelten Kreislaufverbundsystem kann eine Pumpe zur Förderung des Wassers eingesetzt werden. Um dieses Volumen fördern zu können wird eine Etanorm 150-200 Pumpe der Firma KSB[79] mit einem Motor der Baugröße 160M gewählt. Diese Pumpe ist in der Lage den geforderten Volumenstrom zu fördern. Die aufgenommene elektrische Leistung P beträgt 11,0 kW.

Bei einem nicht gekoppelten Kreislaufverbundsystem werden vier Pumpen mit einem Fördervolumen von 77,72 $\frac{m^3}{h}$ benötigt. Gewählt wurden dafür Etanorm 80-160 Pumpen der Firma KSB[80] mit einem Motor der Baugröße 100L. Diese Pumpen sind in der Lage den geforderten Volumenstrom zu fördern. Die aufgenommene elektrische Leistung P beträgt pro Pumpe 3,0 kW.

---

[77] Gomeringer, et al., Tabellenbuch Metall, 47. Auflage, Europa Lehrmittel, 2017, (S.121)
[78] Gomeringer, et al., Tabellenbuch Metall, 47. Auflage, Europa Lehrmittel, 2017, (S.121)
[79] https://shop.ksb.com/ims_docs/00/005056B602221ED58FF353784C59F3E0.pdf (05.12.2020)
[80] https://shop.ksb.com/ims_docs/00/005056B602221ED58FF353784C59F3E0.pdf (05.12.2020)

5.3 Berechnung der CO_2-Einsparung

Für die Berechnung der Einsparung wird Formel (5) (s. Kapitel 2.4.2 CO_2-Emissionsfaktoren) genutzt.

$$Einsp._{CO_2} = \frac{1{,}005\frac{kJ}{kg \times K} \times 1{,}293\frac{kg}{m^3} \times V_{m^3} \times \Delta T_K}{3{,}6 \times 10^6} \times 0{,}3671\frac{tCO_2}{MWh} - Q_{el} \times 0{,}7220\frac{tCO_2}{MWh} \quad (5)$$

Als gefördertes Luftvolumen V_{m^3} wird 1.000.000 m³/h ausgegangen. Zur Berücksichtigung von Stillständen und Wartungsarbeiten wird mit 28 Tagen bzw. 672 Stunden pro Monat gerechnet. Damit beträgt das monatlich zu fördernde Volumen:

$$V_{m^3-Monat} = 1.000.000\frac{m^3}{h} \times 24h \times 28d = 672{,}0 \times 10^6 m^3.$$

Zur Berechnung von Q_{el} wird die ermittelte aufgenommene elektrische Leistung zum Betrieb der Pumpe mit den Betriebsstunden multipliziert.

Für das gekoppelte Kreislaufverbundsystem wird eine aufgenommene Leistung von $P = 11{,}0$ kW angenommen. Die Betriebsstunden pro Monat betragen 672 Stunden. Damit ist $Q_{el\,-Gekoppelt} = 7{,}392\ MWh$.

Für das nicht gekoppelte Kreislaufverbundsystem wird eine aufgenommene Leistung von $P = 3{,}0$ kW pro Pumpe angenommen. Die Betriebsstunden pro Monat betragen 672 Stunden. Damit beträgt $Q_{el\,-Ungekoppelt} = 2{,}016\ MWh$ je eingesetzter Pumpe und Betriebsmonat bzw. $Q_{el\,-Ungekoppelt-Gesamt} = 8{,}064\ MWh$ für alle vier Pumpen.

Ist bei hohen Außenlufttemperaturen keine Wärmerückführung notwendig, ist auch kein Betrieb einer Pumpe notwendig. Daher wird für die Monate ohne Wärmerückführung $Q_{el} = 0$ angenommen.

Die ermittelten CO_2-Einsparungen betragen:

Monat	Differenz	Abluft 1	Abluft 2	Abluft 3	Abluft 4	Gekoppelt
Januar	Mittel	257,45	171,72	162,54	126,93	856,80
	Min	139,01	89,97	87,12	50,44	430,89
	Max	375,88	253,46	237,97	203,42	1282,61
Februar	Mittel	285,72	185,85	176,68	141,06	913,34
	Min	104,29	72,61	69,76	33,07	361,43
	Max	467,15	299,10	283,60	249,05	1465,16
März	Mittel	218,27	152,13	142,95	107,34	778,43
	Min	86,03	63,48	60,63	23,94	324,92
	Max	350,50	240,77	225,28	190,73	1231,86

April	Mittel	107,85	96,92	87,75	52,13	431,51
	Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Max	294,18	212,61	197,12	162,57	1119,21
Mai	Mittel	58,87	58,87	58,87	27,64	235,61
	Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Max	251,88	191,46	175,97	141,42	1007,64
Juni	Mittel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Max	96,72	96,72	96,72	63,84	386,99
Juli	Mittel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Max	91,82	91,82	91,82	61,39	367,40
August	Mittel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Max	55,76	55,76	55,76	43,36	223,14
September	Mittel	31,49	31,49	31,49	13,95	126,08
	Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Max	174,63	152,84	137,34	102,79	880,13
Oktober	Mittel	101,84	93,91	84,74	49,12	407,47
	Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Max	237,86	184,45	168,96	134,41	951,54
November	Mittel	208,03	147,01	137,83	102,22	757,95
	Min	89,59	65,26	62,41	25,73	332,05
	Max	295,29	213,17	197,67	163,12	1121,44
Dezember	Mittel	266,57	176,28	167,11	131,49	875,05
	Min	157,49	99,21	96,36	59,67	467,84
	Max	375,65	253,35	237,86	203,31	1282,17
Summe	Mittel	1536,08	1114,18	1049,97	751,87	5382,24
	Min	576,42	390,53	376,29	192,85	1917,13
	Max	3067,31	2245,51	2106,06	1719,40	11319,29
Vergleich	Mittel	4452,10				5382,24
	Min	1536,09				1917,13
	Max	9138,28				11319,29

Tabelle 26: CO_2-Einsparung in Tonnen[81]

[81] Eigene Auswertung mit Daten aus Tabelle 25

6. Schlussfolgerungen

Ziel dieses Kapitels ist es, aus den Ergebnissen der Analyse und der Auswertung die sich ergebenden Schlüsse zu ziehen. Im Anschluss an die Schlussfolgerungen werden diese im Rahmen der kritischen Reflexion nochmal analysiert und es werden gegebenenfalls Schwächen der Analyse bzw. der Auswertung herausgestellt.

6.1 Betrachtung der Ergebnisse

In ersten Teil der Analyse wurden verschiedene Energierückführungssysteme ausgewertet. Betrachtet wurden die Systeme:

- Plattenwärmetauscher
- Wärmerohr
- Rotationswärmetauscher
- Umschaltspeicher
- Kreislaufverbundsystem

Vorgaben die erfüllt werden mussten, waren unter anderem die gegebene räumliche Trennung der Luftkanäle, das Unterbinden der Kontamination der Zuluft durch Abluftleckage oder die Forderungen des Brandschutzes. Ausgehend von den gesetzten Vorgaben ist nur der Einsatz eines Kreislaufverbundsystems für den Einsatz im Belüftungssystem der Gießerei geeignet. (s. Kapitel 4.2.1 bis Kapitel 4.2.5)

Im zweiten Teil der Analyse wurden die erfassten Temperaturwerte der Abluft und der Außenluft ausgewertet. Es konnte sowohl mit den erfassten Werten der Abluft, als auch der Außenluft eine Normalverteilung nachgewiesen werden, was eine statistische Auswertung ermöglicht. (s. Kapitel 4.3.1 bis Kapitel 4.3.2.3) Anschließend wurde mit Einsatz der zweifachen Standartabweichung die, mit mehr als 95% Wahrscheinlichkeit, minimalen und maximalen Temperaturwerte berechnet.

Mit diesen Temperaturwerten konnten in der anschließenden Auswertung die mittleren, minimalen und maximal zu erwartenden Temperaturdifferenzen zwischen Abluft und Außenluft ermittelt werden. (s. Kapitel 5.2)

Durch Verwendung dieser Temperaturdifferenzen wurde es ermöglicht, die möglichen CO_2-Einsparungen zu berechnen. Maßgeblich dabei war auch das im ersten Teil der

Analyse ermittelte Energierückführungssystem. Durch diese Auswahl wurden die einzubeziehende Wärmerückzahl und der zusätzliche Energieaufwand zum Betrieb des gewählten Systems festgelegt. Betrachtet wurden daher ein über alle vier Abluftkanäle gekoppeltes Kreislaufverbundsystem und ein nicht gekoppeltes System. Als Pumpen zum Transport des Wärmeträgers, in diesem Fall Wasser, wurden Pumpen der Firma KSB ausgewählt. Gewählt wurde für das gekoppelte System eine Pumpe des Typs Etanorm 150-200 mit einem Motor der Baugröße 160M, für das nicht gekoppelte System vier Pumpen des Typs Etanorm 80-160 mit einem Motor der Baugröße 100L.

Aufgrund der in der Temperaturauswertung eingesetzten zweifachen Standartabweichung liegt die mögliche CO_2-Einsparung bei Einbau eines nicht gekoppelten Kreislaufverbundsystems mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 97% über 1.536,09 Tonnen CO_2 pro Jahr und mit einer ebenso hohen Wahrscheinlichkeit unter 9.138,28 Tonnen CO_2 pro Jahr. Es kann erwartet werden, dass aufgrund der nachgewiesenen Normalverteilung der Temperaturwerte die mögliche Einsparung in Richtung des Mittelwerts von 4.452,10 Tonnen CO_2-Einsparung pro Jahr tendiert.

Bei Einbau von einem gekoppelten Kreislaufverbundsystem liegt die mögliche CO_2-Einsparung mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 97% über 1.917,13 Tonnen CO_2 pro Jahr und mit einer ebenso hohen Wahrscheinlichkeit unter 11.319,29 Tonnen CO_2 pro Jahr. Es kann erwartet werden, dass aufgrund der nachgewiesenen Normalverteilung der Temperaturwerte die mögliche Einsparung in Richtung des Mittelwerts von 5.382,24 Tonnen CO_2-Einsparung pro Jahr tendiert.

Nach Betrachtung der zu erwartenden CO_2-Einsparungen ist es zu empfehlen, ein gekoppeltes Kreislaufverbundsystem als System zur Wärmerückführung in das Belüftungssystem der Gießerei des Volkswagens Werk Kassel zu integrieren.

6.2 Kritische Reflexion

Ziel der Reflexion ist die Prüfung der genutzten Verfahren und Daten auf Aussagefähigkeit und die Festlegung des Gültigkeitsbereichs der getroffenen Aussagen. Betrachtet werden die Erfassung, Analyse und Auswertung der Temperaturwerte, die Auslegung der Pumpe und die Berechnung der möglichen CO_2-Einsparung.

Die Ablufttemperaturen wurden über einen Zeitraum von 30 Tagen erfasst. Ein größerer Zeitraum wäre für die Aussagekraft der Daten zwar besser gewesen, aufgrund der nachgewiesenen Normalverteilung und des gewählten Abweichungsspektrums, der zweifachen Standartabweichung, können die genutzten Daten als aussagefähig gesehen werden, da mit mehr als 95% Wahrscheinlichkeit ein Temperaturwert innerhalb des ausgewerteten Bereichs liegt.

Bei den Außenlufttemperaturen wurden die Werte eines Zeitraums von drei Jahren ausgewertet. Für eine allgemein gültige Aussage über den zu erwartenden Temperaturverlauf ist dieser Erfassungszeitraum sehr klein und die Aussagekraft nur bedingt gegeben. Vergleicht man die berechneten Monatsmittelwerte mit den Mittelwerten einer Klimadatenerfassung zwischen 1982 und 2012[82] sind deutliche Abweichungen erkennbar.

	Max. Temperatur (°C)	ø. Temperatur (°C)	Min. Temperatur (°C)	Niederschlag (mm)
Januar	2.3	0	-2.2	52
Februar	3.8	1.1	-1.6	43
März	8.2	4.3	0.5	46
April	13.3	8.6	3.9	49
Mai	18	12.7	7.5	66
Juni	21.1	15.9	10.8	76
Juli	22.6	17.6	12.6	73
August	22.4	17.3	12.3	67
September	19.1	14.3	9.6	56
Oktober	13.7	9.9	6.1	54
November	7	4.5	2.1	55
Dezember	3.7	1.5	-0.6	63

Abb. 24: Klimatabelle Baunatal[83]

[82] https://de.climate-data.org/info/sources/ (09.12.2020)
[83] https://de.climate-data.org/europa/deutschland/hessen/baunatal-21412/ (06.12.2020)

Da diese Werte aber, im Vergleich zu langfristig erfassten und ausgewerteten monatlichen Temperaturmittelwerten von Baunatal, ein größeres Spektrum abbilden sind diese Daten im Rahmen der Thesis dennoch nutzbar und die daraus entstandenen Ergebnisse besitzen eine belegbare Aussagekraft.

Die Anzahl der erfassten Werte war für eine statistische Auswertung ausreichend groß, daher ist auch dort eine Aussagekraft gegeben.

Da bei der Berechnung der durch Energierückführung möglichen CO_2-Einsparung auf das vorher berechnete Temperaturspektrum zurückgegriffen wurde, liegen die dort berechneten Werte mit mehr als 95% Wahrscheinlichkeit im berechneten Bereich.

Positiven Einfluss auf die Einsparung kann allerdings durch der Einsatz von Förderpumpen eines anderen Typs genommen werden. Dies erfordert allerdings ein vollständig konstruiertes System, was nicht Teil dieser Thesis ist. Die angenommen Werte der elektrischen Leistungsaufnahme sind daher als Richtwerte anzusehen. Mit Hinblick auf die Leistungsfähigkeit der gewählten Pumpen ist von eine geringen Leistungsaufnahme auszugehen, die sich positiv auf die CO_2-Einsparung auswirkt.

Insgesamt sind die genutzten Daten und berechneten Ergebnisse ausreichend aussagefähig und es ist davon auszugehen, dass sich eine mögliche CO_2-Einsparung in dem angegebenen Bereich befindet.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Einbau einer Energierückführungsanlage in das Belüftungssystem sinnvoll ist und zu erheblichen CO_2-Einsparungen führen kann. Unter Berücksichtigung der Vorgaben, besonders der baulichen Rahmenbedingungen eignet sich nur ein Kreislaufverbundsystem als System zur Energierückführung in der Gießerei des Volkswagen Werks Kassel. Bei Einbau eines nicht gekoppelten Kreislaufverbundsystems ließen sich pro Jahr zwischen 1.536,09 Tonnen und 9.138,28 Tonnen CO_2 einsparen. Der Wert würde wahrscheinlich in Richtung 4.452,10 Tonnen CO_2-Einsparung pro Jahr tendieren. Bei Einbau eines gekoppelten Kreislaufverbundsystems ließen sich pro Jahr zwischen 1.917,13 Tonnen und 11.319,29 Tonnen CO_2 einsparen, mit einer Tendenz zu 5.382,24 Tonnen CO_2-Einsparung pro Jahr.

Bei einer Umsetzung eines gekoppelten Kreislaufverbundsystems ließe sich die CO_2-Einsparung noch erhöhen, wenn die Temperaturen der Abluft höher wären. Grade im Abluftfuchs 1 konnten starke Temperaturschwankungen aufgezeichnet werden. Dies lässt sich auf die dort vorgeschaltete technische Nachverbrennungsanlage zurückführen. Es wäre zu prüfen, ob dort die Möglichkeit besteht, mehr Abwärme durch den Abluftfuchs zu leiten, bzw. direkt an der Anlage Wärmeenergie zurückzuführen.

8. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Volkswagen Werk Kassel 10
Abb. 2: Gasbrenner CX200 14
Abb. 3: Rekumat „S“ Spaltstrombrenner 15
Abb. 4: Schema einer Lufttechnischen Anlage mit Wärmerückgewinnung 17
Abb. 5: Schema Plattenwärmetauscher 18
Abb. 6: Schema Wärmerohr 20
Abb. 7: Schema Rotationswärmetauscher 21
Abb. 8: Umschaltspeicher Stellung 1 22
Abb. 9: Umschaltspeicher Stellung 2 22
Abb. 10: Schema Kreislaufverbundsystem 23
Abb. 11: Emissionsfaktoren CO_2 26
Abb. 12: Schema Abluftsystem der Halle 5 31
Abb. 13: Datenlogger 175-T2 Fa. Testo 34
Abb. 14: Temperaturverlauf 2017 35
Abb. 15: Temperaturverlauf 2018 35
Abb. 16: Temperaturverlauf 2019 36
Abb. 17: Temperaturverlauf 2020 36
Abb. 18: Temperaturverlauf Abluftfuchs 1 37
Abb. 19: Temperaturverlauf Abluftfuchs 2 37
Abb. 20: Temperaturverlauf Abluftfuchs 3 38
Abb. 21: Temperaturverlauf Abluftfuchs 4 38
Abb. 22: Mittelwertkennlinien Abluftfüchse 45
Abb. 23: Monatsmittelwerte Außentemperatur 46
Abb. 24: Klimatabelle Baunatal 67

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: CO2-Emissionsfaktoren 25
Tabelle 2: Tagesmittelwerte Abluft 47
Tabelle 3: Statistische Auswertung Abluft 48
Tabelle 4: Ergebnis Anderson Darling-Test der Tagesmittelwerte Außen 49
Tabelle 5: Tagesmittelwerte März 50
Tabelle 6: Ergebnis Box-Plot Diagramm Tagesmittelwerte März 50
Tabelle 7: Angepasste Tagesmittelwerte März 51
Tabelle 8: Ergebnis Anderson Darling-Test der angepassten Tagesmittelwerte März .. 51
Tabelle 9: Tagesmittelwerte April 52
Tabelle 10: Ergebnis Box-Plot Diagramm Tagesmittelwerte April 52
Tabelle 11: Tagesmittelwerte April (tiefe Hälfte) 53
Tabelle 12: Tagesmittelwerte April (hohe Hälfte) 53
Tabelle 13: Ergebnis Anderson Darling-Test geteilte Werte April 53
Tabelle 14: Tagesmittelwerte April (tiefe Hälfte-2) 54
Tabelle 15: Tagesmittelwerte April (hohe Hälfte-2) 54
Tabelle 16: Ergebnis Anderson Darling-Test geteilte Werte April-2 54
Tabelle 17: Tagesmittelwerte November 55
Tabelle 18: Ergebnis Box-Plot Diagramm Tagesmittelwerte November 55
Tabelle 19: Tagesmittelwerte November (tiefe Hälfte) 55
Tabelle 20: Tagesmittelwerte November (hohe Hälfte) 56
Tabelle 21: Ergebnis Anderson Darling-Test geteilte Werte November 56
Tabelle 22: Temperaturspektrum Außenluft 58
Tabelle 23: Spektrum Temperaturdifferenzen Außenluft 59
Tabelle 24: Spektrum Temperaturdifferenzen Abluft 59
Tabelle 25: Temperaturdifferenzen Gesamt 61
Tabelle 26: CO_2-Einsparung in Tonnen 64
Tabelle 27: Abluftmittelwerte 74
Tabelle 28: Außentemperaturmittelwerte 82

10. Literaturverzeichnis

1) VW Intranet, VW Kraftwerk GmbH, Emissionsfaktoren CO_2, (15.11.2020)
2) VW Intranet, Technisches Büro Infrastruktur, Abluftsystem Halle 5 , (15.11.2020)
3) Volkswagen Aktiengesellschaft, Umwelterklärung 2019 Standort Kassel, 2019

10.1 Bücherquellen

1) VDI (04.2013): Richtlinie 3803 Blatt 5-1. Raumlufttechnik, Geräteanforderungen, Wärmerückgewinnungssysteme. Beuth,
2) Gomeringer, et al., Tabellenbuch Metall, 47. Auflage, Europa Lehrmittel, 2017
3) Norm: DIN EN ISO 15927-1 (02.2004): Wärme- und feuchteschutztechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung und Darstellung von Klimadaten - Teil 1: Monats- und Jahresmittelwerte einzelner meteorologischer Elemente, Beuth, 2004
4) Gerhard Bohm, Günter Zech: Statistische Datenanalyse für Physiker, 1. Auflage, Springer Spektrum, 2020 (S.20 f.)
5) Prof. Dr. Rüdiger Erbrecht, et al., Das große Tafelwerk, 1. Auflage, Cornelsen, 2003

10.2 Internetquellen

1) https://www.volkswagenag.com/de/group/strategy.html (06.09.2020)
2) https://www.volkswagenag.com/de/sustainability/environment/mission-statement.html (28.07.2020)
3) https://www.chemie.de/lexikon/Spezifische_W%C3%A4rmekapazit%C3%A4t.html (15.11.2020)
4) https://www.volkswagenag.com/de/news/2020/01/volkswagen_group_carbon_fund.html (22.07.2020)
5) https://www.volkswagenag.com/de/InvestorRelations/news-and-publications/Annual_Reports.html (06.12.2020)
6) https://geschaeftsbericht2019.volkswagenag.com/konzernlagebericht/geschaeftsverlauf/belegschaft.html (06.12.2020)
7) https://www.google.de/maps/@51.2530873,9.4393678,2885m/data=!3m1!1e3 (24.09.2020)

8) http://www.vw-kraftwerk.de/(15.11.2020)
9) https://de.pons.com/%C3%BCbersetzung/latein-deutsch/recuperatio (06.09.2020)
10) https://www.energie-lexikon.info/rekuperation.html (24.09.2020)
11) https://www.newcast.de/vis/v1/de/exhibitors/GMTN2019.2574026 (12.09.2020)
12) https://flox.com/documents/de_CX200%20Eta.pdf (12.09.2020)
13) https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf (S.45 ff)
14) https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/j/jahresmitteltemperatur.html (06.11.2020)
15) https://www.wetter.de/cms/wetterlexikon-monatsmitteltemperatur-2400111.html (05.11.2020)
16) https://www.statistik-nachhilfe.de/ratgeber/statistik/induktive-statistik/signifikanztests-hypothesentests/pruefung-auf-verteilung-anpassungstests/anderson-darling-test (15.11.2020)
17) https://www.sixsigmablackbelt.de/test-auf-normalverteilung-excel/ (19.11.2020)
18) https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/j/jahresmitteltemperatur.html (06.11.2020)
19) https://www.baunetzwissen.de/gebaeudetechnik/fachwissen/lueftung/waermerueckgewinnung-in-lueftungsanlagen-2468659 (29.11.2020)
20) https://shop.ksb.com/ims_docs/00/005056B602221ED58FF353784C59F3E0.pdf (05.12.2020)
21) https://de.climate-data.org/info/sources/ (09.12.2020)
22) https://de.climate-data.org/europa/deutschland/hessen/baunatal-21412/ (06.12.2020)

11. Anhang

Datum	Abluftfuchs 1	Abluftfuchs 2	Abluftfuchs 3	Abluftfuchs 4
06. 09	43,75	24,78	24,02	19,82
07. 09	45,84	24,74	23,57	19,47
08. 09	49,24	25,95	24,52	20,20
09. 09	52,09	27,27	25,72	21,44
10. 09	53,38	27,23	25,72	21,49
11. 09	52,74	25,88	24,68	20,24
12. 09	48,16	26,12	24,79	20,75
13. 09	45,95	26,44	25,19	21,18
14. 09	53,41	27,78	26,00	22,19
15. 09	57,34	29,25	27,15	23,23
16. 09	55,01	29,28	26,72	23,17
17. 09	55,42	27,93	25,32	22,43
18. 09	51,52	26,43	24,02	21,23
19. 09	50,13	26,56	24,78	21,51
20. 09	45,21	24,94	25,42	21,57
21. 09	57,71	23,56	24,87	22,17
22. 09	63,04	25,05	25,12	22,65
23. 09	65,89	26,34	24,73	22,53
24. 09	65,61	26,69		21,97
25. 09	62,92	25,97		20,10
26. 09	58,28	24,76		20,60
27. 09	49,75	24,39		20,75
28. 09	52,47	25,52		20,70
29. 09	52,73	25,46		20,46
30. 09	55,96	26,23		20,68
01. 10	57,93	26,41		20,83
02. 10	57,10	26,75		21,53
03. 10	58,22	26,39		20,86
04. 10	42,58	24,63		20,95
05. 10	41,19	25,61		19,58
06. 10	44,82	26,65		20,54
07. 10	45,89	26,99		20,86
08. 10	45,58	26,82		20,99
09. 10	45,98	27,46		21,43
10. 10	40,67	26,14		21,87
11. 10	36,91	24,59		20,50
12. 10	37,24	24,97		19,35

Tabelle 27: Abluftmittelwerte[84]

[84] Auswertung von Daten der Datenlogger Abluftfuchs 1-4

Tag	2017	2018	2019	2020
01. Jan		7,415		0,6025
02. Jan		5,9975		0,7
03. Jan		7,5575		5,2775
04. Jan		8,12		4,645
05. Jan		8,71		4,0775
06. Jan		6,79		4,08
07. Jan		3,975		4,945
08. Jan		4,47		6,7325
09. Jan		4,91		9,745
10. Jan		6,105		7,78
11. Jan		6,7875		5,2875
12. Jan		6,3875		4,8625
13. Jan		4,01		6,34
14. Jan		2,14		9,0625
15. Jan		4,3125		10,64
16. Jan		4,6075		7,4875
17. Jan		2,2125		7,205
18. Jan		5,0225		4,9
19. Jan		2,9575		4,6325
20. Jan		2,7625		3,19
21. Jan		1,9675		0,2825
22. Jan		4,2525		0,49
23. Jan		6,825		1,8125
24. Jan		10,17		1,005
25. Jan		9,2575		1,115
26. Jan		6,7425		2,455
27. Jan		5,7425		6,11
28. Jan		7,57		5,24
29. Jan		8,9975		4,3875
30. Jan		5,365		6,645
31. Jan		7,8525		11,3925
01. Feb		3,945		10,245
02. Feb		4,13		9,755
03. Feb		3,8		9,56
04. Feb		0,2225		5,3375
05. Feb		-0,23		3,705
06. Feb		0,2125		4,19
07. Feb		0,685		4,1425
08. Feb		-0,6675		5,0325
09. Feb		0,1475		8,8275
10. Feb		1,8675		7,2675
11. Feb		1,8225		5,265
12. Feb		1,4525		4,385
13. Feb		1,1275		4,46
14. Feb		0,685		6,4975
15. Feb		2,6275		8,0225
16. Feb		3,13		12,025
17. Feb		2,3975		8,4775
18. Feb		1,4425		6,925
19. Feb		1,4225		5,9
20. Feb		2,175	6,705	7,1425

21. Feb		1,8	10,8925	7,1925
22. Feb		1,38	5,7275	8,0125
23. Feb		-0,9325	3,74	8,3425
24. Feb		-1,665	5,1275	7,255
25. Feb		-3,0775	6,545	7,8425
26. Feb		-5,5025		4,275
27. Feb		-5,695	9,1125	3,29
28. Feb		-6,47	11,235	4,25
29. Feb				7,6575
01. Mrz		-4,55	7,33	7,655
02. Mrz		-2,83	9,3675	7,56
03. Mrz		-1,7	11,415	5,1675
04. Mrz		4,5125	9,1075	4,7875
05. Mrz		4,32	6,3875	5,8975
06. Mrz		4,7675	12,88	5,5325
07. Mrz		6,4575	10,305	4,7175
08. Mrz		5,13	9,415	8,1475
09. Mrz		7,42	9,7225	7,4825
10. Mrz		11,5475	6,6075	9,095
11. Mrz		12,3125	5,035	10,6125
12. Mrz		10,6675	7,4375	10,12
13. Mrz		6,815	6,7775	7,425
14. Mrz		4,935	7,705	6,3175
15. Mrz		5,9125	8,9375	8,415
16. Mrz		0,9375	10,195	10,505
17. Mrz		-2,02	5,995	10,625
18. Mrz		-2,1225	5,865	11,355
19. Mrz		-0,2875	4,205	11,6825
20. Mrz		0,8825	7,7175	8,01
21. Mrz		2,8575	9,845	5,605
22. Mrz		3,96	11,515	4,0825
23. Mrz		6,2275	9,415	3,84
24. Mrz		4,7175	7,19	4,505
25. Mrz		6,535	5,9975	5,2275
26. Mrz		6,17	6,9725	6,08
27. Mrz		7,415	9,7425	10,6225
28. Mrz		7,7925	10,81	6,63
29. Mrz		5,18	10,0975	2,7375
30. Mrz		10,05	13,345	3,3475
31. Mrz		7,0725	8,145	2,63
01. Apr		5,6075	8,4175	4,265
02. Apr		9,18	13,1	7,51
03. Apr		13,82	8,5375	5,7775
04. Apr		12,8075	7,29	7,07
05. Apr		6,12	8,955	10,0625
06. Apr		9,55	13,98	12,6025
07. Apr		12,9925	12,98	13,565
08. Apr		14,895	13,6875	13,665
09. Apr		15,92	10,0375	13,0525
10. Apr		16,0675	7,0975	9,635
11. Apr		13,8225	7,415	11,175
12. Apr		16,5675	3,9725	14,53

13. Apr		12,065	3,25	5,8025
14. Apr		14,495	5,9725	4,5575
15. Apr		15,4	10,1725	8,7575
16. Apr		13,81	13,0025	14,1775
17. Apr		14,6125	14,47	13,6875
18. Apr		16,9075	15,5175	13,6425
19. Apr		18,1225	15,9325	10,1125
20. Apr		18,9125	15,0325	11,5875
21. Apr		17,7875	16,3	12,7975
22. Apr		18,7525	15,3375	13,125
23. Apr		15,275	17,5325	12,235
24. Apr		15,3475	15,105	12,5875
25. Apr		12,4675	16,695	8,575
26. Apr		9,245	10,075	11,4875
27. Apr		12,25	9,45	13,945
28. Apr		13,6875	8,0625	13,555
29. Apr		18,4875	10,455	14,0425
30. Apr		13,165	12,1975	12,185
01. Mai		9,795	13,4175	11,4675
02. Mai		12,48	10,1325	9,1725
03. Mai		12,7975	7,415	11,7575
04. Mai		14,3975	4,92	9
05. Mai		15,81	7,3175	7,7325
06. Mai		17,2625	8,77	9,695
07. Mai		18,655	9,355	12,9175
08. Mai		19,045	11	15,565
09. Mai		19,485	12,1575	16,1675
10. Mai		14,9825	11,465	11,415
11. Mai		17,105	8,29	6,315
12. Mai		19,435	8,8425	7,0725
13. Mai		19,9525	10,145	12,2725
14. Mai		20,5125	8,905	8,3625
15. Mai		16,605	12,065	9,4
16. Mai		14,65	9,415	12,87
17. Mai		13,065	12,405	12,835
18. Mai		11,525	16,4625	16,9475
19. Mai		13,7875	17,1425	18,07
20. Mai		18,035	16,4075	14,7525
21. Mai		18,9025	14,175	18,0575
22. Mai		19,6825	11,185	18,95
23. Mai		21,2775	14,52	13,58
24. Mai		18,35	16,4825	14,26
25. Mai		20,0375	12,1875	13,3475
26. Mai		21,4025	18,5925	13,2975
27. Mai		22,2675	13,9075	16,41
28. Mai		24,6775	10,955	14,2975
29. Mai		21,8175	11,9775	15,045
30. Mai		22,33	16,3475	15,08
31. Mai		23,72	17,7025	15,325
01. Jun		21,23	19,715	17,475
02. Jun		19,0325	22,2075	19,2775
03. Jun		19,1425	20,355	17,2875

04. Jun		21,025	22,3075	12,7725
05. Jun		19,0075	23,785	11,3575
06. Jun		22,3175	13,5175	13,1275
07. Jun		22,55	16,12	14,005
08. Jun		22,45	14,64	13,295
09. Jun		23,115	13,87	15,595
10. Jun		20,9975	19,33	15,7625
11. Jun		18,695	18,665	16,3275
12. Jun		16,2025	14,9575	22
13. Jun		14,4425	17,595	22,2125
14. Jun		17,5575	21,65	18,4
15. Jun		18,375	19,6425	17,0825
16. Jun		20,975	16,9725	17,5825
17. Jun		18,13	21,135	19,39
18. Jun		20,1725	23,0525	16,1575
19. Jun		19,3525	22,9875	19,78
20. Jun		21,2675	19,5575	17,385
21. Jun		15,095	18,9975	20,83
22. Jun		13,11	21,16	17,0925
23. Jun		14,6175	22,7725	20,0275
24. Jun		14,4925	24,625	21,0525
25. Jun		17,055	26,205	21,245
26. Jun		17,1325	23,2825	23,2
27. Jun		19,485	18,4875	24,665
28. Jun		22,65	18,85	18,985
29. Jun		22,66	22,4175	18,315
30. Jun		19,0925	26,0175	20,8275
01. Jul		18,0475	19,925	20,99
02. Jul		18,635	16,6775	18,4475
03. Jul		20,79	15,58	18,875
04. Jul		23,0525	18,3775	22,465
05. Jul		21,405	20,07	21,06
06. Jul		18,365	19,0725	14,15
07. Jul		19,035	15,0675	16,9
08. Jul		20,2825	14,2475	16,18
09. Jul		19,23	13,21	20,3925
10. Jul		16,155	16,9875	15,5775
11. Jul		16,5175	16,7925	14,665
12. Jul		19,9375	15,7375	16,36
13. Jul		19,83	15,705	18,6075
14. Jul		20,6825	15,2025	18,6575
15. Jul		21,4875	14,1875	16,005
16. Jul		20,2175	15,4925	15,5425
17. Jul		23,3075	14,52	17,265
18. Jul		20,1725	19,96	19,095
19. Jul		21,56	17,945	21,71
20. Jul		25,7025	20,8775	17,495
21. Jul		22,8175	18,705	16,68
22. Jul		21,4875	21,245	18,0725
23. Jul		22,8075	24,615	19,085
24. Jul		25,775	25,8825	21,585
25. Jul		25,5075	28,8975	22,1

26. Jul		26,825	26,495	19,3025
27. Jul		26,105	25,47	22,94
28. Jul		23,5775	21,8275	19,1
29. Jul		23,5425	20,1225	17,9
30. Jul		26,3225	22,185	19,4475
31. Jul		27,74	19,695	23,065
01. Aug		25,6875	20,155	24,38
02. Aug		26,4075	17,4875	19,1575
03. Aug		27,0525	17,4375	18,24
04. Aug		25,2	20,4375	17,67
05. Aug		20,9775	21,1975	20,635
06. Aug		24,6025	21,4875	22,1625
07. Aug		27,47	19,2075	24,1275
08. Aug		24,43	20,4775	26,9725
09. Aug		23,295	22,6775	25,6175
10. Aug		20,8925	19,84	24,6125
11. Aug		17,4075	19,1825	25,935
12. Aug		19,89	17,0575	25,1525
13. Aug		19,0825	15,3075	23,2325
14. Aug		20,4125	16,8975	21,6
15. Aug		19,645	16,7525	22,295
16. Aug		22,6975	17,9725	23,665
17. Aug		21,645	19,1325	20,3175
18. Aug		20,585	19,1175	18,4725
19. Aug		22,7225	16,9125	21,62
20. Aug		22,11	15,8	24,41
21. Aug		22,125	16,325	25,5525
22. Aug		23,37	17,8025	22,4025
23. Aug		24,0275	19,7775	19,6225
24. Aug		18,73	22,5775	17,6325
25. Aug		15,58	23,87	20,6825
26. Aug		17,96	24,19	18,915
27. Aug		17,6025	23,2575	18,6925
28. Aug		18,145	23,92	16,815
29. Aug		21,1725	21	17,4575
30. Aug		16,055	20,73	17,6575
31. Aug		14,3975	24,5075	14,2
01. Sep		16,19	15,505	14,5675
02. Sep		18,12	14,2475	13,785
03. Sep		18,475	16,055	17,8975
04. Sep		19,9	18,1075	19,51
05. Sep		21,1225	13,2225	14,03
06. Sep		18,8025	15,325	13,21
07. Sep		15,065	12,795	14,775
08. Sep		16,5575	13,7875	18,0975
09. Sep		16,7525	12,04	18,73
10. Sep		18,73	12,5175	13,665
11. Sep		20,585	16,335	15,14
12. Sep		20,4025	18,4275	17,265
13. Sep		16,0075	16,5075	17,3
14. Sep		15,8	14,3725	20,05
15. Sep		14,895	18,0575	20,4625

16. Sep		15,385	14,605	19,0475
17. Sep		18,02	13,175	14,32
18. Sep		21,7475	11,7575	14,8475
19. Sep		21,4925	8,94	17,6175
20. Sep		22,7325	10,015	15,9925
21. Sep		14,8625	13,9425	16,41
22. Sep		14,395	17,665	18,595
23. Sep		10,085	16,155	19,7075
24. Sep		9,3275	16,46	17,79
25. Sep		8,4525	15,545	13,75
26. Sep		12,48	16,53	10,795
27. Sep		14,3825	15,055	10,14
28. Sep		9,34	14,935	12,0775
29. Sep		8,315	15,48	14,08
30. Sep		11,1825	12,085	13,7025
01. Okt		8,3775	15,0075	14,6875
02. Okt		11,855	10,7225	16,7175
03. Okt		10,0525	11,1375	14,26
04. Okt		9,9125	9,965	13,0925
05. Okt		13,64	8,17	13,4675
06. Okt		17,34	8,3025	12,38
07. Okt		9,23	11,5775	12,125
08. Okt		11,49	11,7825	13,2375
09. Okt		13,3325	11,0125	11,7575
10. Okt		15,9925	11,355	10,55
11. Okt		16,835	13,995	10,9275
12. Okt		18,79	17,5925	10,06
13. Okt		16,6875	19,7175	10,15
14. Okt		15,9725	16,68	9,235
15. Okt		16,03	16,005	9,7925
16. Okt		13,68	14,48	
17. Okt	15,5575	14,3125	14,96	
18. Okt	14,7825	14,6025	12,1275	
19. Okt	12,3075	12,48	13,4175	
20. Okt	15,4475	9,0125	15,165	
21. Okt	13,495	9,83	15,615	
22. Okt	12,7625	9,4025	12,32	
23. Okt	10,5875	11,395	13,19	
24. Okt	11,5825	13,7125	14,4675	
25. Okt	12,7325	13,6975	14,46	
26. Okt	15,595	11,86	14,8125	
27. Okt	14,46	8,3025	10,625	
28. Okt	12,07	6,29	6,7175	
29. Okt		6,9475	7,0725	
30. Okt	9,3175	8,61	6,155	
31. Okt	8,8325	10,4075	4,2975	
01. Nov	8,985	8,9	5,5675	
02. Nov	10,6375	11,4675	12,37	
03. Nov	10,9675	7,6075	12,26	
04. Nov	8,9025	9,805	10,785	
05. Nov	10,195	12,48	9,245	
06. Nov	8,88	11,0625	8,6475	

07. Nov	6,9225	11,83	8,83	
08. Nov	7,155	12,43	6,6575	
09. Nov	8,95		5,775	
10. Nov	8,84		4,8725	
11. Nov	7,95		5,13	
12. Nov	6,51		6,02	
13. Nov	4,95		5,47	
14. Nov	5,56		6,41	
15. Nov	6,4225		5,69	
16. Nov	7,7775		3,81	
17. Nov	6,7075		4,2375	
18. Nov	5,825		5,31	
19. Nov	4,96		4,6925	
20. Nov	5,9225		4,4975	
21. Nov	5,52		5,5	
22. Nov	9,4525		5,145	
23. Nov	8,7075			
24. Nov	11,945			
25. Nov	9,6975			
26. Nov	5,1175		9,0975	
27. Nov	4,3225		10,145	
28. Nov	5,325		9,8675	
29. Nov	5,14		6,265	
30. Nov	4,0575		3,4675	
01. Dez	2,6275		0,795	
02. Dez	2,6675		4,3	
03. Dez	1,7725		5,4375	
04. Dez	1,0075		1,465	
05. Dez	5,1775		0,9675	
06. Dez	6,3625		2,9325	
07. Dez	7,315		7,6825	
08. Dez	5,3875		8,3625	
09. Dez	3,8475		6,95	
10. Dez	2,24		4,1075	
11. Dez	2,1275		3,0075	
12. Dez	6,34		3,3625	
13. Dez	3,9375		3,515	
14. Dez	3,48		5,47	
15. Dez	4,7275		6,9975	
16. Dez	3,2725		8,2425	
17. Dez	3,1675		11,6225	
18. Dez	2,8725		7,655	
19. Dez	2,9825		7,265	
20. Dez	4,0575		7,67	
21. Dez	5,3975		7,89	
22. Dez	7,8775		7,8275	
23. Dez	8,49		7,0475	
24. Dez	8,79		6,7775	
25. Dez	9,1075		6,4875	
26. Dez			5,155	
27. Dez	5,365		4,585	
28. Dez	5,495		1,98	

29. Dez	4,25		1,5525	
30. Dez	2,895		3,03	
31. Dez	6,475		2,7225	

Tabelle 28: Außentemperaturmittelwerte[85]

[85] Daten der Temperaturerfassung der Gebäudeleittechnik Volkswagen Werk Kassel