

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

22. Dezember 2016

# Optimierung Zwischenkreis Kreislauf-Verbund-System-WRG in raumlufttechnischen Anlagen

Schlussbericht

#### Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern

# Auftragnehmer: Hochschule Luzern – Technik und Architektur, Technikumsstrasse 21, 6048 Horw

#### Autoren:

Christoph Stettler, Hochschule Luzern, <u>christoph.stettler@hslu.ch</u> Gerhard Zweifel, Hochschule Luzern, <u>gerhard.zweifel@hslu.ch</u>

#### Begleitgruppe:

Matthias Balmer, Hochschule Luzern, <u>matthias.balmer@hslu.ch</u> Harry Gmür, Todt Gmür + Partner AG, <u>h.gmuer@tgp.ch</u> Kurt Hildebrand, Hochschule Luzern, <u>kurt.hildebrand@hslu.ch</u>

BFE-Bereichsleiter: Adrian Grossenbacher BFE Vertrags- und Projektnummer: SI/401811-01 / 8100050-02

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich

#### Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · <u>www.bfe.admin.ch</u>

## Zusammenfassung

KVS sind typische WRG in raumlufttechnischen Anlagen. Gegenüber anderen WRG-Systemen ist der Aufwand an elektrischer Hilfsenergie bei KVS hoch. Für den erhöhten Energieaufwand ist hauptsächlich die Zirkulationspumpe des Wasser-Glykol-Zwischenkreises verantwortlich. Mit Hilfe von Simulationen lassen sich optimale Auslegungen mit energieeffizientem Betrieb erreichen.

In der Masterthesis "Simulationsgestützte Optimierung von Kreislaufverbundsystemen in raumlufttechnischen Anlagen" [1] wird die optimale Planung und Funktionsweise von KVS mittels Simulationen und numerischen Optimierungen aufgezeigt. Dazu sind die empirischen Daten eines Referenz-KVS verwendet worden. Diese wurden während eines Jahres von der Hochschule Luzern – Technik & Architektur ermittelt. Die Messdaten bildeten die Grundlage für die Validierung des Simulationsmodells. In der Simulation wurden verschiedene Aufbauten sowie Regelungsstrategien getestet und optimiert.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Planung und beim Betrieb Optimierungspotenzial vorhanden ist. Dabei werden die Planer sowie die Betreiber gleichermassen angesprochen. Grundsätzlich gibt es kein Rezept, wie KVS geplant und betrieben werden sollen, da das Einsatzgebiet sehr unterschiedlich ist. Trotzdem gibt es Regeln, die eingehalten und Gegebenheiten, die bei einer Entscheidungsfindung in der Planung unbedingt berücksichtig werden müssen. Dabei gelten die meisten Regeln für einfache KVS und für KVS-Verbunde. Einfach umsetzbare aber einflussreiche Optimierungen für alle KVS sind:

- Der optimale Wasser-Glykol-Massenstrom muss anhand des Luft-Massenstromes geregelt werden. Dazu ist eine drehzahlgesteuerte Pumpe notwendig.
- Für den Frostschutzbetrieb ist ein Durchgansventil im Bypass einzubauen. Der totale Druckverlust kann damit ohne Nachteile reduziert werden. Das Durchgangsventil muss anhand des Druckverlustes im Teillastbetrieb (max. 30-40 % des Wasser-Glykol-Massenstroms) des Lufterhitzers ausgelegt werden.
- Die Strömung des Wasser-Glykol-Massenstroms im WÜ darf bei minimalem Massenstrom nicht laminar sein. Eine grosse Spreizung zwischen minimalem und maximalem Luft-Volumenstrom resp. Wasser-Glykol-Massenstrom ist zu verhindern, damit der Druckverlust bei maximalem Volumenstrom nicht extrem hoch ist.

Beim KVS-Verbund sind zusätzlich folgende Punkte zu beachten:

- Der Bypass für den Frostschutz kann für alle ABL Lüftungsanlagen gemeinsam erfolgen.

Im vorliegenden Bericht sind die Messdaten der Referenzanlage und die Zusammenfassung der Erkenntnisse aus der Masterthesis ausführlich dargestellt. Das separate Merkblatt "Kreislaufverbundsystem – Optimale Planung und effizienter Betrieb" enthält die Resultate der Masterthesis in gekürzter Form.

#### Résumé

Les systèmes reliés par circuit d'eau glycolée sont typiquement utilisés pour la récupération de chaleur dans les grandes installations de ventilation. Ces dernières se distinguent de par leur besoin relativement plus élevé en électricité pour les pompes de circulation du circuit d'eau glycolée. Avec l'aide de simulations, le dimensionnement et l'exploitation de tels systèmes ont pu être optimisés.

Dans le cadre du travail de master intitulé "Optimisation de systèmes reliés par circuit d'eau glycolée pour des installations de ventilation à l'aide de simulations" [1], la planification et détermination du mode de fonctionnement de systèmes reliés par circuit d'eau glycolée a pu être établie à l'aide de simulations et optimisations numériques. Pour ce faire, les valeurs empiriques d'une installation de référence ont été utilisées, lesquelles ont été relevées durant une année par l'Ecole d'Ingénieurs de Lucerne – Technique & Architecture. Les mesures effectuées ont ainsi permis de valider les modèles de simulation pour lesquels différents concepts et stratégies de réglage ont été testés et optimisés.

Les analyses des ont montré un potentiel d'optimisation lors de la planification et l'exploitation. Les mesures d'amélioration identifiées s'adressent autant aux planificateurs qu'aux exploitants. De manière générale, il n'est pas possible de déterminer une solution standard pour la planification et l'exploitation de systèmes reliés par circuit d'eau glycolée, ces derniers variant beaucoup de cas en cas. Malgré cela, des règles ainsi que des conditions, lesquelles sont à prendre en compte dans tous les cas lors de la phase de planification, ont été identifiées. Ces dernières s'appliquent quelle que soit la taille du système relié par circuit d'eau glycolée. Les mesures les plus simples à mettre en œuvre et qui de plus implique les optimisations les plus conséquentes sont les suivantes:

- Le débit optimal d'eau glycolée doit être réglé en fonction du débit d'air à l'aide d'une pompe à vitesse variable.
- Pour le mode de fonctionnement antigel, une vanne de passage est à prévoir dans le by-pass. Ainsi, les pertes de charges globales peuvent être réduites sans désavantage. La vanne de passage doit être réglée selon les pertes de charges du fonctionnement en charge partielle (max. 30-40 % du débit massique d'eau glycolée).
- L'écoulement d'eau glycolée dans l'échangeur de chaleur ne doit pas être laminaire lorsque le débit est minimal. Un grand écart entre le débit d'air minimal et maximal, respectivement entre le débit d'eau glycolée minimal et maximal, dot être évité afin que les pertes de charges correspondant au débit maximal ne soit pas trop élevées.

Les points suivants sont également à prendre en compte pour les systèmes reliés par circuit d'eau glycolée:

- Le by-pass pour le fonctionnement en mode antigel peut être effectué conjointement à toutes les installations d'air repris.
- La connexion de plusieurs installations de ventilation avec un système relié par circuit d'eau glycolée ne présente pas de limitation au niveau hydraulique. Afin de juger si la connexion est avantageuse du point de vue énergétique, les éléments suivants doivent être pris en considération: les modes de fonctionnement, les niveaux de température ainsi que les durées d'exploitation.

Le présent rapport contient les mesures de l'installation de référence ainsi que le résumé des observations faites lors du travail de master. L'aide technique annexe intitulée "systèmes reliés par circuit d'eau glycolée –planification optimale et exploitation efficace" contient les résultats du travail de master dans une forme plus écourtée.

#### Inhaltsverzeichnis

Glossar	7
1. Einführung	8
T-01	40
	10
2. Messgrundlagen	10
2.1. Messobjekt	10
2.2. Messperiode	10
2.3. Messverfahren	10
2.4. Messpunkte	10
3 Resultate	11
	12
3.1. Eulurysanage Ruche	15
	16
4. Zusammenfassung Masterthesis	16
4.1. Anforderungen an die WRG	16
4.2 Problemanalyse	18
4.3 Modellentwicklung	10
	20
	20
4.5. Kalibrierung / Validierung	20
4.6. Resultate	20
	22
5 Richtlinien KVS allgemein	22
5.1 Ontimalor Wasser Glukal-Massanstrom	22
	22
	24
5.3. vvarmeubertrager	27
5.4. Drehzahlgesteuerte Pumpe	28
5.5. Frostschutz bei grossen Distanzen im Zwischenkreis - NPSH	29
5.6. Temperaturänderungsgrad und ETV	30
5.7. Messgenauigkeit	31
5.8 Kontrolle der Anlage	32
5.9 Ontimierungen von bestehenden KVS	32
Biolettinion für einfehe KVR	22
o. Richtlinier für einlache KVS	33
6.1. WU IM ZWISCHENKREIS	33
6.2. Bypass mit WU im Zwischenkreis	35
7. Richtlinien für KVS-Verbunde	37
7.1. Einsatzgebiet	37
7.2. Frostschutz	37
7.3. Pumpe	38
7.4 WII im Zwischenkreis	38
75 Kontrolle der Betrieheweise	30
	39
8. Literaturverweise	40
9. Abbildungsverzeichnis	42
Anhana	15
Meanunkte und Meananäte der Deferenzenlage	40
wesspunkte und wessgerate der Referenzanlage	45
Spezifikation Messgerate	47
Messresultate Lüftungsanlage Nebenräume	48
Messresultate Lüftungsanlage Cafeteria	51
Messresultate Lüftungsanlage Restaurant	54
Messresultate KVS Zwischenkreis	57
Rerechnung der erweiterten Messunsicherheit	50
Ontimaler Wasser-Clykol-Massenstrom in Abhängigkoit des Luftvolumenstromes	61
Optimater wasser-Orykor-wasseristrom in Abhanylykeit des Luitvolumenstromes	04

# Glossar

KVS	Kreislaufverbundsystem
WRG	Wärmerückgewinnungssystem
WÜ	Wärmeübertrager
ABL	Abluft
ZUL	Zuluft
AUL	Aussenluft
FOL	Fortluft
NW	Nachwärmer
NK	Nachkühler
ETV	Elektro-Thermische-Verstärkungsfaktor

#### 1. Einführung

KVS sind typische WRG-Systeme in RLT-Anlagen. Diese werden eingesetzt, wenn Abluft- und Zuluftströme aus hygienischen oder brandschutztechnischen Gründen [2] örtlich getrennt sein müssen (z. B. Lüftungsanlagen in Labors oder gewerblichen Küchen). Ebenfalls besteht die Möglichkeit, mit einem KVS mehrere RLT-Anlagen zu verbinden und zusätzliche Wärmequellen und -senken von anderen gebäudetechnischen Anlagen bzw. industriellen Prozessen in den Kreislauf einzubinden [3, 4]. Nicht zuletzt ist die Flexibilität durch die ortsunabhängige Zu- und Abluft-Anlagepositionen ein wichtiger Grund für den Einsatz eines KVS. Oft werden daher KVS auch in Hochhäusern eingesetzt, um den Platzbedarf der einzelnen Steigzonen zu reduzieren, indem die Zu- und Abluftanlagen optimal im Gebäude verteilt werden. [5]. Dabei liegt die Herausforderung in der sich ergebenden Distanzen zwischen den Anlagen.

Neben vielen Vorteilen, hat das KVS die grosse Herausforderung, dass zur WRG ein vergleichsweise hoher Aufwand an elektrischer Energie für die Zirkulationspumpen im Zwischenkreis notwendig ist [6, 7]. Somit ist die Energieeffizienz, welche eine der vier Säulen der Energiestrategie 2050 des Bundes [8] bildet, hinsichtlich KVS ein wichtiges Thema. In Nicht-Wohngebäuden werden aus den genannten Gründen in 60 % aller RLT-Anlagen KVS eingesetzt. Wenn durch eine Optimierung der Energieverbrauch bei allen zurzeit in Nicht-Wohngebäuden betriebenen KVS um 5 % reduziert würde, sind Einsparungen von bis zu 58'000 MWh möglich [9]. Dies entspricht einem jährlichen Energieverbrauch von rund 12'000 Vier-Personen-Haushalten [10].

Die Bachelordiplomarbeit [11] zeigt standardisierte Verbesserungsvorschläge im Zwischenkreis von einfachen KVS (bestehend aus zwei WÜ, je einer in der ABL und der andere in der ZUL) auf, damit diese energetisch optimal gebaut und betrieben werden können. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einem einfachen KVS der Energieaufwand (Strombedarf der Pumpe im Zwischenkreis) durch den Einsatz eines Durchgangsventils im Bypass und einer drehzahlgesteuerten Pumpe um 36% reduziert werden kann.





Das Zusammenfassen von mehreren Lüftungsanlagen mit einem KVS zu einem KVS-Verbund sowie die Einbindung von Wärmequellen und -senken erhöhen die Komplexität solcher Systeme. Die langen Leitungen zwischen den WÜ verursachen eine Verzögerungszeit und stellen eine grosse Herausforderung für die optimale Regelung dar [12]. Deshalb können diesbezügliche

Planungsentscheidungen und Optimierungsfragen ausschliesslich mit Simulationen beantwortet werden. Obwohl KVS-Verbünde oft realisiert werden, gibt es zurzeit keine umfassenden Planungsgrundlagen. Hersteller [13, 14], HLK Ingenieure [6, 7], Regelungstechniker [15, 16, 17] und Wissenschaftler [18, 19] beschäftigen sich mit der optimalen Auslegung und dem optimalen Betrieb von KVS. Dabei werden oft nur Teilaspekte des KVS betrachtet und optimiert. Ein optimales System mit einer einheitlichen Zielgrösse – Energieaufwand verglichen mit dem Energieertrag – wird in keinem Projekt komplett dargestellt. Die Norm SIA 382/1 [20] und die SWKI-Richtlinie VA300-01 [21] geben Regeln für die Ausführung von KVS vor. Der Energieaufwand wird dabei beim Jahresnutzungsgrad (JNG) abgezogen, jedoch nicht verglichen.

An der Hochschule Luzern – Technik und Architektur wird an der Optimierung von KVS, hauptsächlich an Systemen, welche mehrere Lüftungsanlagen zusammen verbinden, geforscht. Die Masterarbeit "Simulationsgestützte Optimierungen von Kreislaufverbundsystemen in raumlufttechnischen Anlagen" trägt einen weiteren Schritt zum Verständnis und zur Verbesserung der genannten Anlagen bei. Das Ziel des beschriebenen Projektes ist, das KVS als Simulationsmodell abzubilden und dessen Verhalten unter dynamischen Bedingungen zu untersuchen. Die Simulation soll die Möglichkeit bieten, verschiedene Systemaufbauten und Regelungen zu konzipieren und zu erforschen sowie die optimalen Lösungen zu präsentieren. Getestet werden die Simulationsergebnisse an einem Referenz-KVS-Verbund.

Eine spezifische Eigenschaft bei KVS – die sehr geringen notwendigen Temperaturdifferenzen bei den WÜ zur Erzielung guter Wirkungsgrade – erfordert eine hohe Genauigkeit bei der Abbildung in den Modellen für die Simulationen. Deshalb müssen die einzelnen Komponentenmodelle sowie das Gesamtmodell kalibriert und validiert werden. Mit der Unterstützung des BFE und mit Hilfe von Partnern aus der Industrie konnte eine Reihe von potentiellen Messobjekten evaluiert und ein geeignetes Messobjekt ausgewählt werden. Dieses liefert die benötigten empirischen Daten zur Kalibrierung und Validierung der Simulationsmodelle. Die Messungen liefen während eines ganzen Jahres und starteten anfangs November 2015.

Der vorliegende Schlussbericht umfasst die folgenden drei Teile:

# Teil I

Der erste Teil beschreibt das Messobjekt und stellt die Messgrundlagen sowie die ausgewerteten empirischen Daten der Referenz-KVS dar.

# Teil II

Der zweite Teil fasst das Vorgehen und die Methode, welche in der erwähnten Masterarbeit angewendet wurden, zusammen.

#### Teil III

Die aus der Optimierungsstudie gewonnen Erkenntnisse sind im dritten Teil zusammengefasst.

# Teil I

# 2. Messgrundlagen

# 2.1. Messobjekt

Beim Messobjekt handelt es sich um eine Mensa mit den Nutzungen Restaurant, Cafeteria, Küche und Nebenräume. Diese sind auf fünf Stockwerken (drei Untergeschosse, ein Erdgeschoss und ein Obergeschoss) angeordnet. Das Objekt befindet sich in der Region Winterthur.

Zur Belüftung der vier genannten Nutzungszonen wurden vier Zu- und Abluftanlagen installiert und mit einem KVS verbunden. Die Lüftungsgeräte stehen im 2. Untergeschoss. Von dort aus werden die total 38'480 m<sup>3</sup>/h ZUL über die Steigschächte in die Stockwerke verteilt und anschliessend als Abluft über dieselben Steigschächte zu den Lüftungsgeräten zurückgeführt. Der ABL-Volumenstrom ist identisch mit der ZUL.

# 2.2. Messperiode

Die einjährige Messperiode startete am 01. November 2015.

# 2.3. Messverfahren

Zur Messung der relevanten Grössen kommen folgende Verfahren zur Anwendung:

- Lufttemperaturen AUL, ZUL, ABL und FOL sowie Mediumstemperaturen im Zwischenkreis: Widerstandsfühler
- Relative Luftfeuchte in der ABL: Kapazitätshygrometer
- Volumenströme: berechnet aus den Druckdifferenzen, welche mit piezoeletrischen Manometern bestimmt werden.
- Weitere Messgrössen aus dem Gebäudeleitsystem: siehe Tabelle 1 unten.

# 2.4. Messpunkte

In Abbildung 2 sind alle installierten Messpunkte eingezeichnet und mit Nummern bezeichnet. Der Sollwert ZUL Temperatur (...T.19), Stellsignale der Ventile (...Y...) und Regelsequenzen (...Y...) werden direkt aus dem Gebäudeleitsystem übermittelt.



Abbildung 2: Schematische Darstellung des Referenz-KVS - ein KVS-Verbund mit vier Lüftungsanlagen und unterschiedlichen Nutzungen - inkl. Beschriftung der Messpunkte. Mit Ausnahme des NK in der Küche, wurden alle NW und NK im Zwischenkreis des KVS-Verbunds eingebaut. Für den Kühl- und Frostschutzbetrieb wurde vor resp. nach der Pumpe je ein Bypass mit Durchgangsventil eingebaut.

In der Tabelle 2 (vgl. Anhang) sind alle Messpunkte aufgeführt und beschriftet sowie das dazugehörige Messgeräte aufgelistet.

#### 3. Resultate

Um die Resultate übersichtlich darzustellen, werden nur die repräsentativen Messwerte und Messzeiten abgebildet. Somit sind auf den folgenden Darstellungen immer zwei Winter- Frühlings-, Sommer- und Herbsttage dargestellt. Im Bericht sind die Messresultate der Lüftungsanlage "Küche" abgebildet und beschrieben, die Resultate der anderen Lüftungsanlagen sind im Anhang aufgeführt.

In der Abbildung 3 werden die Lufttemperaturen der AUL, ZUL, FOL, ZUL nach WRG, ZUL Sollwert und die Luftvolumenströme der Zu- und Abluft-Lüftungsanlagen dargestellt. Abbildung 4 zeigt die Ventilstellungen und Massenströme des Wasser-Glykol-Kreislaufs bei den Zu- und Abluft-Lüftungsanlagen. Die Ventilstellungen der NW und NK, sowie die VL und RL Temperaturen des LE bei den ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen sind in Abbildung 5 veranschaulicht.

Ersichtlich wird, dass die Soll-ZUL-Temperatur nicht erreicht werden kann (A), obwohl das NW-Ventil voll geöffnet ist (B). Da die anderen Lüftungsanlagen die vorgegebene Temperatur erreichen, liegt der Grund bei der nachträglichen Erhöhung des Luftvolumenstroms. Die grosse Temperaturdifferenz zwischen AUL und FOL (C – rund 12 K), die bei allen ABL-Lüftungsanlagen während tiefen AUL-Temperaturen vorhanden ist, fällt auf. Aufgrund der Taupunkttemperaturen kondensiert die ABL im LK und die FOL-Temperaturen sinken dadurch nicht weiter ab. Bei den Messresultaten "Frühling" ist die Differenz (D – 5-8 K) geringer, aber im Vergleich zu den anderen Lüftungsanlagen (im Durchschnitt 3 K) deutlich grösser. Die WÜ wurden mit einer mittleren Temperaturdifferenz von 2.5 K ausgelegt.

Deswegen wird bei der ABL-Lüftungsanlage "Küche" die Ursache beim – im Vergleich zum Luft-Massenstrom – zu geringen Wasser-Glykol-Massenstrom vermutet. Die Gründe dafür sind, dass bei der Erhöhung der Luftmenge der maximale Wasser-Glykol-Massenstrom beim LE- und LK-Ventil nicht angepasst wurde. Ebenfalls befand sich der vor Ort eingebaute Druckdifferenzsensor während der spezifischen Messungen ausserhalb des Messbereichs, sodass bei der Langzeitmessung die Luftmenge (E) auf der zweiten Stufe nicht korrekt gemessen werden konnte. Der Frostschutzbetrieb war bei einer AUL-Temperatur von ca. -4 °C (F) noch nicht in Betrieb, da die LKin-Temperatur (G) noch weit über den vorgeschriebenen -2.5 °C lag. Obwohl die beiden Ventile beim LE und LK (H) voll geöffnet sind, und gemäss den Auslegungsunterlagen beide gleich eingestellt sein sollten, gibt es eine grosse Abweichung zwischen den beiden gemessenen Wasser-Glykol-Massenströmen (I). Nach den Herstellerangaben ist bei den eingesetzten Ventilen eine Messunsicherheit von max. 10 % möglich (vgl. Anhang) – was bei (E) rund 16 l/min entspricht. Die Messungenauigkeit wird häufig überschritten. Diese grossen Abweichungen sind auch bei den anderen Lüftungsanlagen sichtbar. Entweder sind die Ventile falsch eingestellt oder die Massabweichung ist grösser als vom Hersteller angegeben. Die gemessene überschreitet die ausgelegte LEin-Temperatur beinahe während der ganzen abgebildeten Messzeit (J). Die Auswirkungen auf den Temperaturänderungsgrad werden bei der Optimierung untersucht, wobei von einer Reduktion ausgegangen wird. Die Regulierung für die Kühlung funktioniert im Fall (K) einwandfrei. Die Erhöhung des Massenstroms beim Kühler erfolgt, sobald die AUL-Temperatur über der Soll-ZUL-Temperatur liegt (L). Wenn der Wasser-Glykol-Massenstrom beim LE ausgeschaltet wird, bleibt das LK-Ventil mind. 25 % offen (M).

Die durch die Langzeitmessung gewonnen Erkenntnisse und unbeantworteten Fragen bildeten die Grundlage für die Optimierungsvarianten in der Masterarbeit.



# 3.1. Lüftungsanlage Küche

Abbildung 3 a-h: Messresultate - Temperaturen und Massenströme der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Küche" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.



Abbildung 4 a-h: Messresultate - Ventilstellungen und Massenströme des Wasser-Glykol-Massenstromes bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Küche" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.



Abbildung 5 a-h: Messresultate - Ventilstellungen der NW und NK und die VL und RL Temperaturen des LE bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Küche" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.

#### Teil II

#### 4. Zusammenfassung Masterthesis

Das Ziel der Masterarbeit "Simulationsgestützte Optimierungen von Kreislaufverbundsystemen in raumlufttechnischen Anlagen" [1] war, das KVS als Simulationsmodell abzubilden und dessen Verhalten unter dynamischen Bedingungen zu untersuchen. Die Simulation soll die Möglichkeit bieten verschiedene Systemaufbauten und Regelungen zu erstellen, erforschen und die optimalen Lösungen zu präsentieren. Getestet wird das Ganze am beschriebenen Referenz-KVS-Verbund.

Um die passenden Modelle zu finden resp. entwickeln, wurde eine detaillierte Problemanalyse durchgeführt. Die Komponenten- und das Gesamtmodell wurden mit Labor- und Feldmessdaten kalibriert und validiert. Mit den in der Arbeit gewonnen Erkenntnissen sind dann diverse Optimierungsthesen aufgestellt, getestet und verglichen worden.

#### 4.1. Anforderungen an die WRG

Die Anforderungen an die WRG ist in der SIA 382/1 [20] definiert und in der SWKI Richtlinie VA300-01 [21] ausführlich erläutert. Die Mindestanforderung beim Temperaturänderungsgrad beträgt 70 % (bei AUL Temperatur +5 °C) und beim Jahresnutzungsgrad 75 %. Erhöhte Anforderungen gibt es bei Minergie und der 2000-Watt-Gesellschaft. Dort sind ein Temperaturänderungsgrad von mind. 75 % und ein Jahresnutzungsgrad von mind. 80 % einzuhalten.

Der Temperaturänderungsgrad vergleicht das theoretisch mögliche potential der WRG mit dem tatsächlich zurückgewonnen Leistung (vgl. Gleichung 1) in einem Betriebspunkt. Gemäss Norm wird die zurückgewonnene Leistung anhand der Temperaturdifferenz zwischen AUL und ZUL ermittelt (vgl. Gleichung 2). Mit der Temperaturdifferenz zwischen ABL und FOL gibt es eine zweite Möglichkeit den Änderungsgrad zu bestimmen (vgl. Gleichung 3). Bei der letzten Variante wird die freiwerdende Kondensationsenergie der ABL in der Bilanz nicht berücksichtigt.

Der Vorteil der Temperaturänderungsgradberechnung anhand der ABL ist, dass die Veränderung beim Einschalten des NW im Zwischenkreis verglichen werden kann. Grundsätzlich ist es auch über die ZUL möglich, nur muss bei diesem Vorgehen die in den Zwischenkreis hinzugefügte Leistung ermittelt und der WRG-Leistung abgezogen werden. Die Berechnung der Leistung erfolgt über Messungen, die wiederum Messunsicherheiten beinhalten und so die Unsicherheit des Temperaturänderungsgrades erhöhen.

$\eta = \Phi$	= Zurückgewonnene Leistung Potential der WRG	(1)
$\Phi_{ZUL}$ =	$=\frac{\theta_{ZUL}-\theta_{AUL}}{\theta_{ABL}-\theta_{AUL}}$	(2)
$\Phi_{ABL}$ =	$= \frac{\theta_{ABL} - \theta_{FOL}}{\theta_{ABL} - \theta_{AUL}}$	(3)
$\Phi_{ m ZUL}$	Temperaturänderungsgrad bezogen auf die ZUL	[-]
$arPhi_{ m ABL}$	Temperaturänderungsgrad bezogen auf die ABL	[-]
$\theta_{AUL}$	Temperatur AUL	[°C]
$\theta_{\text{ZUL}}$	Temperatur ZUL	[°C]
$\theta_{ABL}$	Temperatur ABL	[°C]
$\theta_{FOL}$	Temperatur FOL	[°C]

Der Jahresnutzungsgrad ist das Verhältnis zwischen der Netto-Energierückgewinnung der WRG pro Jahr und dem Energiebedarf für die Erwärmung und Befeuchtung der AUL ohne WRG pro Jahr (vgl. Gleichung 4). Der jährliche Netto-Energierückgewinn berücksichtigt die thermische Energierückgewinnung abzüglich den Mehraufwand an elektrischer Energie für die Überwindung des Druckverlustes der WRG und für Hilfsantriebe, z.B. den Antriebsmotor beim Rotor oder die Pumpe beim KVS. Der latente Energieverlust durch Leckagen wird ebenfalls abgezogen.

$$Jahresnutzungsgrad = \frac{Netto - Energierückgewinn WRG pro Jahr}{Energiebedarf ohne WRG pro Jahr}$$
(4)

Eine weitere Kenngrösse zur Beurteilung der WRG ist der ETV. Der ETV<sub>E</sub> besagt, wie viel thermische Energie (latente und sensible) durch den Einsatz von elektrischer Energie zurückgewonnen werden kann [21]. Der Mehraufwand beinhaltet die elektrischer Energie für die Überwindung des Druckverlustes der WRG und die Hilfsenergie z.B. für den Antriebsmotor beim Rotor oder die Pumpe beim KVS. Der ETV<sub>L</sub> vergleicht anstelle der Energien die Leistungen und ist in der Richtlinie nicht definiert. Von der Seite der Normen gibt es für den ETV keine Vorgaben.

Der Hauptunterschied zwischen Jahresnutzungsgrad und ETV<sub>E</sub> ist, dass ersterer die Energiedifferenz mit und ohne WRG sichtbar macht und letzterer den Ertrag und den Aufwand gegenübergestellt.

$$ETV_E = \frac{Q_{WRG}}{Q_{el}} \tag{5}$$

$$ETV_L = \frac{\dot{Q}_{WRG}}{\dot{Q}_{el}} \tag{6}$$

$$Q_{WRG_ZUL} = \sum (\dot{m}_{ZUL} * c_{pL} * (\theta_{ZUL} - \theta_{AUL}) * dt)$$
(7)

$$Q_{WRG\_ABL} = \sum (\dot{m}_{ABL} * c_{pL} * (\theta_{ABL} - \theta_{FOL}) * dt)$$
(8)

$$Q_{el} = \left(\sum \left(\sum \left(P_{el,ABL} * dt\right) + \sum \left(P_{el,ZUL} * dt\right)\right) + \sum \left(P_{el,P} * dt\right)\right)$$
(9)

$$\dot{Q}_{WRG_ZUL} = \sum (\dot{m}_{ZUL} * c_{pL} * (\theta_{ZUL} - \theta_{AUL}))$$
(10)

$$\dot{Q}_{WRG\_ABL} = \sum (\dot{m}_{ABL} * c_{pL} * (\theta_{ABL} - \theta_{FOL}))$$
(11)

$$\dot{Q}_{el} = \left(\sum \left(\sum \left(P_{el,ABL}\right) + \sum \left(P_{el,ZUL}\right)\right) + \sum \left(P_{el,P}\right)\right)$$
(12)

ETV	Elektro-Thermische-Verstärkungsfaktor	[-]
Q <sub>WRG_ZUI</sub>	Einsparung an thermischer Energie pro Jahr	[kWh/a]
Q <sub>WRG_ABI</sub>	L Einsparung an thermischer Energie pro Jahr	[kWh/a]
Q <sub>el</sub>	Mehraufwand an elektrischer Energie pro Jahr	[kWh/a]
Q <sub>WRG_ZUI</sub>	Eingesparte thermischer Leistung	[kW/a]
$\dot{Q}_{WRG\_ABI}$	L Eingesparte thermischer Leistung	[kW/a]
$\dot{Q}_{el}$	Mehraufwand an elektrischer Leistung	[kW/a]
ṁ <sub>ZUL</sub>	Massenstrom ZUL	[kg/s]
ṁ <sub>АВL</sub>	Massenstrom ABL	[kg/s]
c <sub>pL</sub>	Wärmekapazität ZUL	[kJ/kgK]
$\theta_{AUL}$	Temperatur AUL	[°C]
$\theta_{\rm ZUL}$	Temperatur ZUL	[°C]
$\theta_{ABL}$	Temperatur ABL	[°C]

$\theta_{FOL}$	Temperatur FOL	[°C]
P <sub>el,ABL</sub>	Ventilatorenleistung ABL	[kW]
P <sub>el,ZUL</sub>	Ventilatorenleistung ZUL	[kW]
P <sub>el,ABL</sub>	Ventilatorenleistung ABL	[kW]

#### 4.2. Problemanalyse

Neben einigen Vorteilen hat das KVS gegenüber anderen WRG-Systemen einen grossen Nachteil: Zur Wärmerückgewinnung ist ein vergleichsweise hoher Energieaufwand für die Zirkulationspumpe (100 % Exergie) nötig. Die Herausforderung liegt darin, möglichst viel Wärme zurückzugewinnen und dabei den zusätzlichen Energieaufwand möglichst gering zu halten. Ebenso muss beachtet werden, dass die AUL- und ABL-Temperaturen gegeben sind und durch die WRG nicht beeinflusst werden. Um gemäss der Norm SIA 382/1 [20] einen Temperaturänderungsgrad von 70 % (bei AUL Temperatur von 5 °C) zu gewährleisten, müssen die WÜ mit einer geringen mittleren logarithmischen Übertemperatur ΔT von ca. 2 K gebaut werden, was die Druckverluste auf der Luft- und Glykolseite ansteigen lässt. Weiter sind bei den KVS immer zwei Wärmeübergänge zu überwinden. Eine detaillierte Planung bez. Optimierung ist unumgänglich. Die Eigenschaften des KVS sind im T-H-Diagramm (vgl. Abbildung 6) dargestellt.



Abbildung 6: Die Funktion des KVS in einem T-Ĥ-Diagramm dargestellt. Der rote Pfeil stellt die Abkühlung im LK der WRG und der blaue Pfeil die Erwärmung im LE der WRG dar. Dazwischen liegt der Zwischenkreis, welcher mit Wasser-Glykol gefüllt ist. Fix gegeben sind die AUL und ABL Temperatur. Diese könne durch die WRG nicht beeinflusst werden. Je nach Wärmeübertragerfläche verändern sich die mittlere logarithmische Übertemperatur ΔT des LK und LE.

Die langen Leitungen zwischen den WÜ verursachen eine Verzögerungszeit und stellen eine grosse Herausforderung für eine optimale Regulierung dar [15-17]. KVS-Anlagen können eine hohe Komplexität aufweisen. Jede Lüftungsanlage hat verschiedene Betriebszeiten und Anforderungen an die Luftkonditionierung. Zusätzlich werden WÜ in den Zwischenkreis eingebaut, damit die NW und NK im Luftstrom nicht mehr benötigt werden (vgl. Abbildung 7). Dies erhöht die Komplexität derart, dass viele Planungsentscheidungen und Optimierungsfragen nur mittels Simulationen beantwortet werden können. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein Modell entwickelt, das die verschiedenen Bauformen von KVS abbildet und anschliessend auf eine Zielgrösse optimiert werden kann.



Abbildung 7: Ein Beispiel eines KVS mit NW und NK im Zwischenkreis [4].

#### 4.3. Modellentwicklung

Die Modellbildung und die Simulation wurde mit dem Gebäudetechnik-Simulationsprogramm IDA Indoor Climate and Energy (ICE) (Version 4.6.2 [22]) durchgeführt.

Ein einfaches KVS besteht aus den unten aufgelisteten und in Abbildung 8 dargestellten Hauptkomponenten:

(C)

- Lufterhitzer (LE) (A) •
- Luftkühler (LK) (B) •
- Pumpe •
- Rohrleitung (D) •
- Ventil im Bypass (E) •
- Expansion (F) •



Abbildung 8: Ein KVS in einer ZUL- und ABL-Lüftungsanlage besteht aus den Hauptkomponenten: A) Lufterhitzer, B) Luftkühler, C) Pumpe, D) Rohrleitung, E) Ventil und F) Expansion [23].

Um die Genauigkeit der Komponentenmodelle zu prüfen, wurden diese anhand von Labormessdaten kalibriert und validiert. Die Messungen fanden am Versuchsaufbau an der Hochschule Luzern Technik und Architektur statt.

Mit den validierten Komponenten- und weiteren Standardmodellen aus der IDA ICE Bibliothek wird ein Gesamtmodell anhand einer Feldmessung aufgebaut. Das in dieser Arbeit verwendete Referenz-KVS (vgl. Abbildung 4) ermöglichte, die entwickelten Komponentenmodelle als Gesamtsystem zu testen und Optimierungen an der realen Anlage zu prüfen (vgl. Abschnitt 2.1).

## 4.4. Feldmessung

Die Erfahrung der Kalibrierung und Validierung mit Messdaten [12] zeigt, dass die Messunsicherheit sehr klein sein muss, um ein repräsentatives Resultat zu erhalten. Aus diesem Grund wurde neben der Langzeitmessung noch eine weitere Messreihe mit kalibrierten Labormessgeräten der Hochschule Luzern - Technik & Architektur durchgeführt.

## 4.5. Kalibrierung / Validierung

Die Kalibrierung und Validierung der Komponenten- und Gesamtmodelle wird anhand der empirischen Daten der Referenzanlage durchgeführt. Dazu wurde die erweiterte Messunsicherheit der Messgrössen nach dem international standardisierten Verfahren Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements GUM [24], [25] und der dazugehörigen Software [26] berechnet. Die Validierungsresultate des Komponentenmodells LE für die Lüftungsanlage Nebenräume wird in der Abbildung 9 a-b als repräsentatives Beispiel dargestellt.



Abbildung 9 a-b: Resultate der Validierung des Komponentenmodells LE "Nebenräume" anhand der optimalen Parametersets aus der Kalibrierung. a) Die Differenz der Messung und Simulation ist mit wenigen Ausnahmen während der gesamten Zeit geringer als die Messunsicherheit. b) Weil die Anlage bei der Messung immer in Betrieb war und sich die Temperaturen während dieser Zeit stetig veränderten, liegen auch einige Punkte über der Messunsicherheit.

# 4.6. Resultate

Die Resultate der Optimierungsstudie in Form des Elektro-Thermischen-Verstärkungsfaktors ETV (Vergleich anhand der Nutzenergie pro Jahr) zeigen, dass nachträgliche Anpassungen an der Lüftungsanlage (Erhöhung der Zu- und Abluftmenge bei der Anlage "Küche") auf Grund von Beschwerden den ETV um rund 11% reduziert haben (vgl. Abbildung 10 Variante 0b und 0c). Die Varianten 1, 2 und 4 sind regeltechnische Optimierungen, welche nachträglich sehr einfach umgesetzt werden können. Variante 3 hingegen ist von der Planung abhängig. Nach der Anpassung der Zu- und Abluftmenge kann mit den Anpassungen der Variante 2 und 3 zusätzlich 3% resp. 8% Energie eingespart werden. Weitere Details zu den Resultaten sind in der Masterthesis beschrieben.





# Teil III

Der Teil III fasst die Erkenntnisse aus der im Teil II erwähnten Studie in ein Merkblatt zusammen. Dabei werden die Planer sowie die Betreiber gleichermassen angesprochen. Grundsätzlich gibt es kein Rezept, wie KVS geplant und betrieben werden sollen, da die Einsatzgebiete sehr unterschiedlich sind. Trotzdem gibt es Regeln, die eingehalten und Gegebenheiten, die bei einer Entscheidungsfindung unbedingt berücksichtig werden müssen.

Das Merkblatt ist in drei Teile gegliedert. Zuerst beziehen sich die Hinweise auf ein einfaches KVS, anschliessend auch auf einen KVS-Verbund. Zum Schluss werden Probleme und Lösungen für einfache KVS und für KVS-Verbunde aufgelistet.

#### 5. Richtlinien KVS allgemein

#### 5.1. Optimaler Wasser-Glykol-Massenstrom

Der optimale Wasser-Glykol-Massenstrom muss anhand des Luft-Massenstromes geregelt werden. Dazu ist eine drehzahlgesteuerte Pumpe notwendig.

Der Massenstrom im Zwischenkreis ist vom Massenstrom der Luft abhängig [27]. Ist der Wasser-Glykol-Massenstrom zu hoch oder zu tief, resp. die Wärmekapazitätsströme Luft und Glykol nicht identisch, dann verringert sich der Temperaturänderungsgrad [28]. Die Auswirkungen eines zu hohen Wasser-Glykol-Massenstroms werden in Abbildung 11 gezeigt. Auf der rechten Seite des Maximums ist die Reduktion geringer, da der Druckverlust im Quadrat resp. die Pumpenleistung mit der dritten Potenz im Vergleich zum Wasser-Glykol-Volumenstrom ansteigt und dadurch mehr Wärme in den Zwischenkreis abgegeben wird. Um den optimalen Wirkungsgrad zu erhalten, muss die Gleichung 1 eingehalten werden. Demzufolge muss eine drehzahlgesteuerte Pumpe eingebaut werden. Zur Überprüfung des korrekten Wasser-Glykol-Massenstromes kann das in Abbildung 12 dargestellte Diagramm verwendet werden (weitere Diagramme sind im Anhang aufgeführt).

$\dot{m}_{WG} \cdot c_{pWG} = \dot{m}_L \cdot c_{pL}$		
$\dot{m}_{WG}$	Massenstrom Wasser-Glykol	[kg/s]
$c_{pWG}$	spezifische Wärmekapazität Wasser-Glykol	[J/kgK]
$\dot{m}_{WG}$	Massenstrom Luft	[kg/s]
$C_{pL}$	spezifische Wärmekapazität Luft	[J/kgK]



Abbildung 11 a-d: Verhalten der Rückwärmezahl resp. des Temperaturänderungsgrades in Abhängigkeit des Wasser-Glykol-Massenstroms (als Sole-Pumpenleistung bezeichnet) im Zwischenkreis bei konstantem Luftvolumenstrom [27]. a-c) zeigen das Verhalten der Luft- und Wasser-Glykol-Temperaturen des KVS bei verändertem Wasser-Glykol-Massenstrom. d) Der Betriebspunkt für eine optimale WRG liegt bei 32% der Pumpenleistung.



Abbildung 12: Auslegung des optimalen Wasser-Glykol-Massenstroms in Abhängigkeit des Luftvolumenstromes anhand der Gleichung 1. Dieses Diagramm kann zur einfachen Auslegung und Kontrolle des optimalen Wasser-Glykol-Massenstroms verwendet werden. Die Thematik der turbulenten und laminaren Strömung wird im Abschnitt 5.3 erläutert.

#### 5.2. Frostschutz

Für den Frostschutzbetrieb ist ein Durchgangsventil im Bypass einzubauen. Der totale Druckverlust kann damit ohne Nachteile reduziert werden. Das Durchgangsventil muss anhand des Druckverlustes im Teillastbetrieb (rund 30-40% des Wasser-Glykol-Massenstroms bei einer AUL Temperatur von - 20°C) des Lufterhitzers ausgelegt werden.

Um zu verhindern, dass das Kondensat im LK gefriert, wird warmes Wasser-Glykol-Gemisch vom RL in den VL des LK gemischt. Dazu muss die VL Temperatur des LK gemessen und normalerweise über -2°C gehalten werden. Diese Temperatur ist von der mittleren logarithmischen Übertemperatur somit vom Hersteller und der Auslegung des Wärmeübertragers abhängig. Der Massenstrom über den Bypass kann mit Hilfe von Durchgangs- oder Dreiwegventilen geregelt werden. Der Nachteil eines Dreiwegventils ist, dass der Druckverlust des Ventils auch beim Normalbetrieb (kein Frostschutzbetrieb) überwunden werden muss. Dieser entfällt bei einem Durchgangsventil. Das Durchgangsventil hat keine Nachteile. In der Abbildung 13 ist der richtige Einbau eines Bypasses inkl. Messung der VL-Temperatur in den LK dargestellt.



Abbildung 13 a-b: Richtiger Einbau eines Bypasses inkl. Messung der VL Temperatur in den LK. Um das KVS energetisch optimal zu betreiben muss ein Durchgangventil in den Bypass eingebaut werden. Die beiden Darstellungen zeigen das KVS während dem a) Frostschutz- und dem Normalbetrieb.

In der Abbildung 14 ist der Verlauf der Wasser-Glykol-Massenströme, der Lufttemperaturen und der Temperaturänderungsgrad in Abhängigkeit der AUL Temperatur aufgezeichnet. Wie oben beschrieben, schaltet der Frostschutzbetrieb ein, sobald die FOL Temperatur unter 0°C fallen würde. Die Beimischung des warmen Mediums in den kalten Vorlauf des LK hat grossen Einfluss auf andere Parameter, welche in der Abbildung dargestellt werden.



Abbildung 14 a-c: a) Verlauf der Wasser-Glykol-Massenströme im Zwischenkreis, b) der Lufttemperaturen und c) der Temperaturänderungsgrad in Abhängigkeit der AUL Temperatur. Der Unterschied zwischen der Betriebsweise Normal und Frostschutz wird aufgezeigt. Dabei spielt die Einfriergrenze – sobald das Kondensat im der ABL eingefriert würde - eine grosse Rolle. Diese ist abhängig von der Bauart der WÜ und somit vom Hersteller. Im Frostschutzbetrieb verringert sich der Temperaturänderungsgrad, aber die Temperaturerhöhung ∆T der AUL bleibt konstant. Ebenfalls reduziert sich der Wasser-Glykol-Massenstrom über den LE.

Bei der Auslegung des Durchgangsventils im Bypass muss beachtet werden, dass bei einer extremen Aussentemperatur von -20 °C rund 30-40 % des Wasser-Glykol-Massenstroms – diese Angabe ist ebenfalls von der Herstellung des Wärmeübertragers abhängig – über den Bypass fliesst um die -2 °C VL Temperatur des LK einzuhalten. Weiter ist der Druckverlust des LE und Bypasses parallel geschaltet. Somit muss sichergestellt werden, dass bei voll geöffnetem Ventil 30-40 % des Massenstromes über den Bypass fliesst und nicht mehr. Demzufolge muss der Druckverlust über den Bypass bei 30 – 40 % Massenstrom geringer sein als beim LE mit 60 – 70 % Massenstrom, aber immer noch genügend Schliessdruck aufweisen. Bei der Frostschutzschaltung wird der totale Druckverlust im Zwischenkreis verringert, somit würde bei konstanter Pumpendrehzahl der Massenstrom und die Leistung der Pumpe ansteigen (vgl. Abbildung 15). Die Lösung ist eine drehzahlgesteuerte Pumpe.

Um den Bypass richtig auszulegen, muss dem KVS-Hersteller die minimale Aussentemperatur angegeben werden. Damit kann der maximale Massenstrom über den Bypass und der dazugehörige Druckverlust beim minimalen Wasser-Glykol-Massenstrom über den LE definiert und dem Planer weitergegeben werden.



Abbildung 15: Verhalten des Druckverlustes resp. Anlagekennlinie mit konstanter (Punkt A) oder drehzahlgestuereten (Punkt B) Pumpe bei Normal- oder Frostschutz-Betrieb.

Das Vorgehen zur Auslegung des Durchgangsventils im Bypass wird in der Abbildung 16 dargestellt. Zuerst muss mit Hilfe der Wärmeübertrager-Kennlinie des a-Wertes (herstellerabhängig) die Ventilautorität  $P_V$  bestimmt werden. Das Ziel ist, die Streckenkennlinie (Verhältnis zwischen Leistung und Ventilhub) linear zu halten. Mit dem Druckverlust des variablen Teils  $\Delta p_{var}$  kann gemäss der Gleichung 2 der Druckverlust  $\Delta p_{v100}$  ermittelt werden.

$P_V = \frac{\Delta p}{\Delta p_{V100}}$	$1 \approx \Delta p_{var}$	(14)
$P_V$	Ventilautorität	[-]
$\Delta p_{V100}$	Druckverlust bei voll geöffnetem Ventil	[bar]
$\Delta p_{var}$	Druckverlust des variablen Teils	[bar]

An.



Abbildung 16: Auslegung des Durchgangsventils, um eine lineare Streckenkennlinie zu erhalten. Bei der Annahme eines a-Wertes von 0.55 und dem Ziel einer linearen Streckenkennlinie ergibt sich ein Pv von 0.45.

# 5.3. Wärmeübertrager

Die Strömung des Wasser-Glykol-Massenstroms im WÜ darf bei minimalem Massenstrom nicht laminar sein. Eine grosse Spreizung zwischen minimalem maximalem Luft-Volumenstrom resp. Wasser-Glykol-Massenstrom ist zu verhindern, damit der Druckverlust bei maximalem Volumenstrom nicht extrem hoch ist.

Die Auswirkungen von turbulenter und laminarer Strömung des Wasser-Glykol-Massenstroms im WÜ auf die Wärmeübertragerleistung ist in Abbildung 17 sehr vereinfacht illustriert. Sobald eine laminare Strömung erreicht wird, verringert sich die Leistung drastisch. Aus diesem Grund sind die Hersteller gezwungen, die WRG bei jedem Wasser-Glykol-Massenstrom im turbulenten Bereich zu betreiben. Demzufolge hat die Auslegung des minimalen Luftvolumenstroms auf den Druckverlust der WÜ einen grossen Einfluss, weil da die Strömung für eine optimale WRG noch immer turbulent sein muss. Ist der minimale Luftvolumenstromklein, werden der Druckverlust und die Pumpenleistung bei maximalem Volumenstrom sehr gross, weil diese in der zweiten resp. dritten Potenz zum Volumenstrom zunehmen. Der Planer ist gezwungen den minimalen und maximalen Luftvolumenstrom zu hinterfragen und sinnvoll zu definieren. Damit die Auslegung optimiert werden kann, müssen die Betriebsstunden bei den jeweiligen Luftvolumenströmen berücksichtigt werden. Sollte der maximalen Volumenstrom mit dem hohe Druckverlust im Zwischenkreis nur wenige Stunden (< 200 h) pro Jahr betrieben werden, hat dies auf die Energie keinen grossen Einfluss.

![](_page_27_Figure_0.jpeg)

Abbildung 17: Auswirkungen von turbulenter und laminarer Strömung des Wasser-Glykol-Massenstromes im WÜ auf die WÜ Leistung. Für eine optimale Wärmeübertragung muss bei Vmin eine turbulente Strömung gewährleistet werden.

#### 5.4. Drehzahlgesteuerte Pumpe

Bei variablem Luft-Massenstrom, Frostschutzbetrieb (totaler Druck reduziert sich beim Öffnen des Ventils) und Teillastbetrieb kann nur eine drehzahlgesteuerte Pumpe den optimalen Wasser-Glykol-Massenstrom sicherstellen. Beim Unterschreiten der kritischen Grenze (minimaler Massenstrom) im Teillastbetrieb kann die WRG ausgeschaltet werden.

Eine drehzahlgesteuerte Pumpe ist für einen optimalen Temperaturänderungsgrad bei variablem Luftvolumenstrom notwendig. Der Vorteil einer solchen Pumpe ist auch beim Frostschutzbetrieb vorhanden. Parallel zum Öffnen des Bypassventils verringert sich der Druckverlust im Zwischenkreis. Bei einer konstanten Pumpe erhöht sich dadurch der Massenstrom und die Pumpenleistung gleichzeitig (vgl. Abbildung 15 Punkt A). Nur mit einer Leistungsanpassung der Pumpe kann Punkt B erreicht werden. Nicht zuletzt kann damit der Massenstrom und dadurch die Leistung der WRG reduziert werden, wenn im Teillastbetrieb die Soll-ZUL-Temperatur überschritten würde. Dieses Phänomen kann z.B. bei hohen internen Lasten oder hohen solaren Gewinnen kombiniert mit einer sehr effizienten Wärmerückgewinnung eintreten.

Da der Massenstrom bei einem KVS die WRG entscheidend beeinflusst, muss dieser gemessen und als Regelgrösse verwendet werden. Wenn keine Messung im Zwischenkreis eingebaut werden kann, gibt es eine zweite Möglichkeit zur Regelung. Neue Pumpen können anhand der Drehzahl und Druckerhöhung den Massenstrom regeln. Dazu müssen bei der Inbetriebnahme die Anlagekennlinie und die dazugehörige Drehzahl, sowie die Druckerhöhung der Pumpe bestimmt werden. Anhand dieser beiden Werte kann die Pumpe anschliessend den Massenstrom ermitteln und diesen bei einer Druckverluständerung konstant halten (z.B. bei einer Druckverluständerung in Folge einer Frostschutzschaltung).

Bei einer drehzahlgesteuerten Pumpe kann theoretisch die WRG bis zu einer sehr geringen Temperaturdifferenz zwischen AUL und ABL (<1K) Energie zurückgewinnen. Praktisch ist das aber nicht umsetzbar, weil die Wärmeübertrager auf den minimalen Luftvolumenstrom resp. Wasser-Glykol-Massenstrom ausgelegt sind. Sobald der Massenstrom im Zwischenkreis unter die kritische Grenze fällt, ist die WRG kaum noch vorhanden. Wird die aufgewendete Energie in die Bilanz integriert, zeigt sich, dass die WRG ausgeschaltet werden muss. Die Möglichkeit, den Massenstrom konstant zu halten, ist auch keine Lösung, da dieser gegenüber der Wärmeübertragerleistung zu hoch ist, dadurch der Temperaturänderungsgrad zusammenfällt (vgl. Abbildung 11) und wiederum die Energiebilanz negativ ausfällt. Der letzte Punkt, der gegen einen Betrieb der WRG bei geringen Temperaturen spricht, ist die Messunsicherheit, die zur Regulierung verwendet wird (vgl. Abschnitt 5.7).

#### 5.5. Frostschutz bei grossen Distanzen im Zwischenkreis - NPSH

Der Frostschutz kann bei Gebäuden mit grossen Distanzen zwischen den Lüftungsanlagen, z. B. bei Hochhäusern, auf zwei mögliche Arten gelöst werden: Entweder auf dem Dach beim ABL Lüftungsgerät oder im Keller beim AUL Lüftungsgerät. Entscheidend ist die Platzierung des Temperaturfühlers im Wasser-Glykol-Massenstrom, dieser sollte so nah wie möglich nach dem Bypass eingebaut werden.

Um die Fläche in der Steigzonen der Lüftungskanäle zu optimieren resp. in jedem Geschoss gleich gross zu erstellen, werden bei Hochhäusern oft die ZUL Lüftungsanlagen im Erd- oder Untergeschoss und die ABL Lüftungsanlagen im obersten Geschoss auf dem Dach platziert (vgl. Abbildung 18). Demzufolge können die Leitungen, welche den LE und LK miteinander verbinden bis zu 100 m lang sein. Der Bypass für den Frostschutz kann auf zwei verschiedene Varianten gelöst werden. Entweder ist der Bypass nahe am LK resp. ABL Lüftungsanlage, oder bei der ZUL Lüftungsanlage. Mit der richtigen Anordnung des Temperaturfühlers kann die Regelung bei beiden Varianten gelöst werden. Der Nachteil der Variante A (Bypass nahe beim LK) ist, dass der NPSH sichergestellt werden muss. Bei der Variante B müssen Sicherheitseinrichtungen z.B. Expansion mit einem höheren Prüfdruck eingebaut werden. Dies ist gegenüber Variante A ein Nachteil.

![](_page_28_Figure_3.jpeg)

Abbildung 18 a-c: a) Anordnung der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen bei einem Hochhaus, damit die Fläche der Steigzone optimiert resp. im jedem Geschoss gleich gross gebaut werden kann. Frostschutz b) beim AUL Lüftungsgerät und c) beim ABL Lüftungsgerät. Wichtig ist, dass die Temperaturmessung des Wasser-Glykol-Massenstroms nahe am Bypass montiert wird, damit keine grossen Verzögerungszeiten entstehen.

Die Auslegung des NPSH ist in der Abbildung 19 illustriert.

![](_page_29_Figure_1.jpeg)

Abbildung 19: Auslegung des NPSH bei einem KVS.

#### 5.6. Temperaturänderungsgrad und ETV

Ein Vergleich des Temperaturänderungsgrades und des ETV bei unterschiedlichen Wasser-Glykol-Masseströmen ist in der Abbildung 20 dargestellt. Während des Betriebs kann der Temperaturänderungsgrad mittels Anpassung des Wasser-Glykol-Massenstromes optimiert werden. Beim ETV hingegen ist eine Optimierung nur bei der Planung möglich, da dieser zum grössten Teil vom Druckverlust des WÜ abhängig ist.

![](_page_29_Figure_5.jpeg)

Abbildung 20: Vergleich des Temperaturänderungsgrad mit dem ETV bei unterschiedlichen Wasser-Glykol-Massenströmen. Sichtbar wird, dass der Temperaturänderungsgrad ein Maximum hat. Im Gegensatz dazu sinkt der ETV mit steigendem Wasser-Glykol-Massenstrom. Aus diesem Grund sollte ein KVS nie mit zu hohem Wasser-Glykol-Massenstrom betrieben werden.

## 5.7. Messgenauigkeit

Die Messmittel resp. deren Messungenauigkeit müssen für einen optimalen Betrieb hinterfragt und die Auswirkungen auf den Temperaturänderungsgrad und ETV überprüft werden. Bei der Kontrolle des Temperaturänderungsgrades und des ETV anhand von Messungen muss eine Temperaturdifferenz zwischen AUL und ABL von > 10 K vorliegen.

Das folgende Beispiel zeigt die Berechnung des Temperaturänderungsgrades (vgl. Kapitel 5.6) inkl. erweiterter Messunsicherheit bei 95 %. Die Unsicherheitsberechnungen (vgl. Anhang) wurden nach dem GUM Verfahren ermittelt. Die Messunsicherheit der Messmittel sind im Anhang aufgelistet.

Mit den folgenden Parametern (vgl. Tabelle 1) ergibt sich eine erweiterte Messunsicherheit von 3.4 %. Dabei wird nur die Unsicherheit der Messmittel berücksichtig. Wenn dazu noch die nicht-ideale Montage der Messmittel und die Temperaturschichtungen hinzugezogen werden, welche sich aufgrund von nur einer Messstelle in einem grossen Lüftungskanal nach einem WÜ auswirken, erhöht dies die erweitere Unsicherheit auf 8 %. Bei beiden Varianten sind die Unsicherheiten des Wasser-Glykol-Massenstroms und der Wärmekapazität vernachlässigt worden. Diese haben ebenfalls einen Einfluss.

Anzeige Aussenlufttemperatur inkl. Messunsicherheit Messgerät	$T_{AUL} = 5 \ ^{\circ}C \pm 0.325$
Anzeige Zulufttemperatur inkl. Messunsicherheit Messgerät	T <sub>ZUL</sub> = 17 °C± 0.385
Anzeige Ablufttemperatur inkl. Messunsicherheit Messgerät	T <sub>ABL</sub> = 22 °C± 0.410
Messabweichungen bei nicht idealer Montage und grossem Lüftungskanal für	$\Delta T_{AUL} = 0.5 \text{ K}$
Aussenlufttemperatur	
Messabweichungen bei nicht idealer Montage und grossem Lüftungskanal für Zulufttemperatur	$\Delta T_{ZUL} = 1 \text{ K}$
Messabweichungen bei nicht idealer Montage und grossem Lüftungskanal für Ablufttemperatur	$\Delta T_{ABL} = 0.5 \text{ K}$
Anzeige Druckdifferenz resp. Luftvolumenstrom inkl. Messunsicherheit Messgerät	Δp = 300 Pa ± 1.5%
	ergibt
	$\dot{V} = 2$ '010 m <sup>3</sup> /h ± 17
Temperaturänderungsgrad exkl. ΔT	$\eta_{ZUL} = 70.6 \% \pm 3.3$
Temperaturänderungsgrad inkl. ΔT	$\eta_{ZUL} = 70.6 \% \pm 8.0$

 Tabelle 1: Variablen und Resultate der erweiterten Messunsicherheitsberechnung nach GUM.

Das Beispiel zeigt, dass bei den Messmitteln nicht gespart werden sollte, da sie zur Regelung und Steuerung der WRG verwendet werden und somit einen grossen Einfluss haben, ob der optimale Betrieb erreicht wird oder nicht.

Zu beachten ist, dass die Messung zur Überprüfung des Temperaturänderungsgrades mit einer möglichst grossen Temperaturdifferenz zwischen AUL und ABL (> 10K) durchgeführt werden sollte, da der Einfluss der Unsicherheiten der Messmittel mit kleinen Temperaturdifferenzen dramatisch zunimmt. Ebenso sind die Installationshinweise für die Messgeräte zwingend zu befolgen. Die Anzahl Messpunkte z.B. in grossen Lüftungskanälen muss geprüft werden.

# 5.8. Kontrolle der Anlage

Nur eine automatisierte und/oder regelmässige Kontrolle stellt eine optimale WRG sicher.

Grundsätzlich ist eine fachmännische Inbetriebnahme bei verschiedenen Betriebsarten eine solide Grundlage für einen optimalen Betrieb der KVS. Trotzdem sollte die Anlage stetig überwacht werden. Dazu ist eine Speicherung der Messdaten zur manuellen oder automatischen Analyse eine optimale Lösung.

Folgende Punkte sind bei einer regemässigen fachmännischen Kontrolle zu beachten:

- Kontrolle der Messmittel inkl. Messunsicherheiten und Montage
- Kontrolle des Temperaturänderungsgrades und ETV (NW und NK im Zwischenkreis ausschalten)
- Kontrolle der Temperaturdifferenzen beim WÜ anhand der Auslegung
- Überprüfung des Massenstromes im Zwischenkreis
- Kontrolle der Pumpensteuerung
- Kontrolle des Bypassventils
- Kontrolle des Wasser-Glykol-Verhältnisses

## 5.9. Optimierungen von bestehenden KVS

- Konstant betriebene Pumpe durch eine drehzahlgesteuerte Pumpe ersetzten. Wenn es nicht möglich oder sinnvoll ist, muss die konstante Pumpe auf den optimalen Massenstrom bei den meisten Betriebsstunden eingestellt werden.
- Dreiwegventil durch ein Durchgangsventil ersetzten.
- Regelung der Pumpe an den optimalen Wasser-Glykol-Massenstrom anpassen und die Steuerung beim Frostschutzbetrieb überprüfen.

#### 6. Richtlinien für einfache KVS

#### 6.1. WÜ im Zwischenkreis

Wärmequellen und –senken im Zwischenkreis beeinflussen auch die WRG und erhöhen die Komplexität für die Steuerung und Regelung massiv. Als erste und höchste Priorität soll das KVS die Aufgabe als WRG optimal umsetzten. Nachwärmer im Zwischenkreis sind gegenüber WÜ im Luftstrom immer im Nachteil. Gleichgestellt oder zum Teil leicht im Vorteil sind Nachkühler im Zwischenkreis. Die ausgelegte VL Temperatur des LE darf während des Betriebs nicht überschritten werden. Das KVS weist wegen des Kühlbetriebs Betriebszeiten ausserhalb der WRG-Zeit auf. Dazu muss ein Bypass für die Kühlung eingeplant werden. Mit WÜ im Zwischenkreis kann der Temperaturänderungsgrad nur rechnerisch oder über die ABL bestimmt werden. Als erste und höchste Priorität soll das KVS die Aufgabe als WRG optimal umsetzten.

Drei Varianten zur Nacherwärmung und –kühlung der ZUL sind in der Abbildung 21 dargestellt. Es besteht die Möglichkeit, die NW und NK aus dem Luftstrom heraus zu nehmen und im Zwischenkreis zu platzieren (vgl. Abbildung 21 a). Für einen identischen Temperaturänderungsgrad bei der WRG muss die LE-Leistung um die NW-Leistung erhöht und somit der LE grösser ausgelegt werden. Bei einfachen KVS ist der Einbau des NW im Zwischenkreis, gegenüber dem Einbau in den Luftstrom(vgl. Abbildung 21 b und c), im Nachteil [18, 19], da der Druckverlust im Luftstrom nicht reduziert wird. Beim NK ist es vorteilhaft diesen im Zwischenkreis einzubauen (vgl. Abbildung 21 b), da der Druckverlust im Luftstrom eingespart werden kann, solange die NK Leistung geringer ist als die WRG Leistung. Bei der Variante NW und NK im Zwischenkreis, ist ein zusätzlicher Wärmeübergang nötig.

![](_page_32_Figure_4.jpeg)

Abbildung 21a-c: Drei verschiedene Varianten wie die Nacherwärmung und -kühlung der ZUL bei einem einfachen System realisiert werden kann. a) NW und NK im Zwischenkreis, b) NW im Luftstrom und NK im Zwischenkreis, c) NW und NK im Luftstrom

Wird der NW trotzdem im Zwischenkreis eingebaut, ist zu beachten, dass die Leistung des LE auf eine bestimmte VL-Temperatur ausgelegt wird. Überschreitet diese während des Betriebs die Auslegungstemperatur, erhöht sich auch die RL-Temperatur des LE. Demzufolge ist die VL-Temperatur des LK höher und die WRG verringert sich. Deswegen ist eine nachträgliche Erhöhung der Soll-ZUL-Temperatur bei Nutzungsänderungen ohne Verringerung des Temperaturänderungsgrades nicht möglich.

Je nach Soll-ZUL-Temperatur variiert auch der optimale Wasser-Glykol-Massenstrom. Die Gleichung 1 gilt demzufolge nicht mehr. In der Abbildung 22 ist der optimale Wasser-Glykol-Massenstrom bei verschiedenen ABL- und Soll-ZUL-Temperaturen dargestellt. Es wird sichtbar, dass bei grösseren Differenzen zwischen ABL- und Soll-ZUL-Temperatur der optimale Temperaturänderungsgrad und der optimale Wasser-Glykol-Massenstrom geringer werden. Eine einheitliche Optimierung gibt es nicht, da der optimale Wasser-Glykol-Massenstrom von der Soll-ZUL-Temperatur und von der WÜ abhängig ist.

![](_page_33_Figure_1.jpeg)

Abbildung 22 a-d: Der optimale Wasser-Glykol-Massenstrom bei verschiedenen ABL- und Soll-ZUL-Temperaturen, wenn der NW im Zwischenkreis eingebaut ist. Es wird sichtbar, dass bei zunehmender Temperaturdifferenz zwischen ZUL Temperatur ohne NW und Soll ZUL Temperatur der optimale Wasser-Glykol-Massenstrom abnimmt. Ebenso sinkt der maximale Temperaturänderungsgrad.

Der Zwischenkreis muss für die Kühlung – in dem meisten Fällen – ausserhalb der WRG-Zeiten in Betrieb genommen werden, da im Sommerfall die warme AUL mit der kühleren ABL heruntergekühlt wird. In der Zeit wo die WRG nicht läuft, aber wegen der Kühlung trotzdem eingeschaltet werden muss, wird gegenüber der Variante NK im Luftstrom der Strombedarf grösser.

![](_page_34_Figure_0.jpeg)

Abbildung 23: Diagramm zur Regelung der WRG und der NW und NK in einer Lüftungsanlage mit adiabater ZUL Temperatur. Sobald der minimale Volumenstrom V<sub>min</sub> unterschritten wird, muss das WRG aus energetischen Gründen ausgeschalten werden.

Eine einfache Kontrolle des Temperaturänderungsgrades (Messung der AUL, ABL und ZUL Temperatur) ist beim NW im Zwischenkreis nicht möglich und muss rechnerisch oder über die ABL-Temperatur ermittelt werden.

#### 6.2. Bypass mit WÜ im Zwischenkreis

Der NW kann vor (Exergieverlust) oder nach (geringere Soll-ZUL-Temperatur) dem Bypass eingebaut werden.

Sobald der NW im Zwischenkreis platziert wird, muss die Position des Bypasses überprüft werden. In der Abbildung 24 a und b sind die zwei Möglichkeiten dargestellt. Der NW kann entweder zwischen Bypass und LE (vgl. Abbildung 24 a) oder zwischen LK und Bypass (vgl. Abbildung 24 b) eingebaut werden. Ersteres hat den Nachteil, dass gegenüber der zweiten Variante mehr Massenstrom über den Bypass fliessen muss um die VL Temperatur in den LK zu halten. Dadurch kann weniger Leistung in die Soll-ZUL übertragen werden. Der Exergieverlust ist bei der zweiten Variante grösser als bei der ersten.

![](_page_35_Figure_0.jpeg)

Abbildung 24 a-b: Zwei verschiedene Varianten den Nacherwärmung in den Zwischenkreis einzubauen. Der Bypass ist a) vor oder b) nach dem NW.

## 7. Richtlinien für KVS-Verbunde

Grundsätzlich sind viele Richtlinien für den Verbund identisch mit der einfachen KVS. So muss u.a. der Wasser-Glykol-Massenstrom auf den Luftvolumenstrom angepasst werden (vgl. Gleichung 1). Zudem besteht die Einfriergefahr beim LK ebenso. Bei der Auslegung der WÜ muss auch die turbulente und laminare Strömung beim Wasser-Glykol-Massenstrom berücksichtigt werden. Zu den vorhandenen Punkten kommen beim Verbund noch einige Punkte dazu, die unten aufgeführt und beschrieben werden.

## 7.1. Einsatzgebiet

Beim Verbinden von mehreren Lüftungsanlagen zu einem KVS-Verbund sind aus hydraulischer Sicht keine Grenzen gesetzt. Damit beurteilt werden kann, ob es energetisch sinnvoll ist, müssen folgende drei Punkte beachtet werden:

#### Betriebsfälle

Bei einer hohen ABL-Temperatur (z.B. Küche) kann es vorkommen, dass bei einer effizienten WRG die Soll-ZUL-Temperatur überschritten wird. Die Wasser-Glykol-Massenströme im Zwischenkreis können theoretisch so angepasst werden, dass die überschüssige Energie einer anderen ZUL Anlage zugutekommt. Die optimale Regelung für solche Betriebspunkte ist aufwändig und sehr komplex.

#### Temperaturniveaus

Die ZUL- und ABL-Temperaturen der verschiedenen Lüftungsanlagen sind für einen Verbund von zentraler Bedeutung. Es ist sinnlos, Anlagen auf verschiedenen Temperaturniveaus miteinander zu verbinden, da die Wasser-Glykol-Massenströme von allen LK zusammengemischt werden. Problematisch wird es, wenn ZUL-Anlagen verschiedene Nutzungen bedienen und diese im Heizbzw. Kühlfall mit Über- und Untertemperaturen betrieben werden. Wenn dann die NW und NK noch im Zwischenkreis sind, kann die KVS nicht optimal betrieben werden.

#### Betriebszeiten

Der letzte und wohl wichtigste Punkt sind die Betriebszeiten. Die Betriebsfälle mit den zu erwartenden Temperaturen müssen mit den Betriebszeiten abgestimmt werden. Um die oben beschriebene theoretisch überschüssige Energie an eine andere ZUL-Anlage übertragen zu können, müssen diese auch gemeinsam betrieben werden.

#### 7.2. Frostschutz

Beim KVS-Verbund hat der Bypass die gleiche Funktion wie beim einfachen KVS und der Bypass zum Frostschutz kann für alle LK gemeinsam erfolgen (vgl. Abbildung 25).

![](_page_37_Figure_0.jpeg)

Abbildung 25: Gemeinsamer Bypass für alle Lüftungsanalgen die zu einem KVS-Verbund zusammengeführt werden.

#### 7.3. Pumpe

Der Massenstrom im Zwischenkreis kann bei einem Verbund eine grössere Differenz zwischen Minimum und Maximum aufweisen. Somit kann eine frequenzgesteuerte Pumpe oft nicht den ganzen Bereich abdecken und eine zweite, parallel geschaltete, Pumpe ist notwendig.

Im Gegensatz zur einfachen Anlage wird die Pumpe auf einen konstanten Druck gesteuert.

#### 7.4. WÜ im Zwischenkreis

Der NW und NK kann bei einem KVS-Verbund ebenfalls im Zwischenkreis eingebaut werden. Die Berücksichtigung der VL-Temperatur ist wie bei den einfachen KVS anzuwenden. In diesem Fall gibt es aber nur einen Standort wo der NW eingebaut werden kann, nämlich zwischen Bypass und LE (vgl. Abbildung 26).

![](_page_37_Figure_7.jpeg)

Abbildung 26: WÜ im Zwischenkreis bei einem KVS-Verbund.

Wie zuvor bei den Betriebszeiten erwähnt, muss die Position des NW in Anbetracht des Heiz- und Kühlbetriebs platziert werden.

## 7.5. Kontrolle der Betriebsweise

Der Temperaturänderungsgrad kann pro Lüftungsanlage bestimmt werden, aber dieser ist nicht repräsentativ, da die Wasser-Glykol-Massenströme nach dem LK zusammengemischt werden. So hat eine Lüftungsanlage mit tiefen Soll-ZUL- und hohen ABL-Temperaturen einen geringeren Temperaturänderungsgrad als andere Analgen. Demzufolge muss der Temperaturänderungsgrad und ETV immer über den gesamten Verbund ermittelt werden.

Die erweiterte Messunsicherheit beim Temperaturänderungsgrad nimmt mit jeder zusätzlich verbundenen Anlage zu, weil mehr Volumen- und Massenströme reguliert werden müssen. Ebenso werden mehr Lufttemperaturen gemessen. Bei jeder zusätzlichen Messung und Regelung entstehen Ungenauigkeiten die den ganzen Zwischenkreis beeinflussen und somit die erweiterte Unsicherheit des ermittelten Temperaturänderungsgrades erhöhen.

# 8. Literaturverweise

- [1] C. Stettler, Simulationsgestützte Optimierung von Kreislaufverbundsystemen in raumlufttechnischen Anlagen, Masterthesis, Hochschule Luzern Technik und Architektur, Horw, 2016.
- [2] VKF 26-03d, Brandschutzrichtlinie Lufttechnische Anlagen, Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen, 2003.
- [3] Ch. Kaup, Hybride Hochleistungs-WRG, HKS Fachjournal 2004/05, 2004
- [4] Ch. Kaup, Mehrfachfunktionale Hochleistungs-Wärmerückgewinnungssysteme, HLH Sonderdruck aus Heft 2, 2009.
- [5] G. Hausladen, M. de Saldanha, W. Nowak, P. Liedl, Einführung in die Bauklimatik, S. 115-116, 2003.
- [6] E. Dreher, Stolpersteine der Wärmerückgewinnung im Kreislaufverbundsystem, Teil 1, HLH Bd. 65, Nr. 2-Februar, 2014, S. 46 bis 50.
- [7] E. Dreher, Stolpersteine der Wärmerückgewinnung im Kreislaufverbundsystem, Teil 2, HLH Bd. 65, Nr. 3-März, 2014, S. 79 bis 83.
- [8] Bundesamt f
  ür Energie BFE, Energiestrategie 2050, http://www.bfe.admin.ch/energiestrategie2050/06445/index.html?lang=de, aufgerufen am 09.06.2016
- [9] C. Stettler, Optimierung von Wärmerückgewinnungsanlagen in Lüftungs- und Klimaanlagen, Vertiefungsarbeit VM1, Hochschule Luzern – Technik und Architektur, Horw, 2014.
- [10] Auswertung des Stromverbrauchs von 13'000 Haushalten, http://www.energieeffizienz.ch/files/Auswertung\_Energybox\_050507.pdf, 29.04.2014
- [11] F. Beutler, C. Stettler, Standardisierung und energetische Optimierung von KVS zur WRG von RLT Anlagen, Bachelordiplomarbeit, Hochschule Luzern – Technik und Architektur, Horw, 2012.
- [12] C. Stettler, Kalibrieren und Validieren von Komponentenmodellen zur Simulation von Kreislaufverbundsystemen, Vertiefungsarbeit VM2, Hochschule Luzern – Technik und Architektur, Horw, 2015.
- [13] C. Kaup, Hybride Hochleistungs-WRG, http://www.umweltcampus.de/ucb/fileadmin/users/156\_c.kaup/dokumente/Hybride\_Hochleistungs-WRG\_auf\_Basis\_des\_Kreislauverbundsystems.pdf, aufgerufen am 22.07.2015.
- [14] C. Kaup, Auswirkungen von Leckagen in RLT-Anlagen auf deren Energiebedarf, HLH Bd. 65, Nr. 2-Februar, 2014, S. 34 bis 40.
- [15] M. Fraass, Höhere Energieeffizienz mit Kreislaufverbundsystemen, Teil 1, HLH Bd. 66, Nr. 3-März, 2015, S. 39 bis 44.
- [16] M. Fraass, Höhere Energieeffizienz mit Kreislaufverbundsystemen, Teil 2, HLH Bd. 66, Nr. 4-April, 2015, S. 40 bis 45.
- [17] M. Fraass, Höhere Energieeffizienz mit Kreislaufverbundsystemen, Teil 3, HLH Bd. 66, Nr. 5-Mai, 2015, S. 42 bis 48.
- [18] A. Abdul, P. Matthes, P. Mathis, D. Müller, G. Hetzel, Modellierung von drei verschiedenen KVS-Ausführungen für eine gekoppelte Anlagen- und Gebäudesimulation Teil 1, HLH Bd. 67, Nr. 2-Februar, 2016, S. 48 bis 50.
- [19] A. Abdul, P. Matthes, P. Mathis, D. Müller, G. Hetzel, Modellierung von drei verschiedenen KVS-Ausführungen für eine gekoppelte Anlagen- und Gebäudesimulation Teil 2, HLH Bd. 67, Nr. 3-März, 2016, S. 52 bis 56.

- [20] Norm SIA 382/1, Lüftungs- und Klimaanlagen Allgemeine Grundlagen und Anforderungen, SIA Schweizerischer Ingenieuren und Architektenverband, 2014.
- [21] Richtlinie SWKI VA300-01, Wärmerückgewinnung in Raumlufttechnischen Anlagen, SWKI Schweizerischer Verein von gebäudetechnik-Ingenieuren, 2009.
- [22] IDA ICE 4.6.2. Indoor Climate and Energy, Gebäudetechniksimulationsprogramm, Stockholm, 2015.
- [23] http://www.apuso.de/wDeutsch/lueftungstechnik/waermerueckgewinnung.php? navanchor=1010005, 02.03.2014
- [24] K. Heini, Skript Ermittlung von Messunsicherheiten nach GUM, Unterrichtsunterlagen, Horw, 2009.
- [25] F. Adunka, Messunsicherheiten, Theorie und Praxis, 3. Auflage, Vulkan-Verlag, 2007
- [26] GUM Workbench 1.2, das Werkzeug zur Ermittlung der Messunsicherheit, Grenznach-Wyhlen.
- [27] C. Kaup, Raumlufttechnik Mehrfachfunktionen, <u>https://www.umwelt-</u> <u>camus.de/ucb/fileadmin/user\_upload/Bilderpool/Labore\_Einrichtungen/Raumlufttechnik/Script</u> <u>e\_Howatherm/RLT\_Mehfachfunktional.pdf</u>, 09.06.2016.
- [28] B. Glück, Vergleichsprozesse der Klimatechnik, Verlag C.F. Müller, 1998, S. 66 bis 101.

# 9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einsparungspotential des Energieaufwands der Pumpe im Zwischenkreis beim	
Einbau eines Durchgangventils im Bypass und einer drehzahlgesteuerten Pumpe.	8
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Referenz-KVS - ein KVS-Verbund mit vier	
Lüftungsanlagen und unterschiedlichen Nutzungen - inkl. Beschriftung der Messpunkte. Mit	
Ausnahme des NK in der Küche, wurden alle NW und NK im Zwischenkreis des KVS-	
Verbunds eingebaut. Für den Kühl- und Frostschutzbetrieb wurde vor resp. nach der Pumpe	
je ein Bypass mit Durchgangsventil eingebaut.	11
Abbildung 3 a-h: Messresultate - Temperaturen und Massenströme der ZUL- und ABL-	
Lüftungsanlagen "Küche" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.	13
Abbildung 4 a-h: Messresultate - Ventilstellungen und Massenströme des Wasser-Glykol-	
Massenstromes bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Küche" für jeweils zwei Tage pro	
Jahreszeit.	14
Abbildung 5 a-h: Messresultate - Ventilstellungen der NW und NK und die VL und RL	
Temperaturen des LE bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Küche" für jeweils zwei Tage	
pro Jahreszeit	15
Abbildung 6: Die Funktion des KVS in einem T-H-Diagramm dargestellt. Der rote Pfeil stellt die	
Abküblung im LK der WRG und der blaue Pfeil die Erwärmung im LE der WRG dar	
Dazwischen liegt der Zwischenkreis welcher mit Wasser-Glykol gefüllt ist. Fix gegeben sind	
die ALII und ABI Temperatur. Diese könne durch die W/RG nicht beeinflusst werden. Ie	
nach Wärmeübertragerfläche verändern sich die mittlere logarithmische Übertemperatur AT	
	10
UES LN UTU LE. Abbildung 7: Ein Boignial aines KVS mit NW und NK im Zwischenkreis [4]	10
Abbildung 9. Ein KVC in einer ZUL, und ADL Lüftungsenlage besteht aus den	19
Abbildung 6. Ein KVS in einer ZUL- und AbL-Lunungsanlage besteht aus den Heuptkomponenten (A) Lufterbitzer (B) Luftkübler (C) Dumpo (D) Debrieitung (C) Ventil und	
Flaupikomponenten. A) Luiternitzer, B) Luitkunier, C) Pumpe, D) Konneitung, E) Ventii und	40
F) Expansion [23].	19
Abbildung 9 a-b: Resultate der Validierung des Komponentenmodelis LE "Nebenraume annand	
der optimalen Parametersets aus der Kalibrierung. a) Die Differenz der Messung und	
Simulation ist mit wenigen Ausnahmen wahrend der gesamten Zeit geringer als die	
Messunsicherheit. b) Weil die Anlage bei der Messung immer in Betrieb war und sich die	
I emperaturen wahrend dieser Zeit stetig veranderten, liegen auch einige Punkte über der	
Messunsicherheit.	20
Abbildung 10: Resultate der Optimierungsvarianten getestet am Reverenz KVS-Verbund anhand	
der Messdaten während einem Jahr. Der ETV wurde auf der Stufe Nutzenergie pro Jahr	
verglichen. Optimierungsvariante 0b und 0c sind Anlage spezifische Massnahmen. Sie	
wurde durch nachträgliche Erhöhung der Zu- und Abluftmenge verursacht. Auf andere	
Anlagen übertragbare Optimierungen sind in Variante 1 bis 4 dargestellt. Mit Ausnahme der	
Variante 3 könne alle Optimierungen nachträglich und sehr einfach umgesetzt werden.	21
Abbildung 11 a-d: Verhalten der Rückwärmezahl resp. des Temperaturänderungsgrades in	
Abhängigkeit des Wasser-Glykol-Massenstroms (als Sole-Pumpenleistung bezeichnet) im	
Zwischenkreis bei konstantem Luftvolumenstrom [27]. a-c) zeigen das Verhalten der Luft-	
und Wasser-Glykol-Temperaturen des KVS bei verändertem Wasser-Glykol-Massenstrom.	
d) Der Betriebspunkt für eine optimale WRG liegt bei 32% der Pumpenleistung.	23
Abbildung 12: Auslegung des optimalen Wasser-Glykol-Massenstroms in Abhängigkeit des	
Luftvolumenstromes anhand der Gleichung 1. Dieses Diagramm kann zur einfachen	
Auslegung und Kontrolle des optimalen Wasser-Glykol-Massenstroms verwendet werden.	
Die Thematik der turbulenten und laminaren Strömung wird im Abschnitt 5.3 erläutert.	24
Abbildung 13 a-b; Richtiger Einbau eines Bypasses inkl. Messung der VL Temperatur in den LK.	
Um das KVS energetisch optimal zu betreiben muss ein Durchgangventil in den Bypass	
eingebaut werden. Die beiden Darstellungen zeigen das KVS während dem a) Frostschutz-	
und dem Normalbetrieb	25
Abbildung 14 a.c. a) Verlauf der Wasser-Glykol-Massenströme im Zwischenkreis. h) der	20
Lufttemperaturen und c) der Temperaturänderungsgrad in Abhängigkeit der ALII	
Temperatur. Der Unterschied zwischen der Retriebsweise Normal und Frostechutz wird	
aufgezeigt. Dabei spielt die Einfriergranze – schald das Kondensat im der ARL eingefriert	
würde - eine grosse Polle. Diese ist abhängig von der Pouert der WÜhned somit vom	
Hereteller Im Froetschutzbetrieb verringert sich der Tempereturänderungsgred, oher die	
nersteller. Im Frostschutzbetrieb verningent sich der Femperäturänderungsgräd, aber die	

Temperaturerhöhung ΔT der AUL bleibt konstant. Ebenfalls reduziert sich der Wasser- Glykol-Massenstrom über den LE.	25
Abbildung 15: Verhalten des Druckverlustes resp. Anlagekennlinie mit konstanter (Punkt A) oder drehzahlgestuereten (Punkt B) Pumpe bei Normal- oder Frostschutz-Betrieb.	26
Bei der Annahme eines a-Wertes von 0.55 und dem Ziel einer linearen Streckenkennlinie zu ernalten.	27
Abhildung 17: Auswirkungen von turbulenter und laminarer Strömung des Wasser-Glykol-	21
Massenstromes im WÜ auf die WÜ Leistung. Für eine optimale Wärmeübertragung muss bei V <sub>min</sub> eine turbulente Strömung gewährleistet werden.	28
Abbildung 18 a-c: a) Anordnung der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen bei einem Hochhaus, damit die Fläche der Steigzone optimiert resp. im jedem Geschoss gleich gross gebaut werden kann. Frostschutz b) beim AUL Lüftungsgerät und c) beim ABL Lüftungsgerät. Wichtig ist, dass die Temperaturmessung des Wasser-Glykol-Massenstroms nahe am Bypass montiert	
wird, damit keine grossen Verzogerungszeiten entstehen.	29
Abbildung 19: Auslegung des NPSH bei einem KVS.	30
Wasser-Glykol-Massenströmen. Sichtbar wird, dass der Temperaturänderungsgrad ein Maximum hat. Im Gegensatz dazu sinkt der ETV mit steigendem Wasser-Glykol- Massenstrom. Aus diesem Grund sollte ein KVS nie mit zu hohem Wasser-Glykol-	
Massenstrom betrieben werden.	30
Abbildung 21a-c: Drei verschiedene Varianten wie die Nacherwärmung und –kühlung der ZUL bei einem einfachen System realisiert werden kann. a) NW und NK im Zwischenkreis, b) NW im	
Luftstrom und NK im Zwischenkreis, c) NW und NK im Luftstrom	33
Abbildung 22 a-d: Der optimale Wasser-Glykol-Massenstrom bei verschiedenen ABL- und Soll- ZUL-Temperaturen, wenn der NW im Zwischenkreis eingebaut ist. Es wird sichtbar, dass bei zunehmender Temperaturdifferenz zwischen ZUL Temperatur ohne NW und Soll ZUL	
Temperatur der optimale Wasser-GlykolMassenstrom abnimmt. Ebenso sinkt der maximale	~ 4
I emperaturanderungsgrad.	34
Abbildung 23: Diagramm zur Regelung der WRG und der NW und NK in einer Luitungsanlage mit	
muss das WPC aus energetischen Gründen ausgeschalten werden	35
Abhildung 24 a-b. Zwei verschiedene Varianten den Nacherwärmung in den Zwischenkreis	55
einzubauen. Der Bypass ist a) vor oder b) nach dem NW	36
Abbildung 25: Gemeinsamer Bypass für alle Lüftungsanalgen die zu einem KVS-Verbund	
zusammengeführt werden.	38
Abbildung 26: WÜ im Zwischenkreis bei einem KVS-Verbund.	38
Abbildung 26 a-h: Messresultate - Temperaturen und Massenströme der ZUL- und ABL-	
Lüftungsanlagen "Nebenräume" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.	48
Abbildung 6 a-h: Messresultate - Ventilstellungen und Massenströme des Wasser-Glykol-	
Massenstromes bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Nebenräume" für jeweils zwei Tage	
pro Jahreszeit.	49
Abbildung 7 a-h: Messresultate - Ventilstellungen der NW und NK und die VL und RL	
Temperaturen des LE bei der ZUL- und ABL-Luftungsanlagen "Nebenraume" für jeweils zwei	
Lage pro Janreszeit.	50
Abbildung 8 a-n: Messresultate - Temperaturen und Massenstrome der ZUL- und ABL-	51
Abbildung 9 a.h: Messresultate - Ventilstellungen und Massenströme des Wasser-Glukol-	51
Abbildung 9 a-n. Messresultate - Ventilsteilungen und Massenstionne des Wasser-Glykor-	
Massenstromes bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Cafeteria" für jeweils zwei Tage pro	
Massenstromes bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Cafeteria" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.	52
Massenstromes bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Cafeteria" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit. Abbildung 10 a-h: Messresultate - Ventilstellungen der NW und NK und die VL und RL	52
Massenstromes bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Cafeteria" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit. Abbildung 10 a-h: Messresultate - Ventilstellungen der NW und NK und die VL und RL Temperaturen des LE bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Cafeteria" für jeweils zwei Tage pro	52
Massenstromes bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Cafeteria" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit. Abbildung 10 a-h: Messresultate - Ventilstellungen der NW und NK und die VL und RL Temperaturen des LE bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Cafeteria" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.	52 53

Abbildung 12 a-h: Messresultate - Ventilstellungen und Massenströme des Wasser-Glykol-	
Massenstromes bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Restaurant" für jeweils zwei Tage	
pro Jahreszeit.	55
Abbildung 13 a-h: Messresultate - Ventilstellungen der NW und NK und die VL und RL	
Temperaturen des LE bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Restaurant" für jeweils zwei	
Tage pro Jahreszeit.	56
Abbildung 14 a-h: Messresultate – Frequenz der Pumpe und der totale Wasser-Glykol-	
Massenstrom des Zwischenkreises für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.	57
Abbildung 15 a-h: Messresultate – Temperaturen des Wasser-Glykol-Massenstroms im	
Zwischenkreises und die Ventilstellung für den Frostschutz (Y51) und Kühlfall (Y52) für	
jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.	58

# Anhang

# Messpunkte und Messgeräte der Referenzanlage

Messpunkt		Messgerät			
Bezeichnung	Anlage	Name	Einheit	Hersteller	Тур
T30	WRG ZK	RL vor Bypass Temperatur	°C	Sensortec	TF150-I
T31	WRG ZK	RL nach Bypass Temperatur	°C	Sensortec	TF150-I
T32	WRG ZK	VL nach Bypass Temperatur	°C	Sensortec	TF150-I
Т33	WRG ZK	VL vor Bypass Temperatur	°C	Sensortec	TF150-I
M41	WRG ZK	Pumpe 1	-	Grundfos	CRE 10-6
M41	WRG ZK	Pumpe 1 Frequenz	Hz	Grundfos	CRE 10-6
M42	WRG ZK	Pumpe 2	-	Grundfos	CRE 10-6
M42	WRG ZK	Pumpe 2 Frequenz	Hz	Grundfos	CRE 10-6
Y51	WRG ZK	Ventil 1 Frostschutz Stellsignal	%	Belimo	EP032R+MP
Y52	WRG ZK	Ventil 2 Frostschutz Stellsignal	%	Belimo	EP050R+MP
1.T10	Küche	AUL Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
1.T12	Küche	ZUL nach WRG Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
1.T13	Küche	ZUL Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
1.T19	Küche	ZUL Sollwert Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
1.Y10	Küche	Ventil LE Stellsignal	%	Belimo	EP032R+MP
1dp14	Küche	ZUL Volumenstrom	m³/h	WIKA	Air-2-Gide
2.T10	Nebenraum	AUL Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
2.T12	Nebenraum	ZUL nach WRG Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
2.T13	Nebenraum	ZUL Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
2.T19	Nebenraum	ZUL Sollwert Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
2.Y10	Nebenraum	Ventil LE Stellsignal	%	Belimo	EP020R+MP
2dp14	Nebenraum	ZUL Volumenstrom	m³/h	WIKA	Air-2-Gide
3.T10	Cafeteria	AUL Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
3.T12	Cafeteria	ZUL nach WRG Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
3.T13	Cafeteria	ZUL Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
3.T19	Cafeteria	ZUL Sollwert Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
3.Y10	Cafeteria	Ventil LE Stellsignal	%	Belimo	EP025R+MP
3dp14	Cafeteria	ZUL Volumenstrom	m³/h	WIKA	Air-2-Gide
4.T10	Restaurant	AUL Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
4.T12	Restaurant	ZUL nach WRG Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
4.T13	Restaurant	ZUL Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
4.T19	Restaurant	ZUL Sollwert Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
4.Y10	Restaurant	Ventil LE Stellsignal	%	Belimo	EP025R+MP
4dp14	Restaurant	ZUL Volumenstrom	m³/h	WIKA	Air-2-Gide
1.T20	Küche	ABL Temperatur	°C	Sensortec	KHT200-I
1.T22	Küche	FOL nach WRG Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
1.F20	Küche	ABL Feuchte	%	Sensortec	KHT200-I
1.Y20	Küche	Ventil LK Stellsignal	%	Belimo	EP032R+MP
1.dp24	Küche	ABL Volumenstrom	m³/h	WIKA	Air-2-Gide

Tabelle 2: Übersicht der Messpunkte und Messgeräte der Referenzanlage.

2.T20	Nebenraum	ABL Temperatur	°C	Sensortec	KHT200-I
2.T22	Nebenraum	FOL nach WRG Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
2.F20	Nebenraum	ABL Feuchte	%	Sensortec	KHT200-I
2.Y20	Nebenraum	Ventil LK Stellsignal	%	Belimo	EP020R+MP
2.dp24	Nebenraum	ABL Volumenstrom	m³/h	WIKA	Air-2-Gide
3.T20	Cafeteria	ABL Temperatur	°C	Sensortec	KHT200-I
3.T22	Cafeteria	FOL nach WRG Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
3.F20	Cafeteria	ABL Feuchte	%	Sensortec	KHT200-I
3.Y20	Cafeteria	Ventil LK Stellsignal	%	Belimo	EP025R+MP
3.dp24	Cafeteria	ABL Volumenstrom	m³/h	WIKA	Air-2-Gide
4.T20	Restaurant	ABL Temperatur	°C	Sensortec	KHT200-I
4.T22	Restaurant	FOL nach WRG Temperatur	°C	Sensortec	KF250-I
4.F20	Restaurant	ABL Feuchte	%	Sensortec	KHT200-I
4.Y20	Restaurant	Ventil LK Stellsignal	%	Belimo	EP025R+MP
4.dp24	Restaurant	ABL Volumenstrom	m³/h	WIKA	Air-2-Gide
1.T34	Küche	VL LE Temperatur	°C	Sensortec	TF150-I
1.T35	Küche	RL LE Temperatur	°C	Sensortec	TF150-I
2.T34	Nebenraum	VL LE Temperatur	°C	Sensortec	TF150-I
2.T35	Nebenraum	RL LE Temperatur	°C	Sensortec	TF150-I
3.T34	Cafeteria	VL LE Temperatur	°C	Sensortec	TF150-I
3.T35	Cafeteria	RL LE Temperatur	°C	Sensortec	TF150-I
4.T34	Restaurant	VL LE Temperatur	°C	Sensortec	TF150-I
4.T35	Restaurant	RL LE Temperatur	°C	Sensortec	TF150-I
1.Y.72	Küche	Ventil NW Stellsignal	%	Belimo	R423
1.Y.74	Küche	Ventil NK Stellsignal	%	Belimo	R423
2.Y.72	Nebenraum	Ventil NW Stellsignal	%	Belimo	R419
2.Y.74	Nebenraum	Ventil NK Stellsignal	%	Belimo	R419
3.Y.72	Cafeteria	Ventil NW Stellsignal	%	Belimo	R417
3.Y.74	Cafeteria	Ventil NK Stellsignal	%	Belimo	R431
4.Y.72	Restaurant	Ventil NW Stellsignal	%	Belimo	R431
4.Y.74	Restaurant	Ventil NK Stellsignal	%	Belimo	R431

# Spezifikation Messgeräte

# Temperaturfühler

Fabrikat:	Sensortec
Тур:	TF150-I
Messbereich:	-50 bis 50 °C
Messunsicherheit:	DIN Klasse B (Δt = ±(0.3+0.005* t ))

# Temperaturfühler

Fabrikat:	Sensortec
Тур:	KF250-I
Messbereich:	-50 bis 120 °C
Messunsicherheit:	DIN Klasse B ( $\Delta t = \pm (0.3 + 0.005^* t )$ )

# Temperatur und relative Feuchte Fühler

Fabrikat:	Sensortec
Тур:	KHT200-I
Messbereich:	-50 bis 120 °C / 25 bis 90% r.F.
Messunsicherheit:	± 0.5 K / ± 2 %

#### **Druck Transmitter**

Fabrikat	WIKA
Тур:	Air-2-Gide
Messbereich:	0 – 2000 Pa
Messunsicherheit:	± 1.5%

![](_page_47_Figure_0.jpeg)

#### Messresultate Lüftungsanlage Nebenräume

Abbildung 27 a-h: Messresultate - Temperaturen und Massenströme der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Nebenräume" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.

![](_page_48_Figure_0.jpeg)

Abbildung 28 a-h: Messresultate - Ventilstellungen und Massenströme des Wasser-Glykol-Massenstromes bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Nebenräume" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.

![](_page_49_Figure_0.jpeg)

Abbildung 29 a-h: Messresultate - Ventilstellungen der NW und NK und die VL und RL Temperaturen des LE bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Nebenräume" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.

![](_page_50_Figure_0.jpeg)

#### Messresultate Lüftungsanlage Cafeteria

Abbildung 30 a-h: Messresultate - Temperaturen und Massenströme der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Cafeteria" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.

![](_page_51_Figure_0.jpeg)

Abbildung 31 a-h: Messresultate - Ventilstellungen und Massenströme des Wasser-Glykol-Massenstromes bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Cafeteria" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.

![](_page_52_Figure_0.jpeg)

Abbildung 32 a-h: Messresultate - Ventilstellungen der NW und NK und die VL und RL Temperaturen des LE bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Cafeteria" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.

![](_page_53_Figure_0.jpeg)

#### Messresultate Lüftungsanlage Restaurant

Abbildung 33 a-h: Messresultate - Temperaturen und Massenströme der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Restaurant" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.

![](_page_54_Figure_0.jpeg)

Abbildung 34 a-h: Messresultate - Ventilstellungen und Massenströme des Wasser-Glykol-Massenstromes bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Restaurant" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.

![](_page_55_Figure_0.jpeg)

Abbildung 35 a-h: Messresultate - Ventilstellungen der NW und NK und die VL und RL Temperaturen des LE bei der ZUL- und ABL-Lüftungsanlagen "Restaurant" für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.

![](_page_56_Figure_0.jpeg)

#### Messresultate KVS Zwischenkreis

Abbildung 36 a-h: Messresultate – Frequenz der Pumpe und der totale Wasser-Glykol-Massenstrom des Zwischenkreises für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.

![](_page_57_Figure_0.jpeg)

Abbildung 37 a-h: Messresultate – Temperaturen des Wasser-Glykol-Massenstroms im Zwischenkreises und die Ventilstellung für den Frostschutz (Y51) und Kühlfall (Y52) für jeweils zwei Tage pro Jahreszeit.

# Berechnung der erweiterten Messunsicherheit

Messunsich	erheit Kü	che	
Autor: Stettler			
Modellaleich	una:		
n = Q <sub>aba</sub>	/Qunton:		
	n untenn moto tot	12600	
Q <sub>oben</sub> = r Q <sub>unten</sub> = r	n * c <sub>Luft</sub> * ΔΤ <sub>c</sub> n * c <sub>Luft</sub> * ΔΤ <sub>u</sub>	<sub>oben</sub> / 3600 ; <sub>nten</sub> / 3600 ;	
ΔT <sub>oben</sub> = ΔT <sub>unten</sub> =	T <sub>ZUL</sub> - T <sub>AUL</sub> ; T <sub>ABL</sub> - T <sub>AUL</sub> ;		
T <sub>AUL</sub> = T	αυμίνο - ΔΤαυ	$-\Delta T_{AUI}$ Schichtung	
$T_{ZUL} = T_{2}$	ZULIND - ATZU	L - $\Delta T_{ZULSchichtung}$	
T <sub>ABL</sub> = T	ABLIND - ATAB	L - $\Delta T_{ABLSchichtung}$	
m = V * 1	'ho'		
111 ¥ 1	,		
V = K * s	sqrt( (Δp <sub>IND</sub>	∆p) * 2 / rho) ;	
Liste der Grö	ßen:	1	
Größe	Einheit		
n	-		
Q <sub>oben</sub>	KVV	Thermische Leistung - WRG (AUL, ZUL)	
	1/1/1	Libermische Leistung - Potential (ALIL ARL)	
Q <sub>unten</sub>	KVV		
Q <sub>unten</sub> m	kg/h	Massenstrom Luft	
Q <sub>unten</sub> m C <sub>Luft</sub>	kg/h kJ/kg K	Massenstrom Luft spezifische Wärmekapazität Luft	
Q <sub>unten</sub> M C <sub>Luft</sub> ∆T <sub>oben</sub>	kg/h kJ/kg K K	Massenstrom Luft spezifische Wärmekapazität Luft Temperaturdifferenz AUL, ZUL	
C <sub>Luft</sub> ΔT <sub>oben</sub>	kg/h kJ/kg K K K	Massenstrom Luft spezifische Wärmekapazität Luft Temperaturdifferenz AUL, ZUL Temperaturdifferenz AUL, ABL	
Q <sub>unten</sub> m ΔT <sub>oben</sub> ΔT <sub>unten</sub> T <sub>ZUL</sub>	kg/h kJ/kg K K K °C	Massenstrom Luft spezifische Wärmekapazität Luft Temperaturdifferenz AUL, ZUL Temperaturdifferenz AUL, ABL Lufttemperatur ZUL	
Q <sub>unten</sub> C <sub>Luft</sub> ΔT <sub>oben</sub> ΔT <sub>unten</sub> T <sub>ZUL</sub> T <sub>AUL</sub>	kg/h kJ/kg K K K °C °C	Massenstrom Luft spezifische Wärmekapazität Luft Temperaturdifferenz AUL, ZUL Temperaturdifferenz AUL, ABL Lufttemperatur ZUL Lufttemperatur AUL	
Q <sub>unten</sub> m C <sub>Luft</sub> ΔT <sub>oben</sub> ΔT <sub>unten</sub> T <sub>ZUL</sub> T <sub>AUL</sub> T <sub>ABL</sub>	kg/h kJ/kg K K K ℃ ℃	Massenstrom Luft spezifische Wärmekapazität Luft Temperaturdifferenz AUL, ZUL Temperaturdifferenz AUL, ABL Lufttemperatur ZUL Lufttemperatur AUL Lufttemperatur ABL	
Q <sub>unten</sub> m C <sub>Luft</sub> ΔT <sub>oben</sub> ΔT <sub>unten</sub> T <sub>ZUL</sub> T <sub>AUL</sub> T <sub>AUL</sub> T <sub>ABL</sub>	kg/h kJ/kg K K ℃ ℃ ℃	Massenstrom Luft spezifische Wärmekapazität Luft Temperaturdifferenz AUL, ZUL Temperaturdifferenz AUL, ABL Lufttemperatur ZUL Lufttemperatur AUL Lufttemperatur ABL Messwert Lufttemperatur AUL	
Q <sub>unten</sub> m C <sub>Luft</sub> ΔT <sub>oben</sub> ΔT <sub>unten</sub> T <sub>ZUL</sub> T <sub>AUL</sub> T <sub>ABL</sub> T <sub>AULIND</sub> ΔT <sub>AUL</sub>	kg/h kJ/kg K K ℃ ℃ ℃	Massenstrom Luft spezifische Wärmekapazität Luft Temperaturdifferenz AUL, ZUL Temperaturdifferenz AUL, ABL Lufttemperatur ZUL Lufttemperatur AUL Lufttemperatur ABL Messwert Lufttemperatur AUL Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur AUL	
Q <sub>unten</sub> C <sub>Luft</sub> ΔT <sub>oben</sub> ΔT <sub>unten</sub> T <sub>Z</sub> UL T <sub>AUL</sub> T <sub>AUL</sub> ΔT <sub>AULIND</sub> ΔT <sub>AUL</sub> Schichtung	kg/h kJ/kg K K ℃ ℃ ℃ ℃	Massenstrom Luft spezifische Wärmekapazität Luft Temperaturdifferenz AUL, ZUL Temperaturdifferenz AUL, ABL Lufttemperatur ZUL Lufttemperatur AUL Lufttemperatur ABL Messwert Lufttemperatur AUL Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur AUL Messunsicherheit nicht Korrekte Montageder Messgeräte Lur AUL	fttemperatur
Q <sub>unten</sub> C <sub>Luft</sub> ΔT <sub>oben</sub> ΔT <sub>unten</sub> T <sub>Z</sub> UL T <sub>AUL</sub> T <sub>AUL</sub> ΔT <sub>AUL</sub> ΔT <sub>AUL</sub> ΔT <sub>AUL</sub> ΔT <sub>AUL</sub> ΔT <sub>AUL</sub>	kg/h kJ/kg K K ℃ ℃ ℃ ℃ ℃	Massenstrom Luft spezifische Wärmekapazität Luft Temperaturdifferenz AUL, ZUL Temperaturdifferenz AUL, ABL Lufttemperatur ZUL Lufttemperatur AUL Lufttemperatur ABL Messwert Lufttemperatur AUL Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur AUL Messunsicherheit nicht Korrekte Montageder Messgeräte Lu AUL Messwert Lufttemperatur ZUL	fttemperatur
Q <sub>unten</sub> m C <sub>Luft</sub> ΔT <sub>oben</sub> ΔT <sub>unten</sub> T <sub>ZUL</sub> T <sub>AUL</sub> T <sub>AUL</sub> ΔT <sub>AUL</sub> ΔT <sub>AUL</sub> ΔT <sub>AULSchichtung</sub> T <sub>ZULIND</sub> ΔT <sub>ZUL</sub>	kg/h kJ/kg K K ℃ ℃ ℃ ℃ ℃	Massenstrom Luft         spezifische Wärmekapazität Luft         Temperaturdifferenz AUL, ZUL         Temperaturdifferenz AUL, ABL         Lufttemperatur ZUL         Lufttemperatur AUL         Lufttemperatur ABL         Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur AUL         Messunsicherheit nicht Korrekte Montageder Messgeräte Luf         AUL         Messunsicherheit nicht Korrekte Montageder Messgeräte Luf         Messunsicherheit nicht Korrekte Montageder Messgeräte Luf         Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur ZUL	fttemperatur
Q <sub>unten</sub> m C <sub>Luft</sub> ΔT <sub>oben</sub> ΔT <sub>oben</sub> T <sub>ZUL</sub> T <sub>AUL</sub> T <sub>AUL</sub> ΔT <sub>AUL</sub> ΔT <sub>AUL</sub> ΔT <sub>AUL</sub> ΔT <sub>ZULIND</sub> ΔT <sub>ZUL</sub>	kg/h kJ/kg K K K ℃ ℃ ℃ ℃ ℃ ℃ ℃ ℃	Massenstrom Luft         spezifische Wärmekapazität Luft         Temperaturdifferenz AUL, ZUL         Temperaturdifferenz AUL, ABL         Lufttemperatur ZUL         Lufttemperatur AUL         Lufttemperatur ABL         Messwert Lufttemperatur AUL         Messunsicherheit nicht Korrekte Montageder Messgeräte Lu         AUL         Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur ZUL         Messunsicherheit Nessgerät Lufttemperatur ZUL         Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur ZUL         Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur ZUL         Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur ZUL	fttemperatur
Q <sub>unten</sub> m C <sub>Luft</sub> ΔT <sub>oben</sub> ΔT <sub>unten</sub> T <sub>Z</sub> UL T <sub>A</sub> UL T <sub>A</sub> UL ΔT <sub>A</sub> UL ΔT <sub>A</sub> UL ΔT <sub>A</sub> UL ΔT <sub>A</sub> UL ΔT <sub>Z</sub> UL	kg/h           kg/h           KJ/kg K           K           °	Massenstrom Luft         spezifische Wärmekapazität Luft         Temperaturdifferenz AUL, ZUL         Temperaturdifferenz AUL, ABL         Lufttemperatur ZUL         Lufttemperatur AUL         Lufttemperatur ABL         Messwert Lufttemperatur AUL         Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur AUL         Messwert Lufttemperatur ZUL         Messunsicherheit nicht Korrekte Montageder Messgeräte Lu         AUL         Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur ZUL         Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur ZUL         Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur ZUL         Messunsicherheit AUL         Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur ZUL         Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur ZUL         Messunsicherheit AUL	fttemperatur
Q <sub>unten</sub> m C <sub>Luft</sub> ΔT <sub>oben</sub> ΔT <sub>unten</sub> T <sub>Z</sub> UL T <sub>A</sub> UL T <sub>A</sub> UL ΔT <sub>A</sub> UL ΔT <sub>A</sub> UL ΔT <sub>A</sub> UL ΔT <sub>Z</sub> ULSchichtung T <sub>A</sub> ULSchichtung ΔT <sub>Z</sub> ULSchichtung ΔT <sub>A</sub> UL	kg/h           kJ/kg K           K           °C           °C      °	Massenstrom Luft         spezifische Wärmekapazität Luft         Temperaturdifferenz AUL, ZUL         Temperaturdifferenz AUL, ABL         Lufttemperatur ZUL         Lufttemperatur AUL         Lufttemperatur ABL         Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur AUL         Messunsicherheit nicht Korrekte Montageder Messgeräte Luf         AUL         Messunsicherheit nicht Korrekte Montageder Messgeräte Luf         Messunsicherheit Nessgerät Lufttemperatur ZUL         Messunsicherheit Nicht Korrekte Montageder Messgeräte Lur         ZUL         Messunsicherheit Nessgerät Lufttemperatur ABL	fttemperatur
Qunten m CLuft ΔToben ΔTunten TZUL TAUL TAUL TAULIND ΔTAULSchichtung TZULIND ΔTZULSchichtung TZULSchichtung ΔTZULSchichtung ΔTABLIND ΔTABL	kg/h kJ/kg K K K °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C	Massenstrom Luft         spezifische Wärmekapazität Luft         Temperaturdifferenz AUL, ZUL         Temperaturdifferenz AUL, ABL         Lufttemperatur ZUL         Lufttemperatur AUL         Lufttemperatur ABL         Messunsicherheit Messgerät Lufttemperatur AUL         Messunsicherheit nicht Korrekte Montageder Messgeräte Lur         ZUL         Messunsicherheit nicht Korrekte Montageder Messgeräte Lur         ZUL         Messunsicherheit nicht Korrekte Montageder Messgeräte Lur         ZUL         Messunsicherheit nicht Korrekte Montageder Messgeräte Lur         ABL	fttemperatur fttemperatur

Generiert mit GUM Workbench Pro Version 2.4.1.344

		Messunsicherheit Küche	
Größe	Finheit	Definition	
rho	ka/m3		
К	-	Faktor Ventilator	
ΔΡιμα	Pa	Druckdifferenz an der Düse des Ventilators	
∆p	Pa	Messunsicherheit Messgerät Druckdifferenz	
c <sub>Luft</sub> :	Konstan Wert: 1.1	ite 006 kJ/kg K	
T <sub>AULIND</sub> :	Konstan Wert: 5	te °C	
ΔT <sub>AUL</sub> :	Typ B R Wert: 0 Halbbre	echteckverteilung °C ite der Grenzen: 0.325 °C	
<b>ΔT</b> <sub>AULSchichtung</sub> :	Typ B R Wert: 0 Halbbre	echteckverteilung °C ite der Grenzen: 0 °C	
T <sub>ZULIND</sub> :	Konstan Wert: 17	te <sup>∞</sup> C	
ΔT <sub>ZUL</sub> :	Typ B R Wert: 0 Halbbre	echteckverteilung ℃ ite der Grenzen: 0.385 ℃	
<b>ΔT</b> <sub>ZULSchichtung</sub> :	Typ B R Wert: 0 Halbbre	echteckverteilung °C ite der Grenzen: 0 °C	
T <sub>ABLIND</sub> :	Konstan Wert: 22	te 2 °C	
ΔT <sub>ABL</sub> :	Typ B R Wert: 0 Halbbre	echteckverteilung °C ite der Grenzen: 0.41 °C	
<b>ΔT</b> <sub>ABLSchichtung</sub> :	Typ B R Wert: 0 Halbbre	echteckverteilung °C ite der Grenzen: 0 °C	
rho:	Konstan Wert: 1.:	ite 2 kg/m3	
К:	Konstan Wert: 89	te 9.9 -	
Δp <sub>IND</sub> :	Konstan Wert: 30	ite 00 Pa	
Datum: 28.11.2016	Datei: KVS	WRG Testberechnung für Bericht.smu	Seite 2 von 11

Generiert mit GUM Workbench Pro Version 2.4.1.344

<i>ι</i> ρ:	T	t		
	Typ B Rech Wert: 0 Pa Halbbreite c	teckverteilung der Grenzen: 4.5 F	a	
wischene	ergebnisse:			
Größe	Wert	StdMess- unsicherheit		
Q <sub>oben</sub>	8.089 kW	0.199 kW		
Q <sub>unten</sub>	11.460 kW	0.210 kW		
m	2412.3 kg/h	10.4 kg/h		
∆T <sub>oben</sub>	12.000 K	0.291 K		
∆T <sub>unten</sub>	17.000 K	0.302 K		
T <sub>ZUL</sub>	17.000 °C	0.222 °C		
T <sub>AUL</sub>	5.000 °C	0.188 °C		
T <sub>ABL</sub>	22.000 °C	0.237 °C		
V	2010.23 m3/h	8.70 m3/h		

Generiert mit GUM Workbench Pro Version 2.4.1.344

Q <sub>oben</sub> Q <sub>unten</sub>	0 000 1441	StdMess- unsicherheit	Verteilung	Sensitivitäts- koeffizient	heitsbeitrag	Index
Q <sub>unten</sub>	0.009 KVV	0.199 kW			07	
m	11.460 kW	0.210 kW				
20,000	2412.3 kg/h	10.4 kg/h				
C <sub>Luft</sub>	1.006 kJ/kg K					
$\Delta T_{oben}$	12.000 K	0.291 K				
$\Delta T_{unten}$	17.000 K	0.302 K				
T <sub>ZUL</sub>	17.000 °C	0.222 °C				
T <sub>AUL</sub>	5.000 °C	0.188 °C				
T <sub>ABL</sub>	22.000 °C	0.237 °C	2			
TAULIND	5.0 °C					
ΔT <sub>AUL</sub>	0.0 °C	0.188 °C	Rechteck	0.017	3.2·10 <sup>-3</sup> -	3.8 %
∆T <sub>AULSchichtung</sub>	0.0 °C	0.0 °C	Rechteck	0.0	0.0 -	0.0 %
TZULIND	17.0 °C					
$\Delta T_{ZUL}$	0.0 °C	0.222 °C	Rechteck	-0.059	-0.013 -	61.5 %
$\Delta T_{ZULSchichtung}$	0.0 °C	0.0 °C	Rechteck	0.0	0.0 -	0.0 %
TABLIND	22.0 °C					
ΔT <sub>ABL</sub>	0.0 °C	0.237 °C	Rechteck	0.042	9.8·10 <sup>-3</sup> -	34.7 %
$\Delta T_{ABLSchichtung}$	0.0 °C	0.0 °C	Rechteck	0.0	0.0 -	0.0 %
V	2010.23 m3/h	8.70 m3/h				
rho	1.2 kg/m3					
К	89.9 -					
Δp <sub>IND</sub>	300.0 Pa					
Δp	0.0 Pa	2.60 Pa	Rechteck	0.0	0.0 -	0.0 %
n	0.7059 -	0.0167 -				
Ergebnisse:						
Größe	Wert	ErwMess- unsicherheit	Erweite ungsfakt	r- Übe or wahrs	rdeckungs- cheinlichkeit	
n 0.706 -		0.033 -	2.00 95% (No		% (Normal)	

8.089 kW 11.460 kW 2412.3 kg/h 1.006 kJ/kg K 12.000 K	0.479 kW 0.346 kW 10.4 kg/h			<b>_</b>	
11.460 kW 2412.3 kg/h 1.006 kJ/kg K 12.000 K	0.346 kW 10.4 kg/h				
2412.3 kg/h 1.006 kJ/kg K 12.000 K	10.4 kg/h				
1.006 kJ/kg K 12.000 K					
12.000 K	1 N				
	0.708 K				
17.000 K	0.508 K				
17.000 °C	0.619 °C				
5.000 °C	0.344 °C				
22.000 °C	0.373 °C				
5.0 °C					
0.0 °C	0.188 °C	Rechteck	0.017	3.2·10 <sup>-3</sup> -	0.7 %
0.0 °C	0.289 °C	Rechteck	0.017	5.0·10 <sup>-3</sup> -	1.6 %
17.0 °C					
0.0 °C	0.222 °C	Rechteck	-0.059	-0.013 -	10.7 %
0.0 °C	0.577 °C	Rechteck	-0.059	-0.034 -	72.1 %
22.0 °C					
0.0 °C	0.237 °C	Rechteck	0.042	9.8·10 <sup>-3</sup> -	6.0 %
0.0 °C	0.289 °C	Rechteck	0.042	0.012 -	9.0 %
2010.23 m3/h	8.70 m3/h				
1.2 kg/m3					
89.9 -					
300.0 Pa					
0.0 Pa	2.60 Pa	Rechteck	0.0	0.0 -	0.0 %
0.7059 -	0.0400 -				
Wert	ErwMess- unsicherheit	Erweiter ungsfakt	r- Übe or wahrs	rdeckungs- cheinlichkeit	
		2.00 95% (Normal)		% (Normal)	
	17.000 °C 5.000 °C 22.000 °C 5.0 °C 0.0 °C 17.0 °C 0.0 °C 0.0 °C 22.0 °C 0.0 °C 22.0 °C 0.0 °C 2010.23 m3/h 1.2 kg/m3 89.9 - 300.0 Pa 0.0 Pa 0.7059 - Wert	17.000 °C         0.619 °C           5.000 °C         0.344 °C           22.000 °C         0.373 °C           5.0 °C         0.0 °C           0.0 °C         0.188 °C           0.0 °C         0.289 °C           17.0 °C         0.222 °C           0.0 °C         0.577 °C           22.0 °C         0.0 °C           0.0 °C         0.289 °C           20.0 °C         0.577 °C           22.0 °C         0.0 °C           0.0 °C         0.289 °C           2010.23 m3/h         8.70 m3/h           1.2 kg/m3         89.9 -           300.0 Pa         2.60 Pa           0.7059 -         0.0400 -	17.000 °C         0.619 °C           5.000 °C         0.344 °C           22.000 °C         0.373 °C           5.0 °C         0.0 °C           0.0 °C         0.188 °C           Rechteck         0.0 °C           0.0 °C         0.289 °C           0.0 °C         0.289 °C           Rechteck         17.0 °C           0.0 °C         0.222 °C           0.0 °C         0.577 °C           Rechteck         22.0 °C           0.0 °C         0.237 °C           Rechteck         20.0 °C           0.0 °C         0.289 °C           89.9 °C         Rechteck           2010.23 m3/h         8.70 m3/h           1.2 kg/m3         -           300.0 Pa         -           0.0 °A         2.60 Pa           Rechteck         0.7059 -           0.0400 -         -	17.000 °C       0.619 °C	17.000 °C       0.619 °C

![](_page_63_Figure_0.jpeg)

# Optimaler Wasser-Glykol-Massenstrom in Abhängigkeit des Luftvolumenstromes

![](_page_64_Figure_0.jpeg)

Wasser-Glykol-Verhältnis 12% v/v (Frostsicherheit -5°C)

- Wasser-Glykol-Verhältnis 21% v/v (Frostsicherheit -10°C)
- Wasser-Glykol-Verhältnis 29% v/v (Frostsicherheit -15°C)
- Wasser-Glykol-Verhältnis 40% v/v (Frostsicherheit -25°C)
- Wasser-Glykol-Verhältnis 44% v/v (Frostsicherheit -30°C)

- —— Wasser-Glykol-Verhältnis 12% v/v (Frostsicherheit -5°C)
- Wasser-Glykol-Verhältnis 21% v/v (Frostsicherheit -10°C)
- Wasser-Glykol-Verhältnis 29% v/v (Frostsicherheit -15°C)
- Wasser-Glykol-Verhältnis 40% v/v (Frostsicherheit -25°C)
- Wasser-Glykol-Verhältnis 44% v/v (Frostsicherheit -30°C)

![](_page_65_Figure_0.jpeg)

- ─── Wasser-Glykol-Verhältnis 12% v/v (Frostsicherheit -5°C)
- Wasser-Glykol-Verhältnis 21% v/v (Frostsicherheit -10°C)
- Wasser-Glykol-Verhältnis 29% v/v (Frostsicherheit -15°C)
- Wasser-Glykol-Verhältnis 40% v/v (Frostsicherheit -25°C)
- Wasser-Glykol-Verhältnis 44% v/v (Frostsicherheit -30°C)

- ——Wasser-Glykol-Verhältnis 12% v/v (Frostsicherheit -5°C)
- Wasser-Glykol-Verhältnis 21% v/v (Frostsicherheit -10°C)
- Wasser-Glykol-Verhältnis 29% v/v (Frostsicherheit -15°C)
- Wasser-Glykol-Verhältnis 40% v/v (Frostsicherheit -25°C)
- Wasser-Glykol-Verhältnis 44% v/v (Frostsicherheit -30°C)